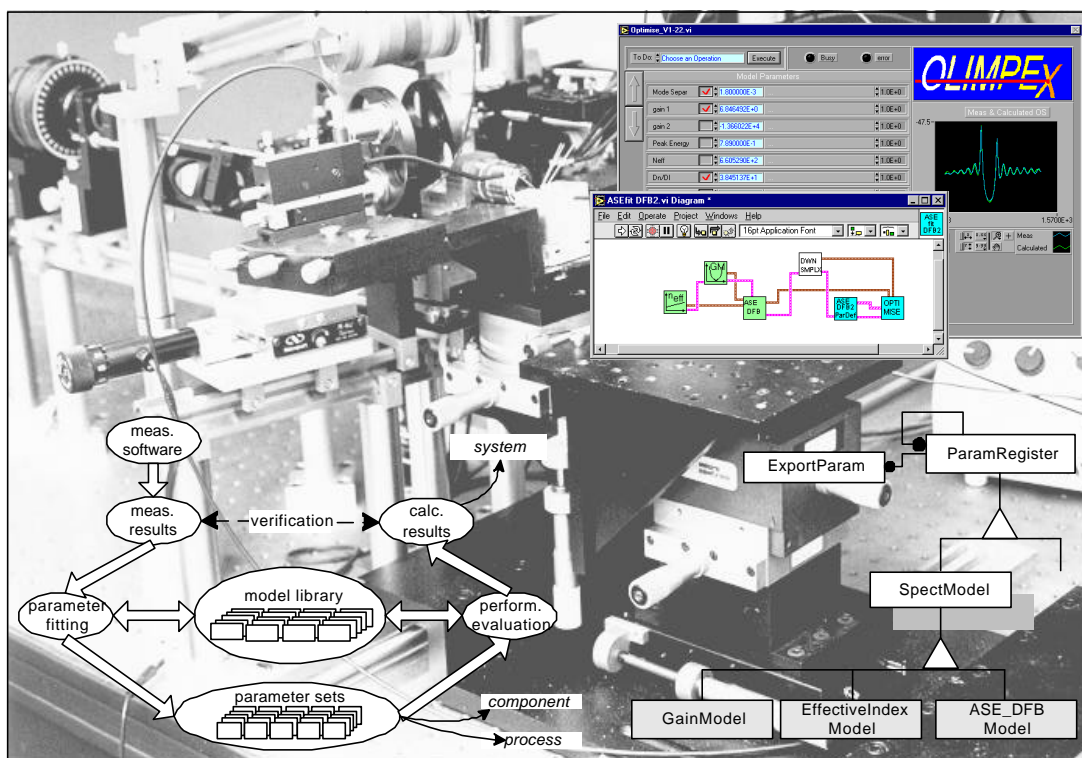


Objectgeoriënteerde meet- en parameterextractie- methodieken voor opto-elektronische componenten

*Object oriented measurement and parameter extraction methodologies
for opto-electronic components*

Piet Verhoeve



DANKWOORD

Zoals elk proefschrift, zou ook dit werk niet zijn wat het is zonder de inbreng van vele mensen. Door de omvang en de diversiteit van het werk gedurende de afgelopen zes jaar, is het niet mogelijk om alle bijdragen afzonderlijk te vermelden zonder er te vergeten. Ik wil dan ook alvast iedereen bedanken die een (kleine) bijdrage geleverd heeft om dit werk te realiseren, maar een aantal mensen verdienen toch een speciale vermelding in dit dankwoordje.

Als eerste wil ik Prof. P. Lagasse als leider van de vakgroep bedanken, onder zijn leiding heb ik de vakgroep gedurende de laatste jaren met blijvend succes zien groeien en uitbreiden. Niet zozeer het aantal vierkante meters, maar wellicht belangrijker : het aantal personen, de onderzoeksmogelijkheden en de aanwezige faciliteiten. Van deze laatste is trouwens goed gebruik gemaakt voor het realiseren van dit proefschrift.

De promotoren van dit werk, Prof. R. Baets en Dr. G. Morthier, wil ik danken voor de geboden mogelijkheden. Hierbij denk ik niet alleen aan de diverse wetenschappelijke aspecten die aan de basis van dit werk lagen zoals de vele discussies over metingen en extracties, de softwarebijscholing, de verblijven aan andere instituten, enz. Maar denk ik ook aan de internationale ervaring die ik kreeg via de verschillende Europese projecten en de mogelijkheden om de voor- en de nadelen te ervaren van de recente informatietechnologie zoals ISDN-videoconferenties, internet en thuiswerken.

Prof. H. Tromp wens ik te bedanken voor zijn waardevolle inbreng bij de ontwikkeling en de realisatie van het softwareraamwerk en ook een woordje van dank aan Prof. R. Boute voor de inbreng omtrent de formele syntaxbeschrijving van ODIF.

Van de vele Europese interacties tijdens de projecten, zullen vooral de ervaringen met “Dublin” en “Stockholm” bijblijven. Ik zou dan ook graag de mensen aan het “University College Dublin” willen bedanken voor de boeiende interactie gedurende de implementatie van de OLIMPEX-toepassingen.

Stockholm heeft, zoals velen ondertussen weten, een speciale betekenis gekregen tijdens de afgelopen jaren. Dit is vooral te danken aan Björn Broberg, bij wie ik in 1993 mijn eerste lijnbreedtemeting realiseerde in het “Institute of Microelectronics” (IM). Ook later, toen het na een naamsverandering IMC geworden was, heeft hij mijn activiteiten steeds met enthousiasme gevolgd. De verschillende bezoeken aan Stockholm waren niet alleen wetenschappelijk interessant maar zo leerde ik ook de familiale kant van Zweden kennen.

De realisatie van de softwarecocktail “LabVIEW-C++” zou niet mogelijk geweest zijn zonder de inbreng de mensen van National Instruments. In het bijzonder wens ik Andres Salvador-Stamm te bedanken voor het bezorgen van de inside-contacts, zijn enthousiasme en de stimulerende gesprekken over het gerealiseerde werk.

Ik ga geen poging doen om de vele mensen van de vakgroep te benoemen die een bijdrage geleverd hebben aan dit werk, een dankwoord is geen weergave van het personeelsbestand. Maar er zijn toch een paar mensen die een speciaal woordje aandacht verdienen: Geert Diet voor de LabVIEW-implementatie van een aantal toepassingen en Eddy Hebbelinck en Luc Haentjens voor het geduldig op maat fabriceren van de vele stukken die in de meetopstelling terecht kwamen. Verder wens ik ook drie personen te vermelden die de vakgroep reeds geruime tijd verlaten hebben maar toch een rol gespeeld hebben: Peter De Dobbelaere die mij vele trucs en geheimen van aligneren aanleerde, Danny Vercauteren die de Word-template voor doctoraten ontwikkelde en Stefan Verelst die me de eerste stappen hielp zetten in de wereld van het objectgeöriënteerd programmeren. Als laatste in de rij INTEC-medewerkers, een woordje van dank naar de opeenvolgende engelbewaarders van het computernetwerk: Henk, Francis, Chris en Kristien.

Ik wens ook de mensen te danken die ervoor zorgen dat het labo “het labo” is. Niet alleen het geleverde wetenschappelijk werk is daarvoor belangrijk maar ook de sfeer en de minder wetenschappelijke discussies gedurende de lunch- of koffiepauzes. Zo zullen de ontspannende momenten tijdens de boterhammen- of broodjeslunch zeker bijblijven, evenals de koffie van Pascale in “de 39”, die ondertussen uitgegroeid is tot een begrip. Een gezellige babbel, een nieuwe aflevering van de flair, de lotgevallen van Bo, pralines of een overschotje taart, in de loop der jaren veranderde de eenzame kop ‘s ochtends in een aangename verpozing tussen de vele wetenschappelijke activiteiten.

Als laatste in de rij, ook een woordje dank aan mijn vrouwtje, die als enige weet wat dit doctoraat werkelijk “gekost” heeft. Ik heb het hierbij niet over mijn bijdrage maar over haar steun en volharding die nodig waren om gedurende de afgelopen jaren verder te werken. Ik denk hierbij aan de opvang van de kinderen tijdens mijn “buitenlandse ervaring”, het verdragen van mijn minder aangename kantjes in periodes van stress en het rechthouden van het gezin zodat ik ongestoord kon “doorstomen” om dit boek af te werken. Maar ook aan het nalezen van deze tekst om de overblijvende fouten na de spellingchecker te vinden.

Gent, september 1998

Piet Verhoeve

INHOUDSTAFEL

Dankwoord	3
Inhoudstafel	7
Lijst van symbolen en afkortingen	13
Hoofdstuk 1	15
Inleiding	15
1.1 Situering.....	15
1.2 Probleemstelling	16
1.3 Doelstellingen.....	17
1.4 Structuur van het werk	18
1.5 Publicatielijst.....	19
Hoofdstuk 2	21
Meetfilosofie voor complexe opto-elektronische componenten	21
2.1 Inleiding.....	21
2.2 Opto-elektronische componenten.....	21
2.3 Karakterisering van componenten.....	26
2.3.1 Karakterisering gebaseerd op parameterextractie.....	26
2.3.2 De meerwaarde van fysische parameters t.o.v. wiskundige parameters	27
2.3.2.1 Voor de fabrikant van de component	27
2.3.2.2 Voor de gebruiker van de component	27
2.4 Meten op opto-elektronische componenten.....	28
2.4.1 Directe metingen en indirecte metingen	28
2.4.2 Intelligente manieren om te meten.....	29
2.4.3 Combinatie van metingen als gulden middenweg.....	29
2.4.4 Combinatie van componenten als extra mogelijkheid	29
2.5 Parameterextractie bij opto-elektronische componenten.....	30
2.5.1 Parameterextractie of fitten is een proces met valkuilen.....	30
2.5.2 Fysische parameters bevatten extra informatie	31
2.6 Gevolgen en doelstellingen voor de meetomgeving	32
2.6.1 Automatisering en degelijk software-ontwerp is noodzakelijk	32
2.6.2 Eisenpakket voor een flexibele omgeving.....	33
2.7 Besluit.....	34

Hoofdstuk 3	35
De software-opbouw, abstracte benadering.....	35
3.1 Inleiding.....	35
3.2 Algemene meetsoftware.....	35
3.3 Communicatie tussen applicaties	38
3.3.1 Algemeen werkingsprincipe	38
3.3.2 ODIF, een hiërarchische informatiestructuur	39
3.3.2.1 Het principe van een formele syntaxbeschrijving	39
3.3.2.2 De algemene structuur van ODIF.....	40
3.3.2.3 Inleiding op de formele notatie.....	40
3.3.2.4 Formele syntaxbeschrijving van de hoogste niveaus	41
3.3.2.5 Analyse van de formele syntaxbeschrijving	42
3.4 Communicatie tussen applicatie en instrumenten	47
3.4.1 De klassieke benadering : Instrumentdriver	47
3.4.2 Het principe van de functionele instrumentdriver	47
3.4.3 De functionele instrumentdriver : objectmodel	48
3.5 Korte introductie tot objectnotatie volgens Rumbaugh.....	50
3.6 Een objectmodel voor parameterextractie	51
3.6.1 De klassieke functionele benadering van parameterextractie.....	51
3.6.2 Een eerste benadering van het objectmodel	51
3.6.3 De relatie lasermodeel - optimaliseringsalgoritme	52
3.6.4 Het optimaliseringsalgoritme	54
3.6.5 Het lasermodeel.....	54
3.6.6 De kostenfunctie.....	56
3.6.7 Het volledige objectmodel voor het parameterextractieprobleem.....	57
3.7 Besluit.....	58
Hoofdstuk 4	59
Parameterextractie voor laserdiodes	59
4.1 Inleiding.....	59
4.2 Eigenschappen van de golfgeleider.....	59
4.2.1 De optische versterking of “Gain” en aanverwante parameters	59
4.2.1.1 De optische versterking.....	59
4.2.1.2 De differentiële optische versterking	60
4.2.1.3 De niet lineaire versterking.....	60
4.2.2 Het optisch intern verlies.....	61
4.2.3 Groepsindex - effectieve brekingsindex.....	62
4.2.4 Reflecties aan de uiteinden	63
4.2.5 Eigenschappen van het ingebouwd diffractierooster.....	63
4.3 De statische lasereigenschappen.....	64
4.3.1 Drempelstroom.....	64
4.3.1.1 Methode één : het intersectiepunt met de abscis	64
4.3.1.2 Methode twee : het buigpunt van de vermogenscurve	65
4.3.1.3 Methode drie : snijpunt van de spontane emissie en de laserwerking	66
4.3.2 Serieweerstand	67
4.3.3 De piekgolflengte en spectrale zuiverheid	67

4.3.4 Karakteristieke temperatuur : T_0	68
4.3.5 Het nabije en verre veld	69
4.3.6 Het optisch spectrum.....	69
4.4 Ruiseigenschappen van laserdiodes.....	70
4.4.1 Inleiding.....	70
4.4.2 Amplituderuis : de relatieve intensiteitsruis	70
4.4.3 Faseruis : de lijnbreedte	71
4.5 De dynamische lasereigenschappen.....	73
4.5.1 Inleiding.....	73
4.5.2 AM-modulatie.....	73
4.5.3 FM-modulatie	73
4.5.4 AM-FM koppeling	74
4.6 Besluit.....	74
Hoofdstuk 5	77
Geavanceerde parameterextractie bij laserdiodes.....	77
5.1 Inleiding.....	77
5.2 Extractie uit het spontane emissie-spectrum.....	77
5.2.1 Algemene aspecten van fitten op het spontane emissie-spectrum.....	78
5.2.1.1 De modellen	78
5.2.1.2 Het fitten.....	78
5.2.1.3 De betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de oplossing.....	78
5.2.2 Spontane emissie-spectrum gebaseerde extractie bij DFB-laserdiodes.....	79
5.2.2.1 Het spontane emissie-spectrummodel.....	80
5.2.2.2 Evaluatie van het spontane emissie-spectrummodel van de DFB-laserdiode	81
<i>A. Parametercombinaties.....</i>	<i>81</i>
<i>B. Gevoeligheid van de kostenfunctie aan de parameters.....</i>	<i>82</i>
5.2.2.3 Gebruikte fitprocedure	84
5.2.3 Spontane emissie-spectrum gebaseerde extractie bij Fabry-Perot-laserdiodes	85
5.2.3.1 Het spontane emissie-spectrummodel voor een Fabry-Perot-laserdiode	85
5.2.3.2 Evaluatie van het model	85
5.3 Extractie uit de relatieve intensiteitsruis (RIN)	88
5.3.1 Inleiding.....	88
5.3.2 De meting en elementaire extractie	89
5.3.3 Extractie van componentparameters.....	92
5.3.3.1 De “D-factor” : differentiële optische versterking	92
5.3.3.2 De “K-factor” : intrinsieke maximale bandbreedte en niet lineaire versterkingscoëfficiënt....	92
5.3.3.3 Analyse van de extractienauwkeurigheid.....	93
5.3.3.4 Totaaloverzicht van de extractie op basis van RIN-metingen.....	95
5.4 Extractie uit een combinatie van metingen.....	95
5.4.1 Een enkele laserdiode.....	96
5.4.2 Een set laserdiodes	97
5.4.2.1 Inleiding	97
5.4.2.2 Een voorstel voor een set laserdiodes.....	98
5.4.2.3 Extractieprocedure op basis van een aantal Fabry-Perot-laserdiodes	98
5.4.2.4 Extractieprocedure op basis van een aantal DFB-laserdiodes.....	101

5.4.2.5 Extractieprocedure op basis van een aantal Fabry-Perot en DFB-laserdiodes	101
5.5 Besluit.....	102
Hoofdstuk 6	105
De meetopstelling.....	105
6.1 Inleiding.....	105
6.2 Mechanische eisen.....	105
6.2.1 Eisen vanuit de laserdiode.....	105
6.2.2 Eisen vanuit de metingen.....	106
6.3 Mechanische aanpak van de gestelde problemen.....	106
6.3.1 Algemene aanpak van de meetopstelling.....	106
6.3.2 De positioneertoren voor de laserdiode	108
6.3.3 De optische bank.....	110
6.3.3.1 Het inkoppelen in optische vezel.....	110
6.3.3.2 Het nabije en verre veld.....	111
6.3.3.3 Het optische vermogen.....	113
6.4 Enkele implementatiedetails	113
6.5 Evaluatie van de meetopstelling	114
6.5.1 Inleiding.....	114
6.5.2 De stabiliteit en temperatuursafhankelijkheid	115
6.5.3 Reflectiegevoeligheid.....	117
6.5.3.1 Waarom reflectiegevoeligheid meten.....	117
6.5.3.2 Het concept van de meetopstelling.....	118
6.5.3.3 De implementatie van de meetopstelling.....	119
6.5.3.4 De metingen.....	119
6.6 Verdere ontwikkelingen van de meetopstelling.....	121
6.7 Besluit.....	122
Hoofdstuk 7	123
Implementatie van de meet- en extractiesoftware	123
7.1 Inleiding.....	123
7.2 Algemene aspecten van de implementatie.....	123
7.2.1 Keuze van de programmeertalen.....	123
7.2.2 Een korte introductie van LabVIEW	125
7.2.3 De symbiose van LabVIEW en C++	126
7.2.3.1 De associatie van iconen in LabVIEW en objecten in C++.....	126
7.2.3.2 De interactie tussen LabVIEW C/C++.....	130
7.2.4 LabVIEW programmering volgens de objectgeoriënteerde methode	131
7.3 De basiscomponenten	132
7.3.1 De functionele instrumentdriver.....	132
7.3.2 De ODIF bestandsinterface.....	133
7.3.3 De C++ objecten in LabVIEW.....	134
7.3.4 Documentatie van de toepassingen.....	135
7.4 De basistoepassingen.....	138
7.4.1 De standaardtoepassing	138
7.4.2 De “engine”-toepassing	139

7.4.3 De extractietoepassing	141
7.5 Het eindresultaat : OLIMPEX.....	142
7.5.1 Inleiding.....	142
7.5.2 Wat is OLIMPEX ?.....	142
7.5.3 De gerealiseerde componenten en toepassingen	143
7.6 Besluit.....	145
Hoofdstuk 8	147
Evaluatie van de meet- en extractietools	147
8.1 Inleiding.....	147
8.2 Extractie op een set FP en DFB laserdiodes.....	147
8.2.1 Beschrijving van de set laserdiodes	147
8.2.2 De gebruikte meetprocedure	149
8.2.3 Evaluatie van de gebruikte toepassingen.....	151
8.2.4 De resultaten voor de Fabry-Perot-laserdiodes	152
8.2.4.1 Parameters bepaald uit de vermogenmeting (LIV)	153
8.2.4.2 Parameters bepaald uit de spontane emissie-spectrummeting.....	154
8.2.4.3 Parameters bepaald uit de relatieve intensiteitsruis-meting	160
8.2.5 Bespreking van de resultaten uit de Fabry-Perot-laserdiodes.....	163
8.2.6 Resultaten voor de DFB-laserdiodes.....	164
8.2.6.1 Parameters bepaald uit de vermogenmeting	165
8.2.6.2 Parameters bepaald uit het fitten van het spontane emissie-spectrum	166
8.3 Spontane emissie-spectrum gebaseerde extractie bij DBR-laserdiodes	169
8.3.1 Inleiding.....	169
8.3.2 Het spontane emissie-spectrummodel voor een DBR-laserdiode	170
8.3.3 Evaluatie van het gebruikte model	171
8.3.4 Fitprocedure	172
8.3.5 Resultaten van de extractie op een DBR laser van Philips	174
8.4 Besluit.....	176
Hoofdstuk 9	177
Besluit en toekomstperspectief.....	177
9.1 Inleiding.....	177
9.2 Overzicht van het gerealiseerde werk.....	177
9.3 Slotbemerkingen	179
Appendix A	Error! Bookmark not defined.
ODIF : Optical Data Interchange Format.....	Error! Bookmark not defined.
Appendix B	Error! Bookmark not defined.
Introductie tot de meettoepassingen in het pakket “OLIMPEX”	Error! Bookmark not defined.
Appendix C	229
Uitdrukkingen en afleidingen.....	229

Appendix D	235
Gedetailleerde informatie over de toepassingen en componenten van het pakket “OLIMPEX”	235

LIJST VAN SYMOLEN EN AFKORTINGEN

Gebruikte afkortingen :

ASE	...	spontane-emissie (“ <i>Amplified Spontaneous Emission</i> ”)
DAQ	...	plug-in kaart voor PC om digitale en analoge input/output te realiseren. (“ <i>Data Acquisition</i> ”)
DBR	...	Distributed Bragg reflector laserdiode
DFB	...	Distributed feedback laserdiode
FID	...	functionele instrumentdriver
GPIB	...	“ <i>General Purpose Instrumentation Bus</i> ”, een communicatieprotocol om verschillende meetinstrumenten te laten communiceren.
LabVIEW		grafische programmeertaal en omgeving van National Instruments. (“ <i>Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench</i> ”).
RIN	[dB/Hz]	relatieve intensiteitsruis (“ <i>Relative Intensity Noise</i> ”), hoeveelheid intensiteitsruis van een laserdiode ten opzichte van het gemiddeld vermogen.
SMSR	...	zijmode-onderdrukingsratio (“ <i>Side Mode Suppression Ratio</i> ”), de verhouding van de vermogens in de hoofdmode en de op één na sterkste mode in het optisch spectrum.
SQE	...	som van de kwadraten van de fout, het verschil tussen de gemeten en berekende karakteristiek (“ <i>sum of squared errors</i> ”)
WDM	...	“ <i>Wavelength Division Multiplexing</i> ”, een techniek waarbij signalen op verschillende golflengten doorheen eenzelfde optische vezel verstuurd worden.
WTLS	...	“ <i>Widely tuneable laser</i> ” in golflengte afstembare laserdiode met groot afstembereik

Gebruikte symbolen :

$\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N}$	[m ²]	differentiële optische versterking
η_{ext}	[W/A]	externe efficiëntie, optisch vermogen ten opzichte van de geïnjecteerde stroom.
η_i	[%]	injectie-efficiëntie
$\eta_{Q,\text{ext}}$	[%]	externe quantum efficiëntie, de externe efficiëntie uitgedrukt in termen van deeltjes (aantal fotonen per elektron)

α_{Henry}	[-]	lijnbreedteverbredingsfactor (“ <i>linewidth enhancement factor</i> ”), genoemd naar C.H. Henry die als eerst het fenomeen erkende
α_i	[m ⁻¹]	interne optische verliezen van het materiaal
A	[s ⁻¹]	niet radiatieve recombinatiecoëfficiënt (“ <i>mono molecular recombination coefficient</i> ”)
B	[m ³ s ⁻¹]	bimoleculaire recombinatiecoëfficiënt
C	[m ⁶ s ⁻¹]	Auger-recombinatiecoëfficiënt
d	[m]	dikte van het actief gebied
ϵ	[m ³]	niet lineaire versterkingscoëfficiënt, (“ <i>gain suppression coefficient</i> ”)
f	[Hz]	frequentie
f_r	[Hz]	resonantiefrequentie
Γ	[-]	vulfactor (“ <i>confinement factor</i> ”)
γ	[Hz]	dempingsfactor
G	[m ⁻¹]	modale optische versterking ($G = Gg - a$)
g	[m ⁻¹]	optische versterking van het materiaal
I	[A]	stroom
I_{th}	[A]	drempelstroom
λ	[m]	golflengte
L	[m]	lengte van de sectie
N	[m ⁻³]	ladingsdragersdichtheid (electronenconcentratie)
q	[C]	elementaire ladingseenheid
R_{sp}	[s ⁻¹]	spontane emissie-generatiecoëfficiënt
S	[m ⁻³]	fotondichtheid
τ_d	[s]	differentiële ladingsdragerslevensduur
τ_p	[s]	foton levensduur
v_g	[m/s]	groepssnelheid
w	[m]	breedte van het actief gebied

HOOFDSTUK 1

Inleiding

1.1 Situering

Reeds geruime tijd worden er opto-elektronische componenten gebruikt in de telecommunicatie. In het begin werden de optische telecommunicatietechnieken vooral gebruikt om lange afstanden tussen centrales te overbruggen. Door de digitalisering van de meeste communicaties (bijvoorbeeld ISDN, GSM, ...) en de doorbraak van computernetwerken zoals het internet, is er een steeds grotere vraag naar hoge bandbreedtes, zelfs tot bij de eindgebruiker. Daardoor bestaat momenteel de tendens om de optische verbindingen uit te breiden, weliswaar niet echt tot in de woning van de eindgebruiker maar toch zijn er plannen om die optische vezel tot in de straat of in de wijkcentrale te brengen.

Samen met het uitbreiden van het aantal optische verbindingen is ook de manier waarop die communicatie gebeurt aan het veranderen. Zo worden er met behulp van de WDM-techniek meerdere signalen (op een verschillende golflengte) doorheen één optische vezel verstuurd. Deze veranderingen brachten nieuwe componenten met zich mee zoals optische schakelaars, maar ook de reeds bestaande componenten zoals laserdiodes ondergingen een ware metamorfose. Om laserlicht te genereren dat doorheen een WDM-netwerk kan gestuurd worden, moet de laserdiode een andere constructie hebben zodanig dat er kan voldaan worden aan de eisen voor een spectraal zuivere en liefst in golflengte afstembare lichtbron.

Deze tendensen zorgen er niet alleen voor dat er een grotere vraag is naar optische componenten, maar ze zorgen er ook voor dat er een grotere nood ontstaat aan “relatief goedkope” maar toch performante en vaak complexe componenten. Om ervoor te zorgen dat deze componenten op een efficiënte manier gemaakt en gebruikt worden is er een goede karakterisering nodig, bij voorkeur gecombineerd met parameterextractie.

De fabrikant van de component wil immers zo vroeg mogelijk kunnen bepalen of de component voldoende kwaliteit biedt en dus verkoopbaar zal zijn. Als hij op een relatief eenvoudige manier kan verifiëren of de gerealiseerde parameters overeenkomen met de optwerpparameters, kan hij die informatie in een productieomgeving gebruiken om de processen zo nodig bij te sturen. Als de karakterisering voldoende specifiek en volledig is, kan hij die karakteristieken gebruiken om de eigenschappen van de component te specificeren voor de klant.

De systeemontwerper is vooral geïnteresseerd in een voldoende nauwkeurige beschrijving van een component, op die manier kan hij de systemen beter afstemmen op de realiteit en zijn te grote toleranties voor de componenten niet nodig. Bovendien laat een nauwkeurige beschrijving ook toe dat de systeemsimulaties met hogere precisie kunnen uitgevoerd worden.

Karakteriseringstechnieken op basis van parameterextractie zijn reeds goed ingeburgerd in de elektronische halfgeleiderwereld (vb. de SPICE-parameters van een transistor),

maar worden in de optische wereld nog niet gebruikt, ondermeer door het feit dat de productieprocessen tot voor enkele jaren niet voldoende stabiel waren en mede door de complexiteit van opto-elektronische componenten. Door de aanwezigheid van de fotonen, de aanwezigheid van meerdere secties en daaruit volgend complex gedrag, is het zeker niet triviaal om een tegelijk efficiënte en nauwkeurige karakterisering van een component uit te voeren. Bovendien zijn een groot aantal van de parameters die een grote invloed hebben op het gedrag van de component (zoals de koppelingscoëfficiënt van een diffractierooster) niet zonder meer meetbaar. Er is dus een duidelijke nood aan een karakteriseringsstrategie die gebruik maakt van alle aanwezige informatie en tot doel heeft een volledige en tegelijkertijd consistente set parameters voor een component of een reeks componenten te realiseren.

1.2 Probleemstelling

Het is zonder twijfel zo dat het karakteriseren van opto-elektronische componenten en de daaraan gekoppelde parameterextractie op zich geen nieuwe feiten zijn. Het is echter zo dat tot op heden al deze activiteiten min of meer volledig los van elkaar werden uitgevoerd. Iedereen die onderzoeks- of ontwikkelingswerk op het gebied van laserdiodes verricht heeft een aantal meetfaciliteiten waarvan er misschien een paar geautomatiseerd zijn. In de meeste gevallen gaat het dan om losstaande opstellingen uitgerust met ad hoc software.

Doordat de laserdiode telkens op een andere opstelling moet geplaatst worden om een andere meting uit te voeren, zal de karakterisering meestal beperkt worden tot het hoogstnodige. Elke opstelling heeft bovendien meestal zijn eigen softwaretoepassingen, waardoor er meestal ook geen verband bestaat tussen de verschillende bestandsformaten, hetgeen een combinatie van de gegevens erg moeilijk maakt. Dit beperkt het gebruik van parameterextractiemethodes, want telkens er gegevens van verschillende metingen gecombineerd moeten worden, moeten de gegevens manueel ingegeven worden of moet er een specifieke oplossing geïmplementeerd worden.

Geavanceerde parameterextractiemethodes (bijvoorbeeld parameterextractie op basis van het spontane emissie-spectrum van een laserdiode) worden in de praktijk nog veel minder gebruikt. Als dergelijke methodes in productie-omgevingen willen gebruikt worden, moet een automatisering doorgevoerd worden zodat de complexe procedures op een eenvoudige manier kunnen uitgevoerd worden. Er is bijgevolg nood aan software die dergelijke automatiseringen op een geïntegreerde manier toestaat.

Het is in de “meetwereld” niet echt de gewoonte om software te ontwerpen en te implementeren met het oog op herbruikbaarheid of onderhoudbaarheid. Dit heeft tot gevolg dat de introductie van een nieuw meettoestel (als uitbreiding of ter vervanging van een defect toestel) meestal een grote hoeveelheid softwaremodificaties teweegbrengt. Het zorgt er ook voor dat meettoepassingen vaak meerdere keren geïmplementeerd worden, omdat de geringe onderhoudbaarheid een zuivere modificatie in de weg staat. Het gebrek aan flexibele software kan ook in het dagelijks gebruik voor problemen zorgen. Door de kostprijs van de optische meetapparatuur, wordt er normaal een maximale bezettingsgraad nagestreefd en worden de meetinstrumenten verdeeld over de verschillende meetopstellingen. Het kan dus voorkomen dat het specifieke toestel waarvoor de software geïmplementeerd werd niet ter beschikking is, maar wel een gelijkaardig toestel. In het geval van niet flexibele software zorgt dit met andere woorden voor een verspilling van middelen.

In de softwarewereld daarentegen bestaat de laatste jaren duidelijk een tendens om steeds meer aandacht te hebben voor herbruikbaarheid en onderhoudbaarheid van de ontwikkelde toepassingen. Dit kan ondermeer gerealiseerd worden door toepassing van het objectgeoriënteerd paradigma : het probleem wordt opgesplitst in een aantal “objecten” die elk een deel van het probleem oplossen en samen de eindoplossing vormen. Doordat de objecten op zichzelf staan en duidelijke interfaces hebben ten opzichte van de rest van de oplossing, wordt het eindresultaat veel beter te onderhouden. Indien nodig kunnen de implementaties van de objecten veranderen, zolang de interface en het gebruik van een object niet verandert, blijft de eindoplossing werken. Bovendien is het ook mogelijk om algemene objecten te herkennen in de oplossing. Deze algemene objecten kunnen vervolgens gebruikt worden bij andere toepassingen, hetgeen hergebruik stimuleert.

Deze softwaretechnieken zijn echter nog niet doorgedrongen in de meet- en modelleringswereld; het is slechts tijdens het neerschrijven van dit proefschrift dat de eerste publikaties in die richting verschenen [1.1]. Indien die softwaretechnieken zouden kunnen geënt worden op de meetwereld, zou dit een grote stap voorwaarts zijn voor de karakterisering van componenten. Hiervoor dient er een gestructureerde aanpak ontwikkeld te worden, die niet alleen de combinatie meetopstelling, meet- en extractiesoftware aanpakt, maar die er tevens voor zorgt dat de onderzoeker minder tijd moet spenderen aan het omzetten van gegevens of het implementeren van specifieke problemen.

Idealiter moet er een omgeving ontwikkeld worden waarbij het eenvoudig wordt om verschillende metingen en extracties uit te voeren en te combineren. Een omgeving waarbij het introduceren van een nieuw lasermodel of een ander extractie-algoritme geen weken van softwaremodificaties inhoudt. Een omgeving waarbij het eenvoudig wordt om bestaande meettoepassingen te gebruiken in combinatie met andere meetapparatuur. Een omgeving waarbij het mogelijk wordt om reeds ontwikkelde meettoepassingen te gebruiken als componenten binnen grotere metingen. Kortom een omgeving waar de onderzoeker kan “spelen” met metingen, modellen en extractiemethodes.

1.3 Doelstellingen

De kern van dit proefschrift bestaat uit metingen en parameterextractie op opto-elektronische componenten, meer bepaald laserdiodes. Alhoewel deze technieken ten dele reeds gebruikt worden, zal dit proefschrift een stap verder gaan : het zal een totaaloplossing voorstellen voor het probleem. Hierbij zal vooral aandacht besteed worden aan een kritisch onderzoek en een verbetering van de gebruikte methodes, met oog op correctheid van de resultaten en de mogelijke automatisering zodat het gebruik van dergelijke methodes in een productieomgeving mogelijk wordt. Deze doelstelling kan opgesplitst worden in een drieluik, gevormd door de karakterisering, de parameterextractie en de gestructureerde software-aanpak.

Het eerste luik is de karakterisering van de laserdiodes : er zal een meetopstelling gerealiseerd worden die de extensieve karakterisering mogelijk maakt zonder dat de laserdiode verplaatst moet worden. Deze opstelling zal verder uitgerust worden met de nodige karakteriseringssoftware die het meetwerk moet vereenvoudigen en automatiseren.

Het tweede luik wordt gevormd door de parameterextractie : de verschillende methodes van parameterextractie zullen worden onderzocht en meer bepaald de geavanceerde parameterextractiemethodes zullen in detail uitgewerkt en geanalyseerd worden zodat een

concreet schema kan opgesteld worden dat aangeeft hoe parameterextractie voor laserdiodes kan gerealiseerd worden.

Het derde luik van het proefschrift omvat de software-aanpak: in plaats van de software te zien als een noodzakelijk kwaad om de nodige berekeningen en automatiseringen uit te voeren, zal dit proefschrift een totaalaanpak ontwikkelen waarbij de onderliggende software-methodes, softwarestructuren en basisimplementaties een ondersteuning en een verrijking van het geheel vormen.

1.4 Structuur van het werk

Het in de vorige sectie voorgestelde drieluik van dit proefschrift is terug te vinden in de structuur van het werk. Het eerste luik i.v.m. de meetopstelling is terug te vinden in het midden van dit werk en de twee andere luiken (de parameterextractie en de software) omarmen als het ware het eerste.

De beschrijving van de meetopstelling wordt voorafgegaan door de theoretische beschrijving van de ontwikkelde methodes: eerst wordt er in hoofdstuk 2 een overzicht gegeven van de meetstrategie voor opto-elektronische componenten. In hetzelfde hoofdstuk worden ook de doelstellingen van het werk op een meer gedetailleerde manier uiteengezet. Vanuit die strategie wordt dan in hoofdstuk 3 de nodige theoretische onderbouw beschreven voor de te ontwikkelen softwaretoepassingen. Eenmaal de strategie en de onderliggende softwarestructuren vastliggen, wordt er in hoofdstuk 4 een overzicht gegeven van de verschillende laserparameters en de meest gebruikte methodes om die parameters te bepalen. Hoofdstuk 5 zet deze uiteenzetting verder aan de hand van de geavanceerde parameterextractiemethodes. De methodes gebaseerd op het relatieve intensiteitsruis- en het spontane emissie-spectrum werden in het kader van dit proefschrift onderzocht en in detail uitgewerkt.

Na de beschrijving van de meetopstelling in hoofdstuk 6, worden de praktische aspecten van de software-implementaties beschreven in hoofdstuk 7. Naast een verantwoording van de gemaakte keuzes, wordt ook een beschrijving gegeven van de ontwikkelde symbiose tussen een tekstuele (C++) en een grafische (LabVIEW) programmeertaal. Het hoofdstuk bevat ook een beschrijving van de gerealiseerde toepassingen, die onder de naam OLIMPEX verspreid werden in een aantal instituten in Europa, Canada en de VS. De evaluatie van de geïmplementeerde toepassingen en de beschreven methodes komt aan bod in hoofdstuk 8; de procedures worden er getest aan de hand van een concreet aantal laserdiodes.

Tenslotte worden de besluiten geformuleerd in hoofdstuk 9.

1.5 Publicatielijst

Het onderzoek in het kader van dit proefschrift gaf aanleiding tot een aantal publicaties in internationale tijdschriften en in de proceedings van internationale conferenties. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de publicaties die gedurende het onderzoek tot stand kwamen.

- [1] G. Vermeire, F. Vermaerke, *P. Verhoeve*, R. Baets, P. Van Daele, P. Demeester, "Single growth run 4th order QW GaAs-Al₆₀GaAs DFB lasers emitting at 780 nm", Lasers and Electro-Optics Society (LEOS) 1994 7th Annual Meeting , IEEE 94CH3371-2, Library of Congress 93-61268, Vol. 2, 31 October - 3 November 1994, pp. PD1.7.
- [1] A.J. Lowery, H. Olesen, G. Morthier, *P. Verhoeve*, R. Baets, J. Buus, D. McDonald, D.D. Marcenac, "A proposal for standardised parameters for semiconductor lasers", International Journal of Optoelectronics, 1995, vol 10, number 5, pp. 347-355.
- [1] *P. Verhoeve*, J. Timperman, D. Van Ruymbeke, R. Baets, J. Degrieck, "A novel method to discriminate compressive versus tensile strain in fibre Fabry-Perot strain sensors", Optical Fibre Measurement Conference (OFMC), 1995
- [1] V. Sainov, Ts. Petrova, A. Dimitrova, C.J. Van Den Poel, A. Valster, I. Veretennicoff, *P. Verhoeve*, R. Baets, Nguyen Huu Thanh, P.M. Boone, "Recording and copying of reflection holograms with a semiconductor laser", Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) 1996
- [1] G. Morthier, *P. Verhoeve*, R. Baets, R. Schatz, "Extraction of a large set of laser parameters from different measurements", IEEE International Semiconductor Laser Conference 1996
- [1] G. Morthier, *P. Verhoeve*, R. Baets, "A simple but accurate expression for the static and dynamic chirp in DFB lasers", Integrated Photonic Research (IPR), 1996
- [1] A.M. Gulisano, D.J. Robbins, P.J. Williams, *P. Verhoeve*, "Widely tunable sampled-grating DBR lasers to address 100 channels over 40 nm for WDM applications", ECIO97
- [1] *P. Verhoeve*, G. Diet, G. Sarlet, G. Morthier, R. Baets, T. Farrell, "OLIMPEX : measurement and parameter extraction tools for advanced laser diodes", Proceedings of Lasers and Electro-Optics Society (LEOS), Benelux chapter 97, pp. 109
- [1] *P. Verhoeve*, "Stretching the limits of LabVIEW : the symbiosis of Object Oriented "C++" programming and "G"", LabVIEW Technical Resource, vol. 6-1, pp. 24-26, 1998
- [1] *P. Verhoeve*, "The route to G++, object oriented programming techniques in LabVIEW", LabVIEW Technical Resource, vol. 6-2, pp.20-23, 1998
- [1] *P. Verhoeve*, Appendix A : "An Optical Data Interchange Format", from the book : "How to model and measure PHOTONIC DEVICES, Experiences from a European collaboration", Springer Verlag GmbH (Berlin), final report of COST240-project, to be published.

Op de volgende (inter)nationale forums werden mededelingen gedaan, van deze forums zijn echter geen algemene proceedings ter beschikking

- [1] *P. Verhoeve*, R. Baets, "Estimation of laser parameters from lightwave measurements", Union Radio-Scientifique Internationale (URSI), 1995
- [1] *P. Verhoeve*, G.Morthier, "Parameter extraction on laser diodes from spontaneous emission spectra", Semiconductor laser and amplifier workshop, Veldhoven, 1995

- [1] *P. Verhoeve*, G. Morthier, R. Baets, K. Sato, Y. Nakano, “ASE-spectra based parameter estimation for DFB and DBR lasers”, COST240 Workshop Budapest, 1996
- [1] *P. Verhoeve*, “Instrument driver software : beyond the physical instruments”, NI-days Benelux 1996
- [1] *P. Verhoeve*, “Measuring beyond physical instruments”, symposium on virtual instrumentation in telecom, 1997
- [1] *P. Verhoeve*, G. Diet, G. Sarlet, G. Morthier, R. Baets, T. Farrell, “OLIMPEX : measurement and parameter extraction tools for advanced laser diodes”, Union Radio-Scientifique Internationale (URSI), 1997

-
- [1.1] S. Fine, W. Smith, T. Turner, “Improving model development with configuration management”, IEEE Computational Science and Engineering, Vol. 5-1, 1998, pp. 56-65

HOOFDSTUK 2

Meetfilosofie voor complexe opto-elektronische componenten

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de algemene aspecten van metingen en karakterisering van opto-elektronische componenten.

Eerst wordt een overzicht gegeven van de werking van een halfgeleiderlaserdiode en enkele recente evoluties op het gebied van opto-elektronische componenten. De werking van een aantal componenten wordt geïllustreerd aan de hand van in het kader van dit proefschrift bekomen meetresultaten.

Vervolgens wordt vanuit de gebruikssituatie van de component, een algemene strategie voorgesteld (sectie 2.3), die in sectie 2.4 meer specifiek bekeken wordt voor de opto-elektronische componenten.

Het derde deel van dit hoofdstuk analyseert een aantal aspecten van het karakteriseringsproces (sectie 2.5) die dan leiden tot de specifieke problemen die opgelost worden in dit proefschrift (sectie 2.6).

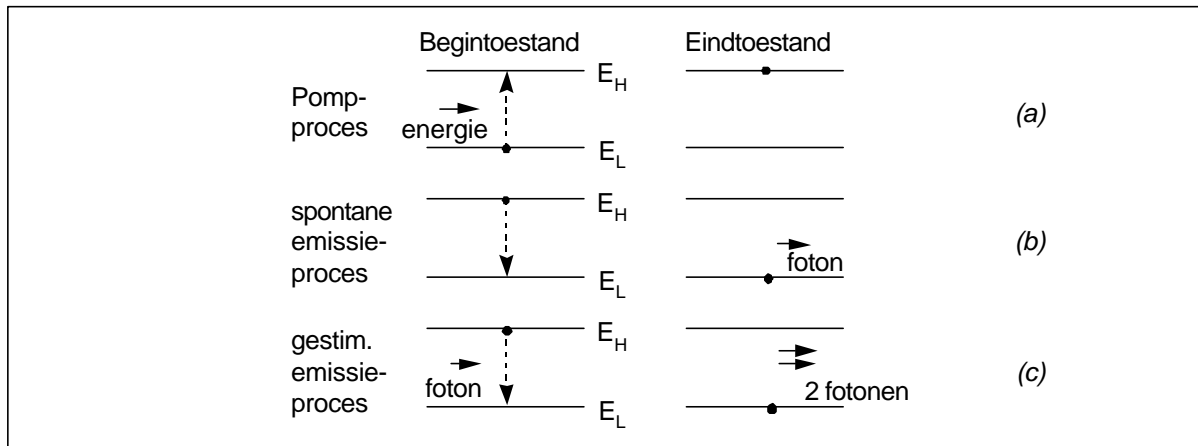
2.2 Opto-elektronische componenten

De basisstructuur van een laserdiode bestaat uit een caviteit (een golfgeleider en twee spiegels) die dienst doet als optische resonator waarbinnen een materiaal (het lasermedium) aanwezig is dat gepompt wordt. Door het pompen absorberen de ladingdragers in het lasermedium energie en bevinden ze zich in een hogere energietoestand (Figuur 2-1.a). Bij het terugvallen naar de basistoestand, wordt een foton uitgestraald. Dit kan op twee manieren gebeuren : spontaan (Figuur 2-1.b) of gestimuleerd (Figuur 2-1.c). In het eerste geval spreekt men van fluorescentie, in het tweede geval van gestimuleerde emissie. Bij de gestimuleerde emissie wordt het terugvallen naar de basistoestand geïnitieerd door een ander foton, het nieuw gecreëerde foton heeft dan dezelfde frequentie, fase en polarisatie, hetgeen de typische eigenschappen van laserlicht : monochromatisch en coherentie verklaart.

Vooraleer er sprake is van laserwerking, moet er aan enkele eisen voldaan worden. Ten eerste moet het licht ten gevolge van gestimuleerde emissie versterkt worden. Daartoe moeten er meer ladingdragers in de hogere energietoestand aanwezig zijn dan in de basistoestand, deze situatie wordt populatie-inversie genoemd. De versterking moet bovendien voldoende groot zijn om de optische verliezen in de caviteit te overwinnen; met andere woorden de eigenlijke laserwerking komt pas op gang nadat een bepaalde drempelwaarde

overschreden is. Deze eis uit zich in het feit dat de *roundtrip* optische versterking gelijk moet zijn aan één.

De tweede voorwaarde is dat het licht dat in de caviteit heen en weer kaatst opnieuw dezelfde fase moet hebben nadat het de volledige caviteit doorlopen heeft. Dit mechanisme zorgt ervoor dat slechts bepaalde golflengten door een laser kunnen uitgestraald worden.



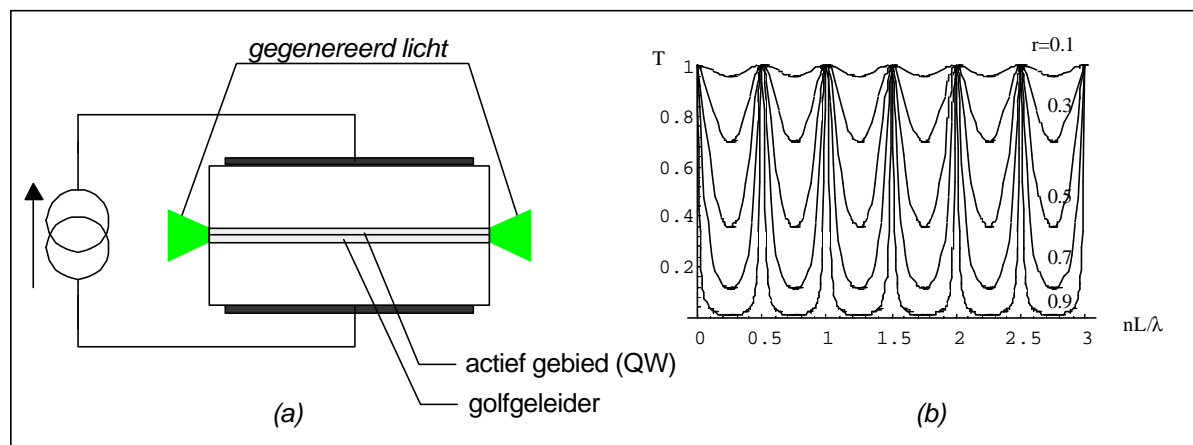
Figuur 2-1 : Schematische voorstelling van de verschillende mechanismen die optreden in een lasermedium.

Bij halfgeleiderlaserdiodes, bestaat het lasermedium uit halfgeleidermateriaal, meestal een combinatie van III-V-materialen zoals aluminium (Al), gallium (Ga) en arsenicum (As), waaraan een derde of zelfs een vierde materiaal toegevoegd wordt als dopering, typisch indium (In) of Fosfor (P). De materiaalcombinatie bepaalt de energieniveaus en bijgevolg ook de mogelijke golflengtes waar gestimuleerde emissie mogelijk is. Voor telecommunicatietoepassingen wordt vooral InGaAsP-materiaal gebruikt, met een emissiegolflengte van ongeveer 1550 nm omdat de optische glasvezel in de buurt van die golflengte minimale optische verliezen heeft. Voor opnamesystemen daarentegen wordt een korte golflengte verkozen gezien deze rechtstreeks een invloed heeft op de grootte van een bit. Bij die toepassingen worden vooral InAlGaP-materialen gebruikt die een typische emissiegolflengte hebben in de buurt van 670 nm (zichtbaar rood licht). Een paar jaar geleden werd deze reeks materialen uitgebreid met de "nitrides" [2.1], een combinatie van gallium en stikstof (GaN). Deze materialen hebben een emissiegolflengte in de buurt van het zichtbaar blauwe licht. Ondertussen werden reeds werkende laserdiodes met dit materiaal vervaardigd [2.2].

De golfgeleider waarbinnen het licht geleid wordt, wordt bij halfgeleiderlaserdiodes gevormd doordat materialen met een verschillende brekingsindex gebruikt worden. Hierdoor is het mogelijk om het gegenereerde licht beter te geleiden en de laserwerking te verbeteren doordat het licht vooral aanwezig is in het gebied waar er optische versterking is. De spiegels van de caviteit worden bij een eenvoudige Fabry-Perot-laserdiode gevormd door het halfgeleidermateriaal te klieven. Hierdoor ontstaat er een vlakke overgang van halfgeleider naar lucht (het facet van de laserdiode), die ongeveer 30 % van het invallende vermogen reflecteert. Indien nodig kan een speciale coating aangebracht worden op de facetten om die reflectie te verhogen of te verlagen.

Het pompmechanisme bij halfgeleiderlaserdiodes wordt gerealiseerd door stroom in de halfgeleider te injecteren. Door de energie aanwezig in die aangevoerde stroom kan de ladingdragers naar een hoger energieniveau pompen, hetgeen gestimuleerde emissie en optische

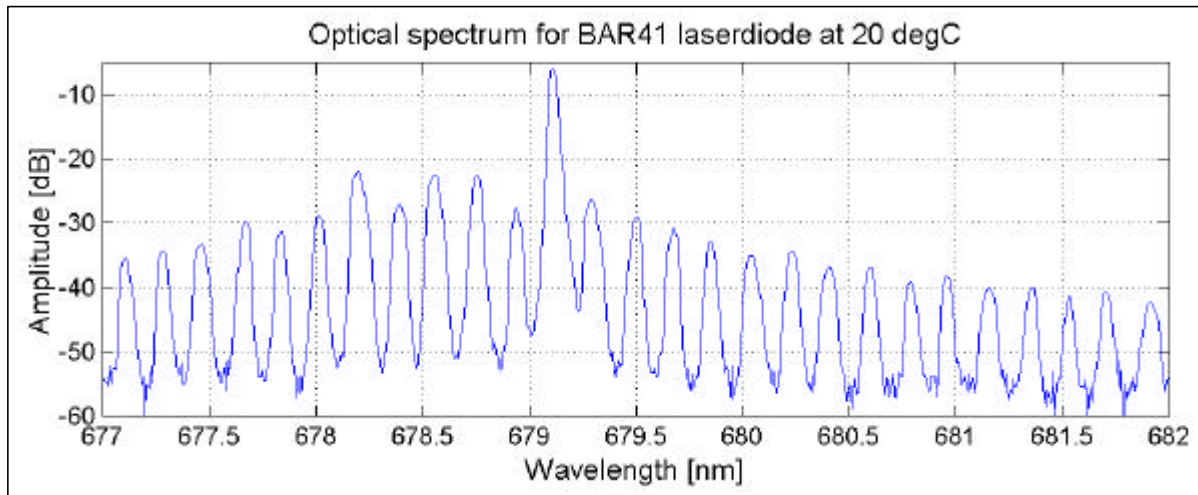
versterking mogelijk maakt. Het proces van de optische versterking kan verbeterd worden door gebruik te maken van *quantum wells*. Hiermee worden heel dunne laagjes halfgeleidermateriaal bedoeld, slechts enkele roosterperiodes dik. Door de geringe dikte, treden er quantummechanische effecten op, waardoor de ladingdragers niet langer vrij kunnen bewegen in drie dimensies. Dit laat toe om de geïnjecteerde stroom beter te controleren en om het materiaal efficiënter te pompen, hetgeen een grotere optische versterking oplevert.



Figuur 2-2 : Links : een schematische doorsnede van een Fabry-Perot-laserdiode, rechts de transmissie van een Fabry-Perot-caviteit als functie van de genormaliseerde golflengte.

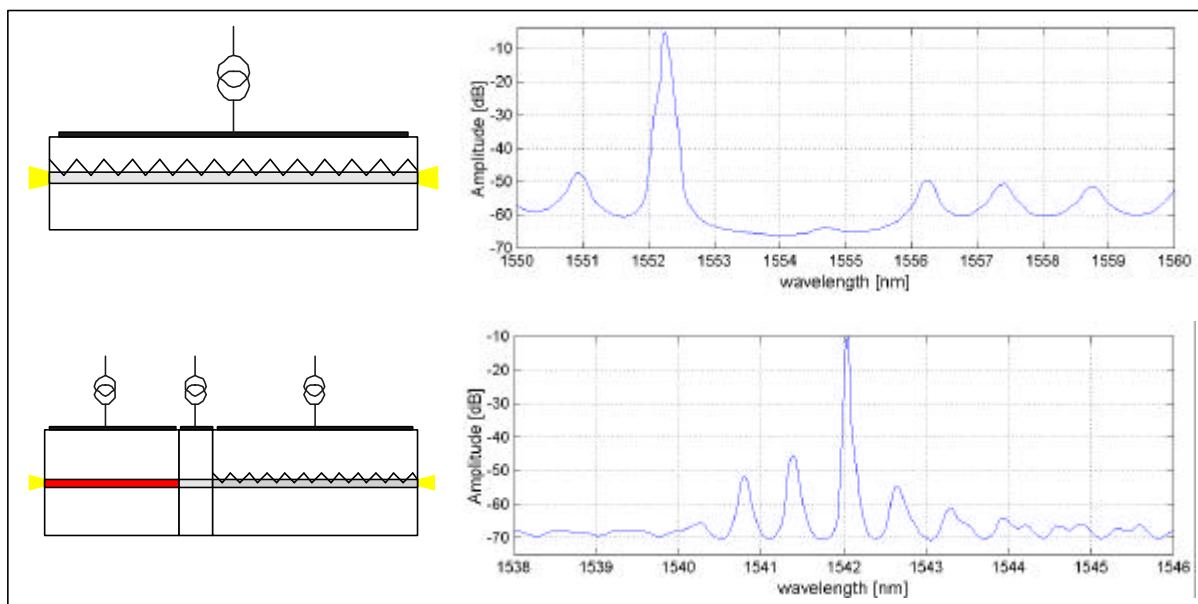
Alhoewel een van de condities voor laserwerking bepaalt dat de fase na een doortocht door de caviteit gelijk moet zijn, stralen de halfgeleiderlaserdiodes geen echt monochromatisch licht uit. Dit is ondermeer te wijten aan het feit dat de energieniveaus bij halfgeleiders waartussen laserwerking mogelijk is eigenlijk energiebanden zijn, hetgeen zorgt voor een brede spontane emissie. In het geval van een Fabry-Perot-laserdiode geeft de faseconditie aan dat laserwerking mogelijk is op een aantal golflengten, bepaald door de brekingsindex van het materiaal en de lengte van de caviteit. Figuur 2-2 toont een principeschema van een Fabry-Perot-laserdiode (a) en de overeenkomstige filterkarakteristiek van de Fabry-Perot-caviteit (b). De uiteindelijke lasergolflengte wordt dan bepaald door de combinatie van de filterkarakteristiek van de caviteit en de vorm van de optische versterking. Figuur 2-3 toont een voorbeeld van het gemeten optische spectrum van een Fabry-Perot-laserdiode die gebruikt wordt in optische opnamesystemen. De lasergolflengte (te herkennen als de mode die het meeste vermogen bevat) en de verschillende caviteitsmodi (de andere pieken in het spectrum) zijn duidelijk te zien. Bij deze laatste zou laserwerking mogelijk zijn, maar de optische versterking is niet groot genoeg om boven de drempelwaarde voor de laserwerking uit te komen.

Recente ontwikkelingen in de telecommunicatie, maken gebruik van WDM-technieken, hetgeen staat voor “*Wavelength Division Multiplexing*”. Bij deze techniek worden verschillende signalen op afzonderlijke golflengten (kleuren) gemoduleerd. Deze verschillende dragers worden dan gecombineerd en doorheen één optische vezel verstuurd, om aan de andere zijde volgens golflengte opgesplitst te worden alvorens de verschillende signalen gedecodeerd worden. Deze techniek stelt enkele eisen aan de gebruikte laserdiode : de golflengte van het laserlicht moet voldoende stabiel en zuiver zijn.



Figuur 2-3 : Een typisch voorbeeld van een optisch spectrum van een Fabry-Perot-laserdiode die gebruikt wordt in optische opnamesystemen.

Fabry-Perot-laserdiodes, zoals in Figuur 2-3, hebben naast het vermogen bij de lasergolflengte ook heel wat vermogen aanwezig in de andere caviteitsmodi, doordat de filterwerking van de caviteit alleen niet volstaat om een zuivere lichtbron te creëren. Om die reden werden andere, meer complexe lasertypes gerealiseerd. Een voorbeeld hiervan is de DBR-laserdiode (“*Distributed Bragg Reflector*”) waar één spiegel vervangen werd door een Bragg-rooster (zie Figuur 2-4). Dit rooster bevat een periodieke structuur die een specifieke golflengte goed reflecteert. Hierdoor wordt de filterkarakteristiek van de caviteit veel sterker golflengte-afhankelijk, en straalt de laserdiode een meer monochromatisch laserlicht uit. Een analoge techniek wordt gebruikt in de DFB-laserdiode (“*Distributed FeedBack*”), maar in dit geval bevindt het diffractierooster zich in dezelfde golfgeleider als het actieve gebied, waar het de voor- en achterwaarts propagerende golven bij een specifieke golflengte koppelt.

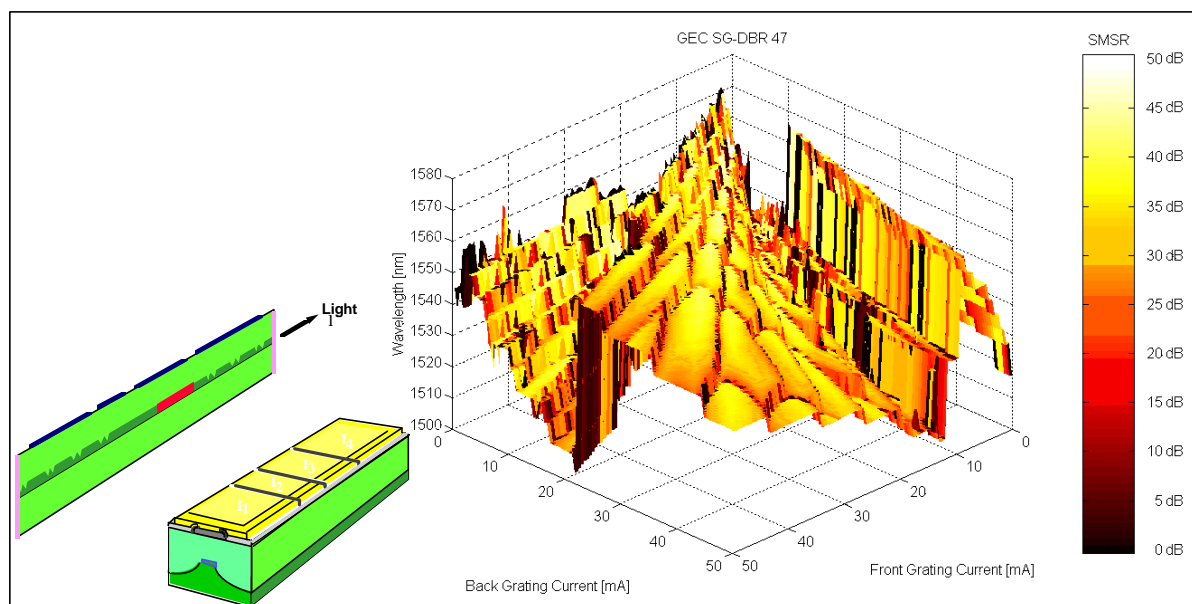


Figuur 2-4 : Een schematische voorstelling van een DBR- en DFB-laserdiode (respectievelijk onderaan en bovenaan). Voor elke laser diode is een typisch optisch spectrum weergegeven.

De opkomst van de WDM-technieken zorgde er ook voor dat de vraag en de hoeveelheid onderzoek naar afstembare laserdiodes groter werd. Een afstembare laserdiode heeft immers voordelen: als een afstembare laserdiode gebruikt wordt als reservelaserdiode, kan deze een defecte laserdiode voor alle golflengtekanalen vervangen. Indien een niet afstembare laserdiode gebruikt wordt als vervanging, moet er een reservelaserdiode voorzien worden voor elk golflengtekanaal. Wanneer gedacht wordt aan golflengterouwing, d.w.z. de gebruikte golflengte van het signaal bepaalt waar het signaal terechtkomt, moet de golflengte van de zender kunnen geschakeld worden, hetgeen ook gemakkelijker is met in golflengte afstembare laserdiodes. Dit vereist echter, gezien het aantal golflengtekanalen, dat er laserdiodes ter beschikking zijn met een groot afstembereik.

Om dit groot afstembereik te realiseren werden er nieuwe lasertypes voorgesteld. Deze maken gebruik van complexe spiegelconfiguraties die aan de hand van diffractieroostercombinaties en een variërende stroominjectie een andere golflengte kunnen reflecteren. De belangrijkste voorbeelden van dergelijke laserdiodes zijn de SSG-DBR- (“*Super Structure Grating-DBR*”) [2.3], de SG-DBR- (“*Sampled Grating-DBR*”) [2.4] en de GCSR-laserdiode (“*Grating assisted Coupler with Sampled Reflector*”) [2.5]. Naast het realiseren van een zo groot mogelijk afstembereik (ondertussen reeds 100 nm [2.6], [2.7]) richt het onderzoek zich ook op het bedienen van de verschillende golflengtekanalen binnen de 30 à 40 nm brede bruikbare golflengteband van de Erbium gedopeerde optische vezelversterkers [2.8].

Figuur 2-5 toont schematisch hoe een SG-DBR-laserdiode en de complexe golflengte karakteristiek ervan eruit ziet. De figuur toont hoe de lasergolflengte (de verticale as op de figuur) varieert als functie van de twee stromen door de spiegels. Het grijswaardenpatroon geeft aan hoe zuiver het laserlicht is, enkel de “bleke” gebieden zijn bruikbaar binnen WDM-systemen.



Figuur 2-5 : Links een schematische voorstelling van een SG-DBR laserdiode, rechts het gedrag van de piekgolflengte van een dergelijke laserdiode als functie van de stromen doorheen de voorste en achterste sectie. Het grijswaardenpatroon geeft aan hoe “zuiver” het gegenereerde licht is.

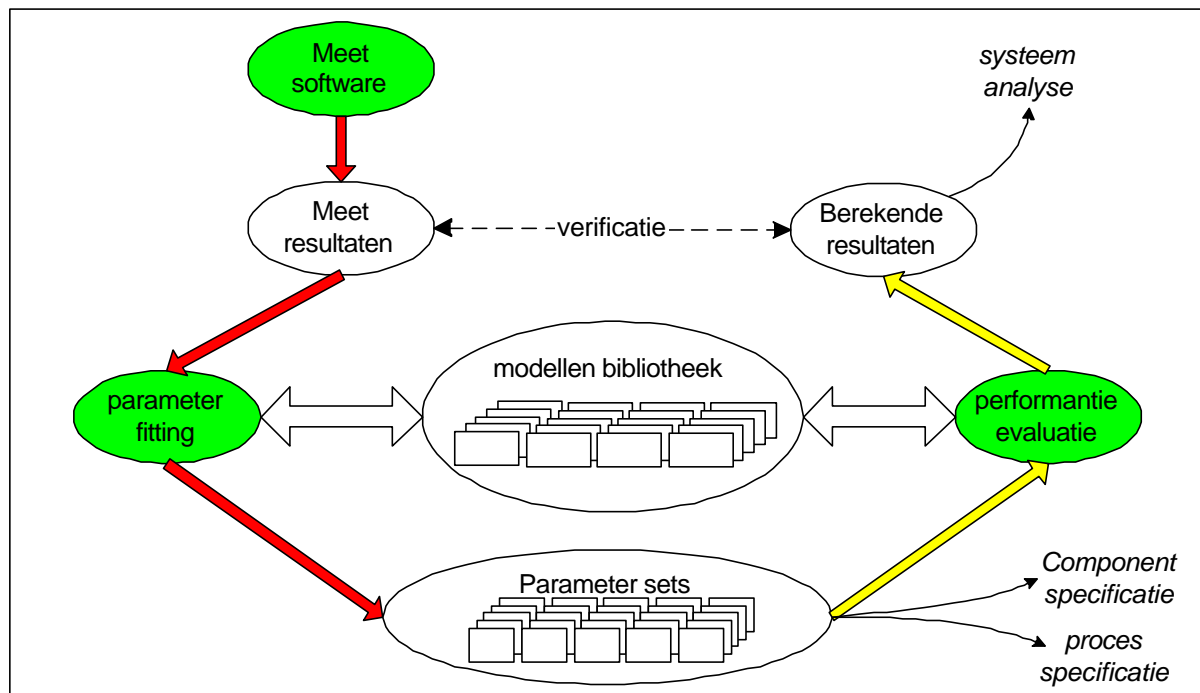
2.3 Karakterisering van componenten

2.3.1 Karakterisering gebaseerd op parameterextractie

Elk karakteriseringsproces gaat uit van de metingen die op de component kunnen uitgevoerd worden. Dit levert meestal geen concrete parameters op maar een grote set resultaten, vaak onhandelbaar door zijn grootte. Ten einde deze hoeveelheid informatie om te zetten naar een handelbare proportie zijn er drie mogelijke methodes : datareductie door te fitten aan wiskundige modellen, datareductie door te fitten aan fysische modellen of datareductie door gebruik te maken van een combinatie van beide vorige methodes.

De eerste methode, het fitten aan de wiskundige modellen, is een zuivere vorm van datareductie : ze levert een kleinere hoeveelheid data op maar verandert niets aan bruikbaarheid of de interpretatie ervan; de parameters hebben geen echte betekenis met betrekking tot de component. Dergelijke methodes zijn dan ook niet echt bruikbaar voor de component-fabrikant of ontwerper, die vooral geïnteresseerd is in de fysische parameters en hun invloed op de eigenschappen van de component. Anderzijds levert deze methode wel een specificatie op die kan gebruikt worden bij verdere simulaties, bijvoorbeeld de simulatie van een telecommunicatieverbinding waarin de component gebruikt wordt.

De tweede methode, het fitten aan fysische modellen, levert ook datareductie op, maar nu ligt de klemtoon meer op de parameters (transformatie van informatie) dan wel de datareductie. Een goede kennis van de gerealiseerde parameters kan een inzicht geven in de werking van de component of anders geformuleerd : het kan de fabrikant vertellen waarom de component niet naar behoren werkt. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat deze methode enkel kan werken als de fysische modellen voldoende nauwkeurig gekend zijn.



Figuur 2-6 : Schema van een algemene karakteriseringsstrategie

Figuur 2-6 toont een schematisch overzicht van een dergelijke karakteriseringsstrategie : door gebruik te maken van meetsoftware kan men voor een component een aantal meetresultaten bekomen. Vervolgens worden deze meetresultaten aan de hand van een aantal modellen (al dan niet fysische modellen) omgezet in een set parameters (linkerkant van de figuur). Deze parameters kunnen dan gebruikt worden door de fabrikant van de component om enerzijds het fabricageproces te karakteriseren en anderzijds kunnen de parameters gebruikt worden om de component zelf te specificeren. Eenmaal de parameterset gekend is, kan deze gebruikt worden om aan de hand van de eerder gebruikte modellen een karakteristiek te berekenen, die dan gebruikt kan worden als basis om systemen te simuleren en analyseren.

Diezelfde resultaten kunnen ook gebruikt worden om een verificatie van de bekomen parameterset uit te voeren. De ultieme test voor een parameterset bestaat erin om aan de hand van een parameterset een nog niet gemeten karakteristiek te berekenen en die te verifiëren met een meting op de component. Indien dit mogelijk is, kan in vol vertrouwen besloten worden dat die parameterset de component op een consistente manier beschrijft.

2.3.2 De meerwaarde van fysische parameters t.o.v. wiskundige parameters

2.3.2.1 Voor de fabrikant van de component

De meerwaarde van fysische parameters voor de fabrikant is evident : de design-parameters die gebruikt werden bij het ontwerp van de component zijn immers fysische parameters. Als het mogelijk is om de fysische parameters van de gerealiseerde component te bepalen en te vergelijken met de vooropgestelde parameters, kan dit waardevolle informatie leveren over het productieproces. Dit alles veronderstelt natuurlijk dat de modellen en de parameterextractie voldoende nauwkeurig zijn.

2.3.2.2 Voor de gebruiker van de component

Zoals reeds aangegeven wordt parameterextractie gebruikt om een datareductie te introduceren. Deze is vooral nodig als het om complexe componenten gaat die men typisch enkel in een beperkt aantal instelpunten wil gebruiken. Een voorbeeld hiervan zijn de afstembare laserdiodes met groot bereik, die typisch op alle golflengten van het WDM systeem ingesteld moeten worden. Alle gemeten punten bewaren en vanuit die tabel de stromen bepalen om de verschillende secties aan te sturen is omwille van de hoeveelheid resultaten geen aantrekkelijke zaak in een productieproces. Bovendien heeft deze aanpak een tweede nadeel : als de component een tijdje in bedrijf is en hierdoor te maken krijgt met ouderdomsverschijnselen die zijn karakteristieken doen veranderen (bijvoorbeeld de geëmitteerde golflengte), moeten alle meetpunten opnieuw gekarakteriseerd worden. Gezien de hoeveelheid meetpunten is dit geen sinecure en zal de component een lange tijd uit bedrijf zijn. Dit betekent dat de uitbater van het netwerk waarin de component gebruikt wordt ofwel de component tijdelijk moet vervangen door een andere, of dat hij zal moeten leven met een lange downtijd van de connectie. Geen van beide opties is aantrekkelijk voor de systeemuitbater. Zelfs indien de component vervangen wordt door een reservecomponent, blijft de lange karakteriseringscyclus een dure aangelegenheid.

Als daarentegen de kennis van de eigenschappen gebaseerd is op fysische parameters, kunnen de instellingen berekend worden aan de hand van het bijhorend model, of via een tabel bepaald worden zoals het geval van zuivere datareductie. Het is dan aan de systeem-

constructeur om de kostprijs van computertijd af te wegen tegen de kostprijs van opslaggeheugen. Maar in het geval van de veroudering verandert de situatie: een aantal fysische parameters zijn namelijk minder of zelfs niet onderhevig aan veroudering. Zo zal bijvoorbeeld de roosterperiode van een geïntegreerd diffractierooster niet veranderen tijdens de levensduur van de component. Het moet met andere woorden mogelijk zijn om i.p.v. een volledige herkalibrering een kortere meetcyclus uit te voeren, die enkel de parameters bepaald die aan veroudering onderhevig zijn. Op die manier kan de totale tijd nodig voor de herkalibrering en met andere woorden ook de totale downtijd van de optische link gereduceerd worden.

2.4 Meten op opto-elektronische componenten

2.4.1 Directe metingen en indirecte metingen

Net zoals bij alle componenten zijn er bij opto-elektronische componenten verschillende metingen mogelijk. In dit hoofdstuk worden enkel de algemene aspecten van meten en parameterextractie behandeld aan de hand van enkele voorbeelden. De concrete situatie voor een aantal laserdiodes, wordt behandeld in hoofdstuk 4 en hoofdstuk 5.

De metingen kunnen ingedeeld worden volgens complexiteit en volgens informatie-inhoud en het is evident dat vooral metingen die tegelijk eenvoudig uit te voeren zijn en een hoge informatie-inhoud hebben de favorieten zullen zijn bij een volledige karakterisering.

Met de huidig beschikbare meetinstrumenten, zijn een groot aantal van de mogelijke metingen onder te brengen in de categorie “eenvoudig”. Niet zozeer omdat de eigenlijke meting triviaal is, maar vooral omdat de constructeurs van de meetinstrumenten ervoor gezorgd hebben dat een complexe meting gereduceerd wordt tot het “drukken op een paar knoppen” (zoals een optisch spectrum of een relatieve intensiteitsruismeting). Het is dan ook verantwoord om te zeggen dat momenteel vooral de metingen waarbij een signaal in de caviteit van de opto-elektronische component moet gekoppeld worden tot de complexere soort behoren. Dit geldt zowel voor het inkoppelen van een lichtbundel als voor het toevoeren van een hoogfrequent modulatiesignaal.

De informatie-inhoud van de eigenlijke metingen varieert sterk en dus ook de mogelijk te extraheren parameters. Zo is de drempelstroom op zich een eenvoudig te extraheren parameter (een lineaire fit op een vermogen versus stroomkarakteristiek), maar is het verband tussen de drempelstroom en de fysische parameters van de lasers niet evident. Om die reden zal de drempelstroom dan ook nooit gebruikt worden voor verdere extractie van fysische parameters maar bijvoorbeeld wel als controle voor een parameterset.

Andere metingen zoals het relatieve intensiteitsruisspectrum (RIN) en het spontane emissie-spectrum (ASE) zijn dan weer metingen die (door de beschikbare apparatuur) eenvoudig uitvoerbaar zijn, een hoge informatie-inhoud hebben en bovendien zich uitstekend lenen tot extractie van fysische parameters. De extractiemethodes die hier gebruikt worden zijn weliswaar complexer maar blijven mits enige condities mogelijk. In het geval van de RIN meting is het spectrum een niet lineaire functie van de fysische parameters die echter wel kan herleid worden tot een lineair stelsel. In het geval van het spontane emissie-spectrum wordt de extractie uitgevoerd door het fitten van een analytische uitdrukking (niet lineair) met een groot aantal parameters (typisch een tiental of meer) aan de eigenlijke meetresultaten.

2.4.2 *Intelligente manieren om te meten*

Wanneer het om opto-elektronische componenten met meerdere secties gaat, loopt het aantal metingen hoog op, zeker wanneer er sprake is van een volledige karakterisering. Dit is echter niet altijd nodig noch wenselijk in een industriële context. Indien er geen rekening gehouden wordt met de problematiek van herkalibrering bij veroudering, kan het veel interessanter zijn om enkel de “interessante” meetpunten op te meten. Zo zijn in het geval van lasers voor optische communicatielinks enkel de meetpunten met een voldoende spectrale zuiverheid van belang. Het is m.a.w. mogelijk een grote tijdswinst te realiseren door eerst aan de hand van eenvoudige en snelle metingen de relevante punten te bepalen en pas achteraf de volledige karakterisering uit te voeren in die meetpunten.

In het geval van een DBR laser kan men aan de hand van een vermogenmeting als functie van de actieve- en Braggstroom de ligging van de mode-hops te weten komen. De theorie zegt vervolgens dat interessante punten voor telecommunicatietoepassingen, waar de zijmode-onderdrukingsratio (“*side-mode-suppression-ratio*” of “SMSR”) maximaal is, in het midden tussen twee “modale grenslijnen” (“*mode boundaries*”) liggen. Het volstaat bijgevolg om de instelstromen voor die punten uit te rekenen en dan een meer volledige karakterisering (de nauwkeurige golflengtes, de lijnbreedte en de eigenlijke SMSR) uit te voeren in dat beperkt aantal meetpunten.

2.4.3 *Combinatie van metingen als gulden middenweg*

Naast het intelligent bepalen van de te meten punten, kan er bij parameterextractie gebruik gemaakt worden van metingcombinaties i.p.v. de parameterextractie te steunen op een enkele meting. Zoals aangegeven wordt in sectie 2.5 is het uiteindelijke resultaat van een fitalgoritme en de nodige tijd om het optimum te bereiken onder andere een functie van de kwaliteit van de startwaarden van de te optimaliseren parameters. Daarom is het dan ook van het grootste belang om die startwaarden met de nodige zorg te kiezen, hetgeen kan gebeuren door gebruik te maken van resultaten uit andere metingen. Immers, zelfs als die resultaten slechts met een grote onzekerheid gekend zijn, zijn ze hoogstwaarschijnlijk nog altijd beter dan een willekeurige gok voor de waarde van de parameter.

2.4.4 *Combinatie van componenten als extra mogelijkheid*

Om een vollediger beeld te krijgen van een proces, kan men gebruik maken van een aantal varianten van een opto-elektronische component. Het is immers zo dat bepaalde fysische eigenschappen behoren tot deelaspecten van de opto-elektronische component. De optische versterking en de optische verliezen van een actieve laag zijn een voorbeeld van dergelijke parameters. Als de componentvarianten uit eenzelfde plak en dus met een identieke actieve laag gefabriceerd zijn, kan men de eenvoudigste component (voorbeeld een Fabry-Perot laserdiode) gebruiken om de eigenschappen van die actieve laag te bepalen en vervolgens die parameters als gegevens in te voeren bij de parameterextractie op de meer geavanceerde componenten (voorbeeld een DFB laser).

2.5 Parameterextractie bij opto-elektronische componenten

2.5.1 Parameterextractie of fitten is een proces met valkuilen

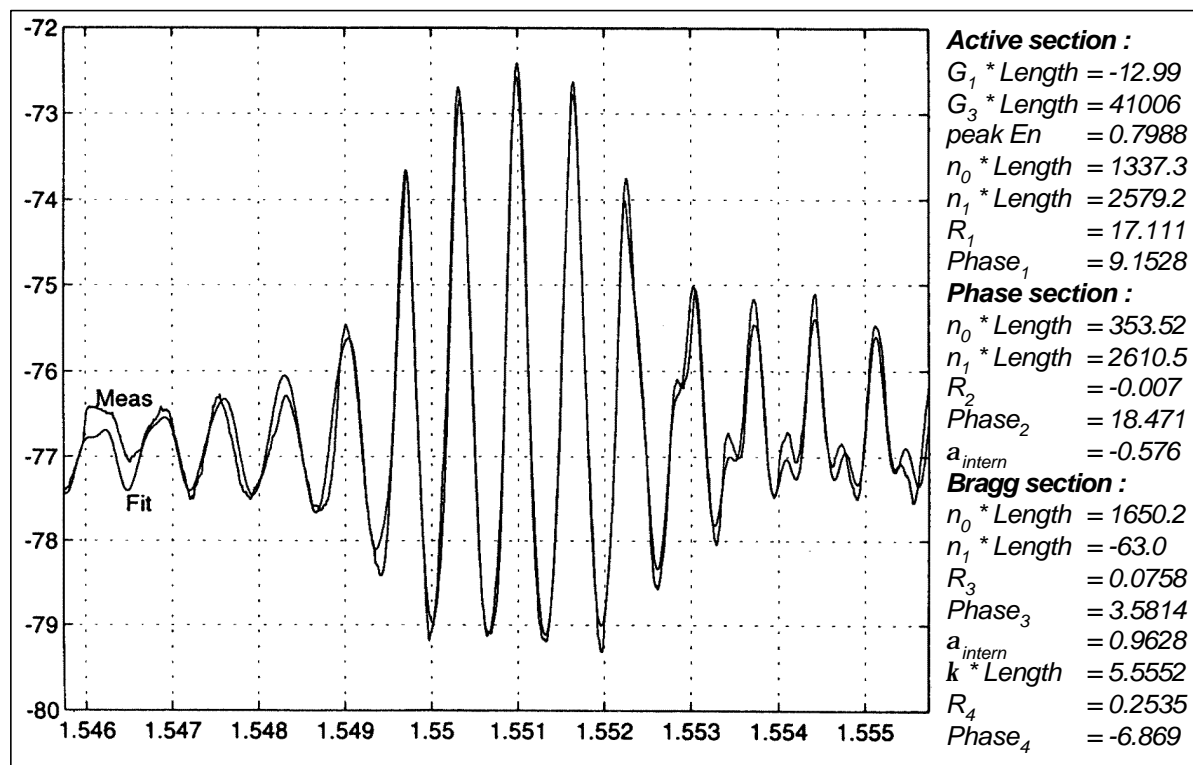
Het proces van parameterextractie of m.a.w. het fitten van modellen aan meetresultaten aan de hand van optimaliseringsprogramma's is een algemeen probleem, dat reeds geruime tijd in verschillende disciplines gebruikt wordt. In de literatuur wordt voor parameterextractie meestal de methode op basis van de kleinste kwadraten [2.9] gebruikt. Alle algoritmes baseren zich op een iteratieve methode (meestal gebaseerd op een gradiëntmethode) om de parameters te bepalen, waarvoor een foutuitdrukking (kostenfunctie) minimaal is.

Het eigenlijke fitten lijkt een eenvoudige zaak, het is "enkel" de combinatie van een gepast wiskundig model, het opgeven van een aantal startparameters en het opstarten van het algoritme. De realiteit is echter minder rooskleurig: naast het eigenlijke algoritme is ook de keuze van de startparameters bepalend voor de efficiëntie van het gehele proces en er is geen enkele garantie dat de gevonden oplossing "de" oplossing voor het probleem is.

Optimaliseringsproblemen in een meerdimensionale ruimte hebben immers meestal vele lokale optima en de meeste optimaliseringsmethodes zijn eigenlijk lokale optimaliseringsmethodes en zullen dan ook in een of ander lokaal optimum blijven steken. Meer geavanceerde methodes met name de globale optimaliseringsmethodes hebben meer kans om het globale optimum te bereiken maar ze hebben daarvoor typisch meer tijd nodig dan de strikte gradiëntmethodes. Deze globale methodes laten bijvoorbeeld onder bepaalde condities een verslechtering van de tussentijdse oplossing toe [2.10], werken met een set van tussentijdse oplossingen [2.11] of ze proberen het optimum te omsluiten met een simplex, een N-dimensioneel volume [2.12].

Daarbij komt ook nog dat een optimum, of het nu een lokale versie dan wel een globaal optimum is, niet per definitie overeenkomt met de beoogde fysische oplossing voor het probleem. Het is met andere woorden best mogelijk een goede fit te bekomen, terwijl die duidelijk niet overeenkomt met een realistische fysische oplossing. Dit is te wijten aan het feit dat niet de parameters geoptimaliseerd worden maar wel de wiskundige uitdrukking van de kostenfunctie die een verband probeert te leggen tussen de parameters, het model, de meting en het verschil tussen beide. Hierdoor kunnen de afwijkingen van het wiskundig model t.o.v. de realiteit door het optimaliseringsalgoritme herkend worden als "optima" en kan bijgevolg de oplossing die richting uitgestuurd worden.

Figuur 2-7 geeft hiervan een voorbeeld. Na een optimalisering van een model voor een DBR laser leverde het optimaliseringsprogramma een ogenschijnlijk perfecte fit af. Inspectie van de gevonden parameterwaarden, meer bepaald de waarde 17 voor de reflectiecoëfficiënt van het uitkoppelfacet (zesde parameter van boven), geeft duidelijk aan dat de gevonden oplossing niet van fysische oorsprong is. Een dergelijk grote reflectiecoëfficiënt is niet mogelijk (normaal kleiner dan één) en zou alleen fysisch kunnen geïnterpreteerd worden in de situatie dat er licht in de laser gekoppeld wordt (er moet immers meer vermogen van het facet naar de laser komen dan er oorspronkelijk van de laser naar het facet gaat). Dit was bij deze meting niet het geval hetgeen de conclusie dat het om een wiskundige maar niet fysische oplossing gaat als de enige mogelijkheid overlaat.

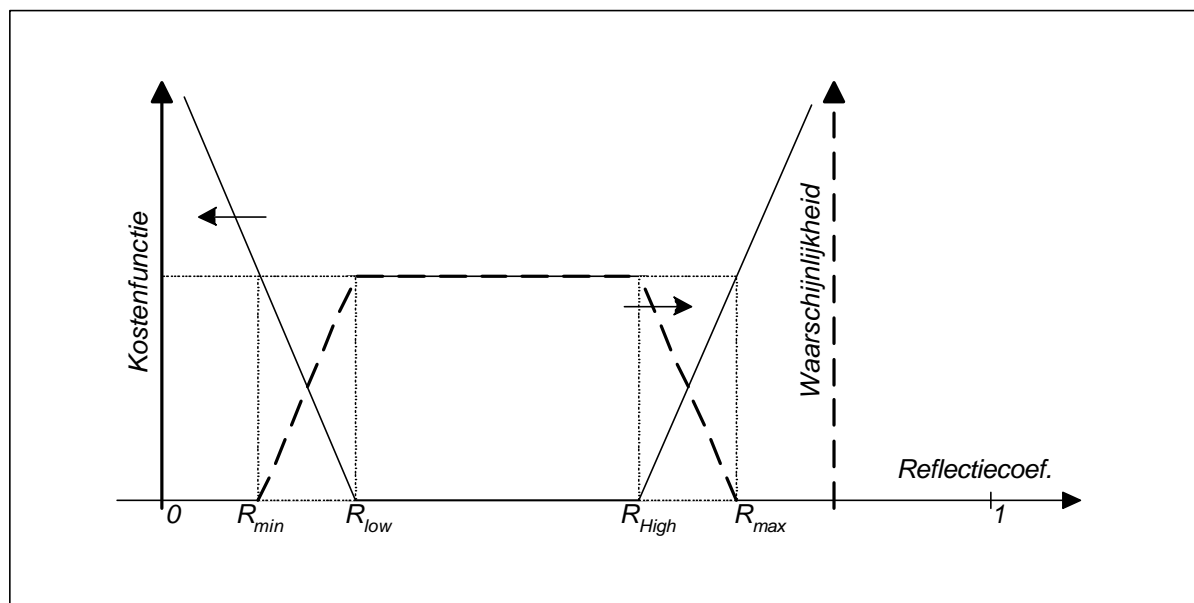


Figuur 2-7: Gemeten en gefit spontaan spontane emissiespectrum (intensiteit [dBm] versus golflengte [μm]), met parameterwaarden voor het gebruikte model

2.5.2 Fysische parameters bevatten extra informatie

Om de valkuilen zoals die van Figuur 2-7 te vermijden, moeten we aanpassingen aanbrengen aan het optimaliseringsalgoritme. Gezien het gaat om fysische parameters, die enkel binnen beperkte grenzen kunnen bestaan (voorbeeld de reflectiecoëfficiënt moet tussen 0 en 1 liggen) kan er gebruik gemaakt worden van optimaliseringsmethodes die werken binnen bepaalde grenzen van de parameters en die elke oplossing buiten die grenzen buiten beschouwing laten. Niettegenstaande het feit dat deze methode werkt, gebruikt ze niet alle aanwezige informatie. In het geval van de reflectiecoëfficiënt, is er veel meer geweten van de eigenlijke waarde dan dat ze tussen nul en een ligt. Het is immers een fysische overgang tussen halfgeleider en lucht, al dan niet voorzien van een coating. De fabrikant kan met andere woorden mits een bepaalde onzekerheid, een aanduiding geven van de werkelijke waarde van de reflectiecoëfficiënt en het zou dan ook niet efficiënt zijn die informatie niet te gebruiken.

Ten einde een algemeen mechanisme te voorzien om dergelijke a priori informatie toe te voegen aan het optimaliseringsalgoritme, zonder telkens een nieuw algoritme te moeten ontwikkelen, kan de kostenfunctie uitgebreid worden. In plaats van enkel de som van de kwadraten van de fouten, komen er nu ook termen bij die een waarschijnlijkheid van de waarde van een parameter omzetten in een waarde voor de kost. Figuur 2-8 geeft een voorbeeld hoe een gekende waarschijnlijkheid zou kunnen omgezet worden in een waarde voor de kostenfunctie. Andere manieren, gebaseerd op Gaussiaanse uitdrukkingen of andere waarschijnlijkheidsverdelingen zijn uiteraard mogelijk.



Figuur 2-8 : Een voorbeeld van een kostenterm gebaseerd op a priori kennis.

2.6 Gevolgen en doelstellingen voor de meetomgeving

2.6.1 Automatisering en degelijk software-ontwerp is noodzakelijk

Aan de hand van het beeld van metingen op opto-elektronische componenten gegeven in de secties 2.4.1 tot 2.4.4, blijkt duidelijk dat er nood is aan geavanceerde meettoepassingen. Zowel door de hoeveelheid, de complexiteit en de combinaties van de verschillende metingen dringt een automatisering zich op.

Reeds bij het ontwerpen van die meestsoftware moeten er wel een aantal aspecten in het oog gehouden worden : het loont namelijk niet om zomaar wat meetsoftware te schrijven. Om de resultaten van verschillende metingen op een eenvoudige manier te kunnen combineren, moeten de verschillende componenten van de meetsoftware met zorg ontworpen worden, zodat ze op een gestructureerde manier kunnen samenwerken. Bovendien moet de meetsoftware ook zodanig geconcipieerd worden dat zij zo min mogelijk afhankelijk is van de gebruikte instrumenten. Indien hier niet voor gezorgd wordt van bij het begin, zal het eindresultaat weliswaar een grote hoeveelheid werkende software zijn, maar moeten grote stukken ervan aangepast of zelfs herschreven worden telkens een toestel vervangen wordt door een gelijkaardig toestel van een andere fabrikant.

Zoals aangegeven in sectie 2.4.2, is het meten op opto-elektronische componenten met meerdere secties vaak een kwestie van het herhalen van een bepaalde meting in functie van een gevarieerde instelling (voorbeeld meten van de drempelstroom van een DBR als functie van de Braggstroom). Ook hierop moet de meetsoftware van bij het begin aangepast zijn, zodat een bepaalde meting niet meerdere keren moet geïmplementeerd worden telkens de meting als functie van een andere parameter moet uitgevoerd worden. Elke meettoepassing (voorbeeld de drempelstroommeting) moet met andere woorden zowel op zichzelf (stand-alone) kunnen gebruikt worden of als insteekmodule (plug-in) bij een andere toepassing (voorbeeld variatie van enkele stromen).

Uit de bespreking van het parameterextractieproces (sectie 2.5) blijkt ook duidelijk dat de softwarecomponenten die gebruikt zullen worden voor die taak met de nodige zorg ontworpen moeten worden. Het is immers niet aanvaardbaar om voor elke combinatie van model, algoritme en kostenfunctie een nieuw programma te moeten ontwikkelen. Idealiter zou een omgeving moeten ontworpen worden waar het mogelijk is om de ene component onafhankelijk van de andere te veranderen. Zo moet het mogelijk zijn om een extra term toe te voegen aan de kostenfunctie zonder dat er iets aan het algoritme, laat staan het model, moet veranderen. Eigenlijk zou het software ontwerp nog een stap verder moeten gaan: het toevoegen of een verandering van een component (voorbeeld een model) moet kunnen gebeuren zonder dat de gebruiker-programmeur een totaalbeeld moet hebben van alle implementatiedetails.

2.6.2 Eisenpakket voor een flexibele omgeving

Ten einde de vooropgestelde doelen voor karakterisering en parameterextractie te bereiken en de flexibiliteit nodig in een onderzoekssituatie te behouden, is er nood aan hetvolgende :

Een strategie om laserdiodes te karakteriseren, m.a.w. een leidraad die vertelt hoe een volledige karakterisering uitgevoerd kan worden.

Een mechanische opstelling die op een eenvoudige en flexibele manier toelaat om verschillende en variërende metingen uit te voeren op diverse laserdiodes in alle mogelijke verpakkingen.

Een degelijke software-omgeving en softwarestrategie die toestaat om meettoepassingen te ontwerpen die gestructureerd kunnen samenwerken en voorzien zijn van de nodige grafische gebruikersinterface (GUI).

Een algemene strategie om instrument driver software te ontwerpen die toestaat om meettoepassingen te implementeren die onafhankelijk zijn van de gebruikte toestellen.

Een algemene strategie voor parameterextractie software die toestaat om modellen, kostenfuncties en optimaliseringsalgoritmes te combineren op een eenvoudige en flexibele manier; idealiter op een grafische manier.

De laserdiodekarakteriseringsstrategie wordt algemeen behandeld in hoofdstuk 4 en meer specifiek in hoofdstuk 5, waar het eigen werk meer wordt toegelicht. De daaruit volgende specifieke eisen en de implementatie van de meetopstelling komen aan bod in hoofdstuk 6.

De software aspecten voor de toepassingen, de instrument drivers en de parameterextractie worden eerst theoretisch uiteengezet in hoofdstuk 3 en later in hoofdstuk 7 worden de toepassingen zelf en een aantal van de implementatieaspecten behandeld. Uiteindelijk worden al deze aspecten toegepast in een paar praktische gevallen in hoofdstuk 8.

2.7 Besluit

Dit hoofdstuk gaf een korte inleiding op de werking van halfgeleiderlaserdiodes en de recente tendensen, aan de hand van enkele meetresultaten. Vervolgens werden de principes van componentkarakterisering uiteengezet en specifiek toegepast op de opto-electronische componenten. Speciale aandacht ging hierbij naar de parameterextractie toegepast op halfgeleiderlaserdiodes aan de hand van een optimaliseringsproces.

Er werden een aantal mogelijke probleemsituaties als gevolg van de wiskundige procedures geschetst. Als oplossing werd voorgesteld om deze wiskundige doch niet fysische oplossingen te vermijden door extra termen toe te voegen aan de gebruikte kostenfunctie.

Tenslotte werden de belangrijkste eisen voor een multifunctionele meet- en parameterextractie-omgeving geformuleerd.

-
- [2.1] Shuji Nakamura, Takashi Mukai, Masayuki Senoh, "Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double- heterostructure blue-light-emitting diodes.", *Applied Physics Letters* 64, pp. 1687, 1994.
 - [2.2] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto, H. Kiyoku, "Room Temperature CW Operation of InGaN MQW Structure Laser Diodes." *Applied Physics Letters* 69, pp. 4056, 1996.
 - [2.3] Y. Tohmori, Y. Yoshikuni, H. Ishii, F. Kano, T. Tamamura, Y. Kondo, and M. Yamamoto, "Broad-range wavelength-tunable superstructure grating (SSG) DBR lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1817-1823, 1993
 - [2.4] V. Jayaraman, Z.M. Chuang, and L.A. Coldren, "Theory, design and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1824-1834, 1993
 - [2.5] M. Öberg, S. Nilsson, K. Streubel, L. Bäckbom, and T. Klinga, "74 nm wavelength tuning range of an InGaAsP/InP vertical grating assisted codirectional coupler laser with rear sampled grating reflector," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 7, pp. 735-738, 1993
 - [2.6] Y. Tohmori, Y. Yoshikuni, H. Ishii, F. Kano, T. Tamamura, and Y. Kondo, "Over 100 nm wavelength tuning in superstructure grating (SSG) DBR lasers" *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 4, pp. 352-354, 1993
 - [2.7] P.-J. Rigole, S. Nilsson, L. Bäckbom, T. Klinga, J. Wallin, B. Stålnacke, E. Berglind, and B. Stoltz, "Access to 20 evenly distributed wavelengths over 100 nm using a single current tuning in a four-electrode monolithic semiconductor laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 11, pp. 1249-1251, 1995
 - [2.8] A.M. Gulisano, D.J. Robbins, P.J. Williams, P. Verhoeve, "Widely tunable sampled-grating DBR lasers to address 100 channels over 40 nm for WDM applications", *ECIO97*
 - [2.9] D. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters", *SIAM J. Appl. Math.*, Vol. 11, pp. 431-441, 1963.
 - [2.10] E. Aarts, J. Korst, "Simulated annealing and Boltzmann machines", John Wiley & Sons, 1989
 - [2.11] D. E. Goldberg, "Genetic algorithms in search, optimisation and machine learning", Addison-Wesley, 1989
 - [2.12] J.A. Nelder, R. Mead, *Computer Journal*, Vol. 7, pp. 308-313, 1965

HOOFDSTUK 3

De software-opbouw, abstracte benadering

3.1 Inleiding

Traditioneel denkt men bij het woord meettoepassing aan een stuk software dat een aantal toestellen aanstuurt, de data opvraagt en die vervolgens verwerkt vooraleer ze in een bestand te bewaren. In de context van dit proefschrift moet het woord meettoepassing ruimer worden geïnterpreteerd : een toepassing die gegevens inleest vanuit een file of een database en er vervolgens een zekere parameterextractie op toepast, moet ook gezien worden als een meettoepassing, ook al is er geen directe meethardware aanwezig.

Alvorens dieper in te gaan op beide vormen van meettoepassingen (met hardware en zuivere extractie), loont het de moeite om de algemene kenmerken van een meettoepassing in zijn abstracte vorm te bekijken. Immers, als we een framework voor ogen hebben waarvan alle componenten naadloos moeten kunnen samenwerken, moet er eerst een algemene strategie voor de componenten gedefinieerd worden.

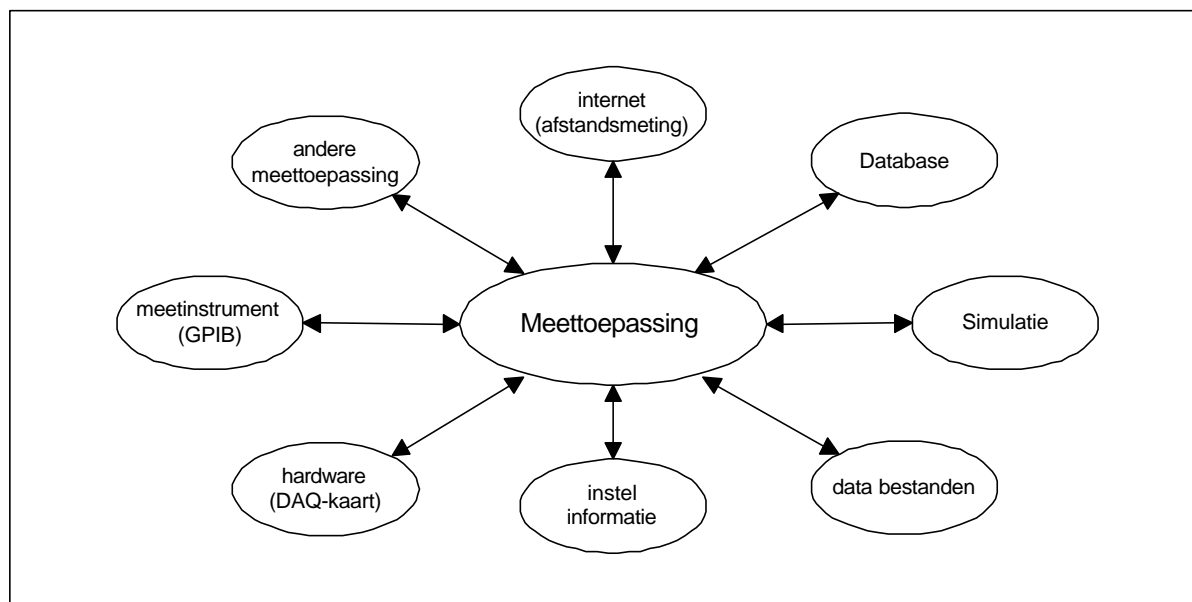
In dit hoofdstuk worden eerst de softwarestructuren voor klassieke meettoepassingen behandeld met nadruk op de communicatieaspecten ervan zowel met instrumenten (sectie 3.4) als met andere toepassingen (sectie 3.3). Daarna wordt parameterextractie bekeken en wordt een algemene objectstructuur voor parameterextractiesoftware opgebouwd (sectie 3.6).

3.2 Algemene meetsoftware

Een algemene meettoepassing kan beschouwd worden als een “object” (met een eigen gedrag, toestand en structuur) dat met zijn omgeving interageert of communiceert. Naast het evidente communiceren met hardware of het raadplegen van data (al dan niet op afstand), is het ook de bedoeling dat een meettoepassing kan communiceren met een andere meettoepassing. Zo zou het zonder meer een verkwisting zijn als een geavanceerde meting (bijvoorbeeld lijnbreedte van een laserdiode) meerdere malen geïmplementeerd moet worden omdat die meting als functie van verschillende parametercombinaties moet uitgevoerd worden. Het kan bijvoorbeeld nodig zijn om de lijnbreedte van een laserdiode te meten als functie van één of meerdere instelstromen van de laserdiode. Dit kan uitgevoerd worden door een bepaald gebied te scannen of door enkele stroominstellingen te specificeren. Als de beide toepassingen (het scannen of het specifiek punt instellen) kunnen communiceren met de lijnbreedtemeting, hoeft deze laatste slechts één keer geïmplementeerd te worden. Dit in tegenstelling tot de gangbare

praktijken om elke toepassing (“de lijnbreedtemeting”, “het scannen met lijnbreedtemeting” en “lijnbreedtemeting bij enkele stoominstellingen”) afzonderlijk te implementeren.

Elke meettoepassing moet met andere woorden op zichzelf gebruikt kunnen worden (*stand alone*) en tegelijkertijd kunnen dienst doen als insteekmodule in een andere applicatie (*plug-in*).



Figuur 3-1: Een aantal mogelijkheden om informatie uit te wisselen voor een meettoepassing

Figuur 3-1 geeft een overzicht van een aantal mogelijkheden voor informatie-uitwisseling. Centraal staat de meetopstelling en de pijltjes geven de informatie-uitwisseling aan. In tegenstelling tot de klassieke softwarevisie waarbij bestanden, internet en een database onder de gemeenschappelijke noemer persistentie geplaatst worden, maakt de huidige meetwereld nog steeds een onderscheid tussen deze mogelijkheden. Voor de duidelijkheid zijn deze dan ook afzonderlijk op de figuur vermeld. Op drie na werden de mogelijkheden uit Figuur 3-1 in het kader van dit proefschrift onderzocht en gerealiseerd, enkel de opties DAQ-hardware, simulatie en database werden buiten beschouwing gelaten.

In dit werk werden de mogelijkheden uit Figuur 3-1 geclassificeerd in twee categorieën: communicatie met meetinstrumenten (GPIB, DAQ, ...) en communicatie met andere applicaties (meetapplicaties, simulaties, internet en database). Het opslaan van data in een bestand op een harde schijf, kan in de tweede categorie ondergebracht worden, een bestand kan immers gezien worden als een heel rudimentaire database.

Communicatie met meetinstrumenten is hardware afhankelijk en kan dus niet zomaar geabstraheerd worden. Toch bestaat er enige standaard in de eigenlijke communicatie met meetinstrumenten zoals de GPIB-bus, het RS232-protocol en de RS485-bus. Voor de meetsoftware bestaat dergelijke communicatie traditioneel uit het aanroepen van een aantal functies die dan de gepaste commando's over de hardware versturen. De implementatie van het protocol zelf is in hardware uitgevoerd en een zaak van de constructeur van de GPIB-kaart.

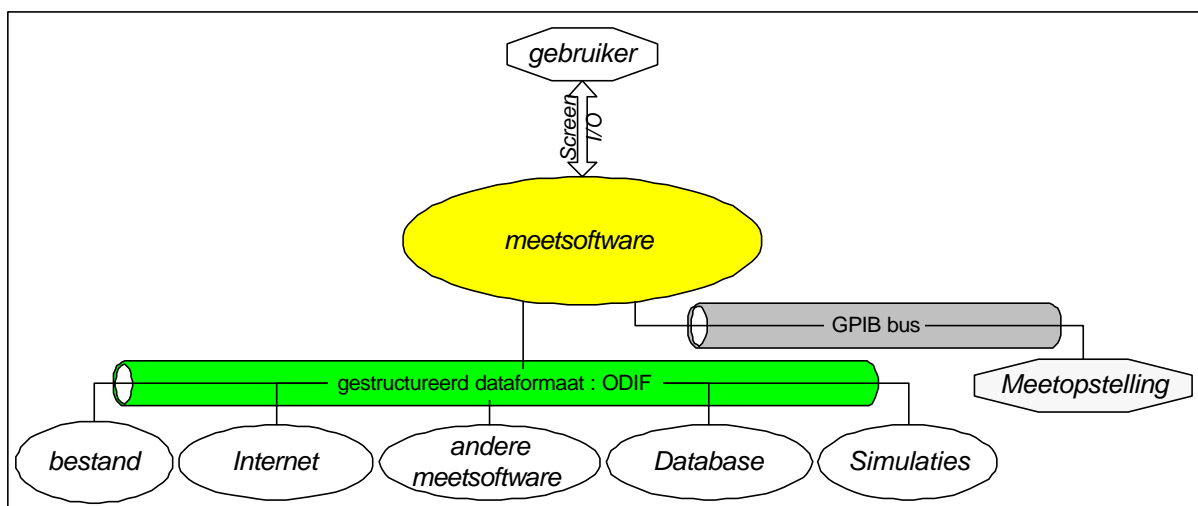
Binnen het kader van dit proefschrift, nemen we aan dat de GPIB-bus de enige vorm van instrumentcommunicatie is. Dit is mogelijk omdat binnen de high-tech meetwereld de GPIB-bus de meestgebruikte standaard is en omdat de principes die ontwikkeld worden voor

de GPIB-bus zonder meer uitbreidbaar zijn naar andere communicatieprotocollen. Anderzijds zijn er de laatste jaren een aantal initiatieven van constructeurs (onder impuls van National Instruments) die een overkoepelende protocol interface implementeren. Bij gebruik van deze nieuwe interface, met name “VISA” (“*Virtual Instrument Software Architecture*”), heeft de gebruiker enkel beschikking over uniforme zend- en ontvangstroutines voor de commando’s, en wordt het eigenlijke protocol (GPIB, serieel, VXI, ...) vastgelegd bij het openen van de communicatie.

Alhoewel de eigenlijke communicatie niet kan geabstraheerd worden doordat deze vastligt in de geleverde hardware, loont het toch de moeite om een abstractie op het niveau van de instrumenten te voorzien, zoals uitgelegd wordt in sectie 3.4 op pagina 47.

Communicatie tussen verschillende applicaties en het bewaren van de resultaten en instelgegevens is grotendeels een zaak van de software en leent zich duidelijk tot abstractie. Door het specificeren van een eenvormig interobjectcommunicatiemechanisme en bijhorende softwarestructuren kan het softwareframework gewapend worden tegen een onbekende toekomst en kan de totale software-effort gereduceerd worden doordat elke applicatie enkel een interface naar het gemeenschappelijke mechanisme moet voorzien i.p.v. een interface naar alle relevante applicaties. Het gemeenschappelijk mechanisme voor interapplicatiecommunicatie vervult dan dezelfde taak als de GPIB-bus voor de hardwarecommunicatie. Figuur 3-2 geeft een principieel overzicht van een dergelijke situatie: voor de eindgebruiker verandert er ogenschijnlijk niets, ongeacht het feit of hij een meting wil realiseren op een lokale opstelling, een opstelling op afstand of met behulp van een simulatiepakket.

Deze interapplicatiecommunicatie werd gerealiseerd door een eenvormige informatie-structuur te ontwikkelen dat aan alle eisen voldeed. Deze structuur kreeg de naam ODIF (“*Opto-electronic Data Interchange Format*”) en werd initieel getest in het Europese project COST240.



Figuur 3-2: Het principe van een eenvormige communicatiestructuur

3.3 *Communicatie tussen applicaties*

3.3.1 *Algemeen werkingsprincipe*

Elke meettoepassing moet haar data (resultaten van metingen of berekeningen) kunnen bewaren en liefst ook opnieuw kunnen inlezen voor inspectie. Bovendien is het ook handig om de informatie omtrent de instellingen en de (meet-)condities te bewaren en in te lezen. Zo worden niet alleen de condities (bijvoorbeeld de instellingen van meettoestellen, omgevingstemperatuur of stapgrootte voor numerieke modellen) bewaard voor later, maar kunnen ze later opnieuw gebruikt worden om de metingen of berekeningen opnieuw uit te voeren onder identieke condities.

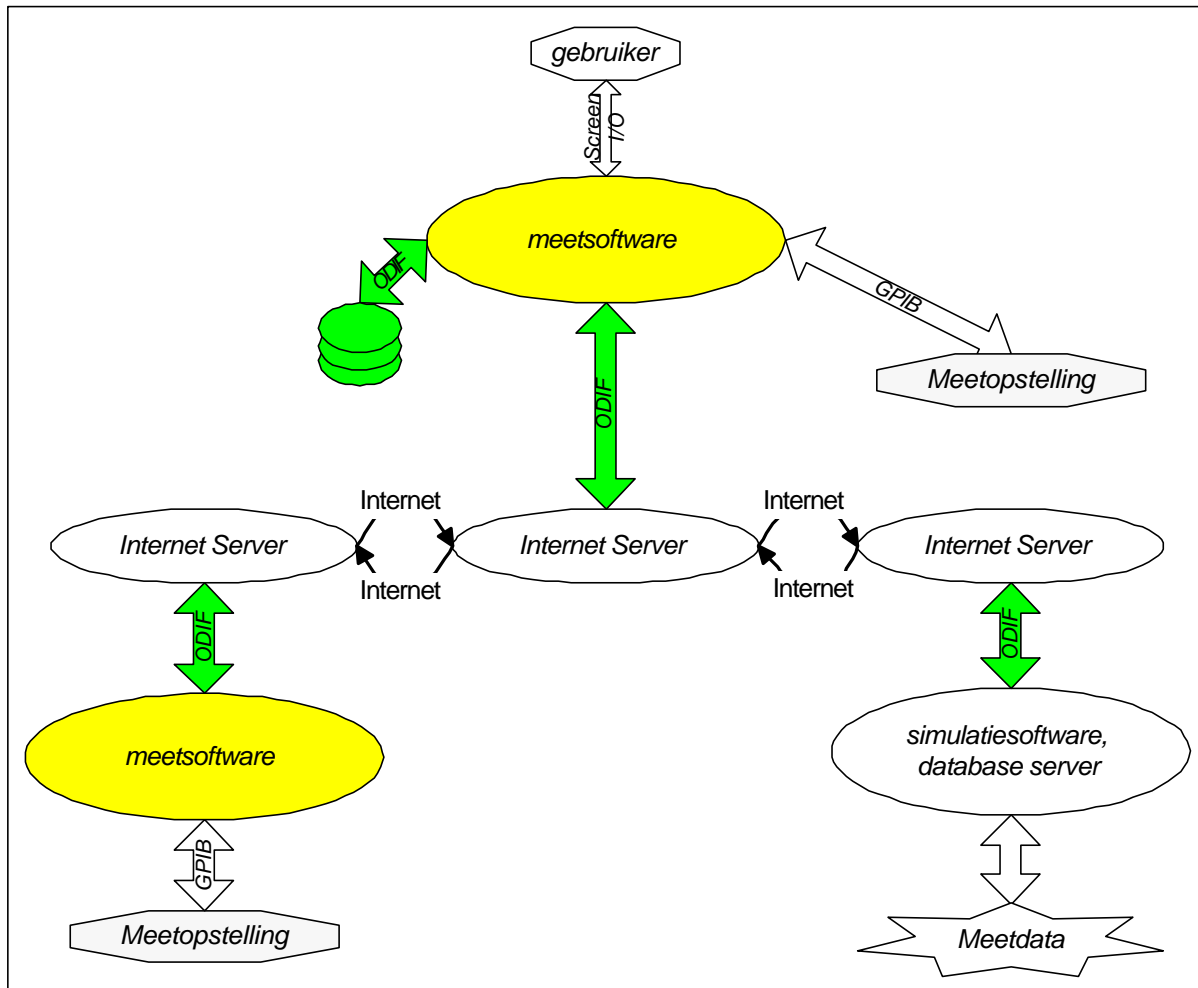
Meestal worden de instelgegevens en de resultaten afzonderlijk bewaard gezien het om twee verschillende soorten informatie gaat. Hierdoor gaat vaak de link tussen de bestanden met instelgegevens en de bestanden met resultaten verloren hetgeen, het uiteindelijke praktisch nut van het bewaren van de instelgegevens sterk beperkt.

Als er een structuur gedefinieerd wordt die toestaat om die twee ogenschijnlijk verschillende dingen op een hiërarchisch gestructureerde manier op te slaan, wordt de link tussen de resultaten en de instelgegevens bijna onverbreekbaar en winnen deze laatste duidelijk aan praktisch nut. Bovendien lost deze benadering tegelijkertijd het probleem van inter-applicatiecommunicatie op. Het “gebruiken” van een andere applicatie kan altijd herleid worden tot het uitwisselen van instellingsinformatie en resultaten. Als twee applicaties deze dingen op een algemene en gestructureerde manier kunnen uitwisselen is er een communicatiemechanisme gedefinieerd.

Dit mechanisme kan ook gebruikt worden om metingen op afstand te realiseren. De *client*-meetapplicatie stuurt een “aanvraag” naar een internet server, die ze doorgeeft aan een identieke *server*-meetapplicatie die vervolgens de meting uitvoert en de gegevens terugstuurt via dezelfde weg. (cf. onder links op Figuur 3-3). In het kader van dit proefschrift werden op deze manier metingen gerealiseerd waarbij een gebruiker in Brussel metingen uitvoerde via het internet op een laserdiode die zich op de meetopstelling in Gent bevond.

Zelfs de stap verder namelijk het realiseren van “virtuele metingen” kan via dit mechanisme uitgevoerd worden; de gebruiker stuurt een aanvraag en krijgt een resultaat als antwoord. Voor virtuele metingen worden de resultaten echter niet bekomen door een in realiteit uitgevoerde meting, maar door gebruik te maken van een simulatiepakket al dan niet gekoppeld aan een database voor een meer realistische respons. (cf. onder rechts op Figuur 3-3)

Bovendien beperkt dit mechanisme sterk het aantal verschillende applicaties : een meettoepassing kan zowel dienst doen als client en als server, de internetcommunicatiekern is gemeenschappelijk voor alle meetapplicaties. Dit resulteert in het feit dat niet $5N$ applicaties (stand-alone, internet-/databaseclient en internet-/databaseserver) moeten ontwikkeld worden om N metingen te realiseren, maar slechts $N+2$ (de metingen en de internet-/databasekern).



Figuur 3-3: De communicatiestructuur van meettoepassingen

3.3.2 ODIF, een hiërarchische informatiestructuur

In deze sectie worden het principe en de formele beschrijving van de in het kader van dit proefschrift ontwikkelde hiërarchische informatiestructuur behandeld. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van alle niveaus en een verzameling van uitgebreide voorbeelden, wordt er verwezen naar de ODIF-internet site [3.1] en het eindrapport van het Europese project COST240 [3.2], waar in appendix A een gedetailleerd overzicht gegeven wordt. Ter verduidelijking is deze appendix overgenomen als appendix A van dit proefschrift.

3.3.2.1 Het principe van een formele syntaxbeschrijving

Het formuleren van een algemene structuur om de diverse applicaties met elkaar te laten praten en tegelijk garanties te bieden voor de toekomst kan enkel door het geheel formeel te gaan beschrijven. Op die manier kan er immers theoretisch een ondubbelzinnige structuur opgezet worden zonder dat er software-overwegingen aan te pas komen. Deze laatste zouden de realisatie van de tegelijk strikte en flexibele structuur in het gedrang brengen.

Net zoals de syntaxbeschrijving van een programmeertaal een stramen biedt dat specificeert hoe programma's moeten genoteerd worden, biedt de formele beschrijving een structuur waarbinnen de diverse gegevens kunnen georganiseerd worden. De syntax beschrijft

echter niet de data in het bestand noch de methode waarop ze binnen het geboden stramien passen, net zoals als de syntax van een programmeertaal niet specificeert welke programma's geïmplementeerd kunnen worden.

Net zoals er verschillende manieren bestaan om eenzelfde algoritme te implementeren in een programmeertaal, bestaan er ook verschillende manieren om identieke informatie binnen de formele syntaxbeschrijving te brengen. Dit is immers sterk afhankelijk van de manier waarop de gebruiker naar de informatie kijkt. Zo kan voor de ene gebruiker de omgevingstemperatuur een instelpunt zijn en voor de andere gebruiker een opgemeten waarde, of kan de ene gebruiker de letter "L" gebruiken om de lengte van een component aan te geven, waar de ander gebruiker het woord "length" verkiest.

Het omzetten van de algemene formele syntaxbeschrijving in concrete bestandsstructuren voor specifieke applicaties, moet voor elke toepassing afzonderlijk uitgewerkt worden. Hierbij dient wel opgepast te worden dat er over de verschillende toepassingen heen geen inconsistenties ontstaan (bijvoorbeeld de ene keer betekent "T" de temperatuur, de andere keer duidt het een tijdstip aan).

3.3.2.2 *De algemene structuur van ODIF*

De vooropgestelde syntax is in essentie een ASCII gebaseerde hiërarchische structuur om informatie te bewaren. De structuur van ODIF gaat ervan uit dat de informatie geklasseerd kan worden in blokken, die vervolgens in een hiërarchische structuur bewaard worden.

De informatie kan in twee grote categorieën opgesplitst worden: informatie over de component (de halfgeleiderlaser in kwestie) en informatie uit experimenten (metingen, modelleringsberekeningen of extractieresultaten). Binnen ODIF geeft de eerste categorie aanleiding tot het ontstaan van een "*parameter blok*" en de tweede categorie levert respectievelijk een "*meetblok*", "*modelblok*", en "*extractieblok*" op.

De parametercategorie bevat rechtstreeks de data op een gestructureerde manier, onder de vorm van lijnen met getallen of onder de vorm van tabellen. De blokken van de tweede categorie (meet, model en extractie) bevatten naast de eigenlijke resultaten ook informatie omtrent instellingen. De resultaten zelf komen net zoals bij de parametercategorie voor onder de vorm van lijnen of tabellen.

De gelijkaardige interne structuur van de diverse blokken heeft als resultaat dat de uiteindelijke syntax relatief eenvoudig is (weinig regels bevat) maar toch voldoende krachtig is om voorzien te zijn op toekomstige uitbreidingen. Een recent voorbeeld hiervan is het gebruik van ODIF om lagenstructuur van lasercaviteiten te beschrijven.

3.3.2.3 *Inleiding op de formele notatie*

Voor de formele notatie wordt gebruik gemaakt van een metataal, die het formaat beschrijft in een top down benadering. Deze methode (oorspronkelijk voorgesteld door Wirth [3.3]) beschrijft de syntax op een abstracte manier door gebruik te maken van "non-terminal" symbolen, m.a.w. symbolen die niet verschijnen in het uiteindelijke bestand. Deze symbolen worden vervolgens in verschillende stappen geëxpandeerd totdat het "terminal" niveau bereikt wordt, met name de specificatie van de eigenlijke symbolen die in het bestand verschijnen. (cf. Appendix A)

Om de gelijkenis tussen de verschillende blokken duidelijk tot uiting te laten komen en om de syntaxnotatie compact te houden, worden hier de non-terminal of abstracte symbolen voorzien van een formele parameter die als index genoteerd wordt. Om het onderscheid tussen

de symbolen en de formele parameter heel duidelijk te maken, wordt deze bovendien in *cursieve* druk genoteerd.

De formele notatie maakt gebruik van volgende regels :

- non-terminal (abstracte) symbolen worden vetjes afgedrukt (bijvoorbeeld **file**)
- terminal symbolen worden tussen aanhalingstekens genoteerd (bijvoorbeeld “begin”)
- opeenvolging van symbolen wordt genoteerd door juxtapositie
- indien de syntax een keuze toelaat worden de symbolen met een verticaal streepje gescheiden (bijvoorbeeld “a” | “b” wil zeggen dat “a” toegestaan is, “b” ook maar niet “ab”)
- een symbool dat omsloten wordt door de vierkante haakjes mag niet of één keer voorkomen (bijvoorbeeld [“a”] betekend dat zowel niets of “a” geldig zijn maar dat “aa” niet geldig is)
- iets wat omsloten wordt door accolades, mag niet of meerdere keren voorkomen (bijvoorbeeld {“a”} betekend dat niets, “a”, “aa”, “aaa”, “aaaa”, ... geldig zijn).
- conditionele uitdrukkingen worden genoteerd als volgt :

parameter	!	waarde 1	?	resultaat 1	;		
		!		waarde 2	?	resultaat 2	;
				resultaat in andere gevallen			

3.3.2.4 Formele syntaxbeschrijving van de hoogste niveaus

Alhoewel de eigenlijke syntaxbeschrijving afdaalt tot de laagste niveaus (zoals de specificatie van **Text**, **Table**, **Name**, ...), worden hier enkel de hogere niveaus beschreven. Hiermee worden de niveaus bedoeld die de eigenlijke hiërarchische structuur vormen waarover de informatie gespreid wordt.

Class = “File” | “Global” | “Parameter” | “Model” | “Measurement” | “Extraction” | “Setting” | “Data”

File = **Block** “File”

Block_{Class} = “@” *Class* “.” **Begin**_{class} *Name*_{class} **Newline**
Body_{Class}
 “@” *Class* “.” **End**_{class}

Body_{Class} =
Class !“File” ? { **Set**^{Global} } ;
 !“Data” ? { **Comment** } (**Table** | { **EntryLine** });
 !“Setting” ? { **SettingLine** | **SourceLine** | **Comment** } { **Set**_{Setting} } ;
Content_{Class} **Set**_{Class}

Set_{Class} = **Block**_{Class} | **Include**_{Class} | **Comment**

```

Contentclass =
  Class ! “Global” ? { Set·Parameter } { Set·Model | Set·Measurement | Set·Extraction };
  ! “Parameter” ? ( { SettingLine | SourceLine } | Set·Data );
  { Set·Setting } { Set·Data }

Beginclass = Class ! “File” ? “Title:” ;
  “Begin”

Endclass = Class ! “File” ? “End” ;
  “End” [Comment] Newline

Nameclass = Class ! “File” ?      Text ;
  ! “Data” ?      DataEnum RefName ;
  ! “Setting” ?   LabName RefName ;
  [RefName]

Comment = ( “/*” { Text | Newline } “*/” ) | “/” Text
DataEnum = “PI” | “RIN” | “OS” | “PARAM” | “CALC” | ...
RefName   = “<” Name “>”
LabName   = “[” Name “]”
SettingLine = EntryLine | HexBlock
SourceLine  = SourceKey <TAB> SourceType <TAB> SourceNames NewLine
EntryLine   = Name <TAB> (Number | Plain_Text) <TAB> Unit
               ([<TAB> CommentLine] | NewLine)

```

3.3.2.5 Analyse van de formele syntaxbeschrijving

Doordat de formele syntaxbeschrijving tegelijkertijd exact en compact is, is het niet evident om een beeld te vormen hoe deze beschrijving zich vertaalt in de praktijk. Alhoewel volledig uitgewerkte voorbeelden voorhanden zijn in de reeds eerder aangehaalde referenties (Appendix A, het eindrapport van COST240 en de ODIF internet website), loont het toch de moeite om hier de hoogste niveaus om te zetten in een praktijkvoorbeeld.

Voor de eenvoud van het voorbeeld wordt aangenomen dat er steeds slechts één blok van elk type aanwezig is i.p.v. meerdere opeenvolgende blokken zoals de syntax het toestaat. Als tweede vereenvoudiging wordt aangenomen dat enkel rechtstreekse blokken gebruikt worden. Het begrip “Set” (zie de **Set**_{class}-regel) werd ingevoerd om de syntaxbeschrijving krachtiger te maken door de mogelijkheid tot het gebruik van “includes” te voorzien. Op die manier is het, zoals bij de meeste programmeertalen, mogelijk om te verwijzen naar informatie in andere bestanden zonder ze te moeten dupliceren.

Het ODIF bestand begint op het hoogste niveau als **File**, gespecificeerd als :

File = **Block** “File”

Met andere woorden een bestand bestaat uit een blok, dat gedefinieerd wordt via de “**Block**_{Class}” definitie, met “File” als waarde voor de formele parameter *Class*. Dit levert bij het invullen van de formele parameter het volgende op :

```
BlockFile = “@” “File” “.” BeginFile NameFile Newline
           BodyFile
           “@” “File” “.” EndFile
```

De definities voor **Begin**_{Class}, **Name**_{Class}, **End**_{Class} en **Body**_{Class} zijn afhankelijk van de formele parameter en moeten voor het geval *Class* = “File” geïnterpreteerd worden. De gebruikte regels zijn aangegeven met een grijze achtergrond :

```
Beginclass = Class ! “File” ? “Title:” ;
           “Begin”
```

```
Nameclass = Class ! “File” ?      Text ;
           ! “Data” ?      DataEnum RefName ;
           ! “Setting” ?   LabName RefName ;
           [RefName]
```

```
Endclass = Class ! “File” ? “End” ;
           “End” [Comment] Newline
```

```
BodyClass =
  Class ! “File” ?   { SetGlobal } ;
  ! “Data” ?       { Comment } ( Table | { EntryLine } );
  ! “Setting” ?   { SettingLine | SourceLine | Comment } { SetSetting } ;
  ContentClass SetClass
```

De inhoud van het “File-Block” is volgens deze laatste definitie een opeenvolging van “Global-Sets” die, zoals vermeld, zich vertalen in een “Global-Block”. Figuur 3-4 toont aan hoe het bestand er op het hoogste niveau uitziet. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de syntaxregel de “naam” van een bestand omschrijft als “tekst”, alhoewel het impliciet de bedoeling is dat deze tekst de rol van titel vervult en bijgevolg een korte beschrijving geeft van de inhoud van het bestand. Deze laatste eis kan echter niet door een syntaxbeschrijving opgelegd worden.

```
@File.Title: dit is een voorbeeldje
  <hier komt de informatie in een "global Block">
@File.End
```

Figuur 3-4 : Het hoogste niveau van het voorbeeldbestand

De beschrijving van het “Global-Block” kan afgeleid worden uit dezelfde regels maar deze keer met “Global” als waarde van de formele parameter *Class*.

```
Beginclass = Class ! “File” ? “Title:” ;
    “Begin”
```

```
Nameclass = Class ! “File” ?      Text ;
    ! “Data” ?      DataEnum RefName ;
    ! “Setting” ?   LabName RefName ;
    [RefName]
```

```
Endclass = Class ! “File” ? “End” ;
    “End” [Comment] Newline
```

```
Bodyclass =
    Class ! “File” ?   { Set“Global” } ;
    ! “Data” ?   { Comment } ( Table | { EntryLine } ) ;
    ! “Setting” ? { SettingLine | SourceLine | Comment } { SetSetting } ;
    Contentclass Setclass
```

De inhoud van **Body**^{“Global”} wordt in dit geval gegeven door een nieuwe regel :

```
Contentclass =
    Class ! “Global” ? { Set“Parameter” } { Set“Model” | Set“Measurement” | Set“Extraction” } ;
    ! “Parameter” ? ( { SettingLine | SourceLine } | Set“Data” ) ;
    { Set“Setting” } { Set“Data” }
```

Met andere woorden een “Global-Block” bestaat uit een “Parameter-Block”, gevolgd door één of meerdere “Model-”, “Measurement-” of “Extraction-Blocks”. Voor de eenvoud en de duidelijkheid van het voorbeeld, wordt er verondersteld dat er enkel een “Model-Block” aanwezig is. Dit kan doordat een “Model-”, “Measurement-” en een “Extraction-Block” een identieke interne structuur hebben, hetgeen kan worden afgeleid uit het feit dat er geen specifieke regel bestaat voor een “Model-”, “Measurement-” of een “Extraction-Block” in de definitie van een **Block**_{class} noch in de definitie van **Content**_{class}. De blokken worden met andere woorden gedefinieerd door de verzuim-regel (*default*-regel) die identiek is voor de drie blokken. Figuur 3-5 toont de inhoud van het voorbeeldbestand, na interpretatie van de regels die de begin- en eindlijnen van het “Parameter-Block” en het “Model-Block” definiëren.

```

@File.Title: dit is een voorbeeldje
  @global.Begin
    @Parameter.Begin
      <parameter inhoud>
    @Parameter.End

    @Model.Begin
      <Model inhoud>
    @Model.End
  @Global.End
@File.End

```

Figuur 3-5 : De informatiestructuur van het voorbeeldbestand

De inhoud van een “Parameter-Block” wordt opnieuw gespecificeerd door dezelfde definitie, maar deze keer heeft de formele parameter *Class* de waarde “Parameter” :

```

ContentClass =
  Class !“Global” ? { Set“Parameter” } { Set“Model” | Set“Measurement” | Set“Extraction” };
  !“Parameter” ? ( { SettingLine | SourceLine } | Set“Data” );
  { Set“Setting” } { Set“Data” }

```

De inhoud van een “Parameter-Block” bestaat dus ofwel uit een aantal lijnen met informatie (**SettingLine** of **SourceLine**) ofwel uit een **Set**^{“Data”}. De eerste optie bevat informatie onder de vorm naam, waarde en eenheid (cfr. Appendix A voor meer details); de tweede optie wordt verder gedefinieerd via de **Set**_{Class}, de **Block**_{Class} en uiteindelijk de **Body**_{Class} definitie.

```

BodyClass =
  Class !“File” ? { Set“Global” };
  !“Data” ? { Comment } ( Table | { EntryLine } );
  !“Setting” ? { SettingLine | SourceLine | Comment } { SetSetting };
  ContentClass SetClass

```

Een “Data-Block” kan met andere woorden bestaan uit ofwel een tabel met gegevens ofwel uit een aantal lijnen met informatie. Voor de verdere formele definitie en interpretatie van die lagere niveaus wordt er opnieuw verwezen naar Appendix A.

De inhoud van het “Model-Block” wordt eveneens weergegeven aan de hand van achtereenvolgens de **Set**_{Class}, de **Block**_{Class}, de **Body**_{Class} en uiteindelijk **Content**_{Class} de definitie, waarbij de formele parameter *Class* de waarde “Model” heeft.

```

BodyClass = Class !“File” ? { Set“Global” };
                !“Data” ? { Comment } ( Table | { EntryLine } );
                !“Setting” ? { SettingLine | SourceLine | Comment };
                ContentClass SetClass

```

```

ContentClass =
  Class !“Global” ? { Set“Parameter” } { Set“Model” | Set“Measurement” | Set“Extraction” };
                !“Parameter” ? ( { SettingLine | SourceLine } | Set“Data” );
                { Set“Setting” } { Set“Data” }

```

Uit de regels blijkt dat elk “Model-”, “Measurement-” of “Extraction-Block” bestaat uit een aantal “Setting-Blocks”, gevolgd door een aantal “Data-Blocks”. Deze “Data-Blocks” hebben per definitie een identieke structuur als de “Data-Blocks” die binnen de “Parameter-Blocks” voorkomen en de “Setting-Blocks” worden opnieuw via de **Body**_{Class} gedefinieerd.

```

BodyClass = Class !“File” ? { Set“Global” };
                !“Data” ? { Comment } ( Table | { EntryLine } );
                !“Setting” ? { SettingLine | SourceLine | Comment };
                ContentClass SetClass

```

Het eindresultaat wordt getoond in Figuur 3-6.

```

@File.Title: dit is een voorbeeldje
  @global.Begin
    @Parameter.Begin
      Length    300    um
    @Parameter.End

    @Model.Begin
      @Setting.Begin [MyEx] <calc_set>
        MaxIter  1000    -
      @Setting.End
      @Data PI <Power_calc>
        I      P
        mA    mW
        0.0   0.0
        1.0   0.3
        2.0   1.5
      @Data.End
    @Model.End
  @Global.End
@File.End

```

Figuur 3-6 : Het eindresultaat van het voorbeeld ODIF bestand

3.4 *Communicatie tussen applicatie en instrumenten*

3.4.1 *De klassieke benadering : Instrumentdriver*

Elke meetapplicatie moet de meetdata verzamelen door te communiceren met het gebruikte meetinstrument dat verschillende vormen kan aannemen. Het meetinstrument kan bestaan uit in huis gemaakte hardware, het kan een aangekocht toestel zijn of zelfs een combinatie van een aantal toestellen. Ongeacht de verschijningsvorm van het gebruikte toestel, is de communicatie te herleiden tot een “aanvraag” vanwege de meettoepassing om een taak uit te voeren (een meting uitvoeren, het doorgeven van resultaten, ...) en een antwoord van het instrument.

De software die ervoor zorgt dat de commando's op een gepaste manier doorgegeven worden aan het toestel (via het juiste protocol) wordt een instrumentdriver genoemd. Meestal bevat een dergelijke driver een gedetailleerde kennis van het eigenlijke spel van vraag en antwoord voor het toestel in kwestie en bevat het algemene communicatiesoftware om gebruik te maken van standaard hardwarebussen (zoals GPIB) die de fysische communicatie verzorgen.

3.4.2 *Het principe van de functionele instrumentdriver*

Om een meettoepassing te beveiligen tegen de steeds veranderende markt van meettoestellen en ervoor te zorgen dat de vervanging of aanschaf van een nieuw toestel geen golf van veranderingen teweegbrengt in de reeds geïmplementeerde meettoepassingen, moet het concept van de instrumentdriver uitgebreid worden. De meetapplicatie zal niet langer rechtstreeks de instrumentdriver van de meetinstrumenten gebruiken, maar zal een abstracte instrumentdriver aanspreken (cf. Figuur 3-7). Deze abstracte instrumentdriver kan gezien worden als een “algemene instrumentdriver” voor een bepaald soort toestellen (voorbeeld optische spectrumanalysers, stroombronnen, ...); hij verzorgt met andere woorden de interface tussen meettoepassing en de verschillende instrumenten op een geabstraheerde manier. In plaats van “algemene instrumentdriver” zou er dus ook kunnen gesproken worden van een “instrumentdriver-interface” of een “interface-instrumentdriver”. Om echter de link met de meetwereld en de fysische toestellen duidelijker te maken, werd de term “functionele instrumentdriver” (FID) voorgesteld. Het andere alternatief: “algemene instrumentdriver” geeft de indruk dat het niet alleen de toestellen van een bepaalde soort (voorbeeld stroombronnen) groepeerd, maar dat het een groepering van “alle” toestellen zou zijn. De term “functionele instrumentdriver” daarentegen heeft als groot voordeel dat hij de link legt naar de functionaliteit van het meettoestel.

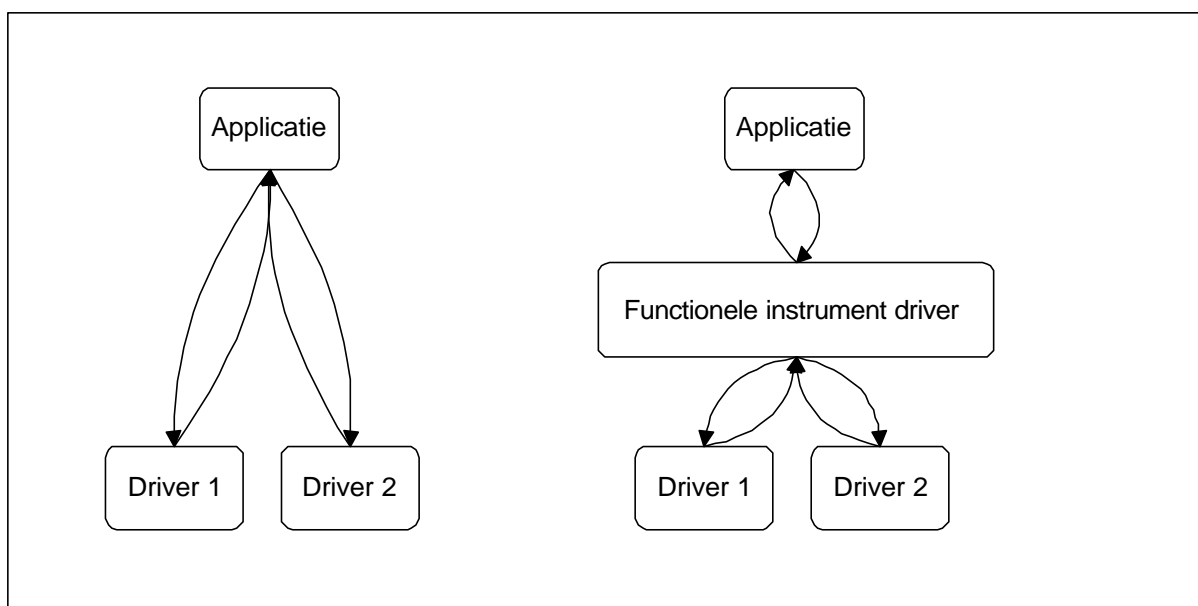
Door het invoeren van de functionele instrumentdriver koppelen we de implementatie van een meettoepassing volledig los van de implementatie van een instrumentdriver en bijgevolg ook los van de eigenlijke hardware die gebruikt wordt. Zo kan een meettoepassing een abstracte stroombron aanspreken en instellen op een bepaalde stroomwaarde waar in realiteit misschien een spanningsbron of misschien zelfs een data-aquisitiekaart gebruikt wordt, zonder dat de meettoepassing er zelfs van op de hoogte moet zijn.

Tegelijk met het loskoppelen wordt ook het effect gecreëerd dat een veranderend of extra toestel geen dubbel werk vereist. In het geval van de functionele instrumentdriver moeten

niet alle meettoepassingen aangepast worden, maar enkel de FID voor het soort toestel in kwestie.

Naast de abstractie van de functies en het bijhouden van de adresgegevens van elk toestel, kan het ook interessant zijn om de functionele instrumentdriver te gebruiken om extra intelligentie te voorzien. Als de functionele instrumentdriver bijhoudt welke instellingen gebeurd zijn in het verleden, kan hij besluiten overbodige instellingen niet uit te voeren en op die manier kostbare meettijd uitsparen. Zo kan de functionele stroombron bijvoorbeeld besluiten om het “stroom aan” commando niet uit te voeren als de stroom reeds aanstaat. Op die manier vangt de functionele driver een aantal inefficiënte implementaties op. Dergelijke intelligentie in instrumentdrivers, wordt ook wel “*state caching*” genoemd en commerciële firma’s zoals National Instruments zijn momenteel volop aan het onderzoeken of het mogelijk is om dergelijke structuren in te bouwen in hun commerciële pakketten.

De functionele instrumentdriver staat hierdoor aan minder ervaren programmeurs toe om toch toepassingen te genereren die onafhankelijk zijn van de meettoestellen en die reeds een zekere vorm van intelligentie bezitten. Vooral in een researchomgeving is dit een groot voordeel, daar zijn immers de meeste mensen occasionele programmeurs, die meestal enkel uit zijn op een werkende implementatie. Dit in tegenstelling tot de traditionele softwarewereld waar naast het aspect “werken” ook aandacht besteed wordt aan de efficiëntie, de onderhoudbaarheid en de herbruikbaarheid.



Figuur 3-7: Het principe van de functionele instrumentdriver

3.4.3 De functionele instrumentdriver : objectmodel

In een eerste benadering kan de functionele instrumentdriver gezien worden als een verzameling van functies die kunnen opgeroepen worden door de applicaties. De functionele driver zal dan die algemene functieoproepen/aanvragen omzetten in een functieoproep van een specifieke driver, die dan de eigenlijke GPIB communicatie met het instrument zal verzorgen.

De functionele driver is echter meer : als de abstractie van het instrument zo groot mogelijk moet zijn, mag de applicatie ook niet meer lastig gevallen worden met technische

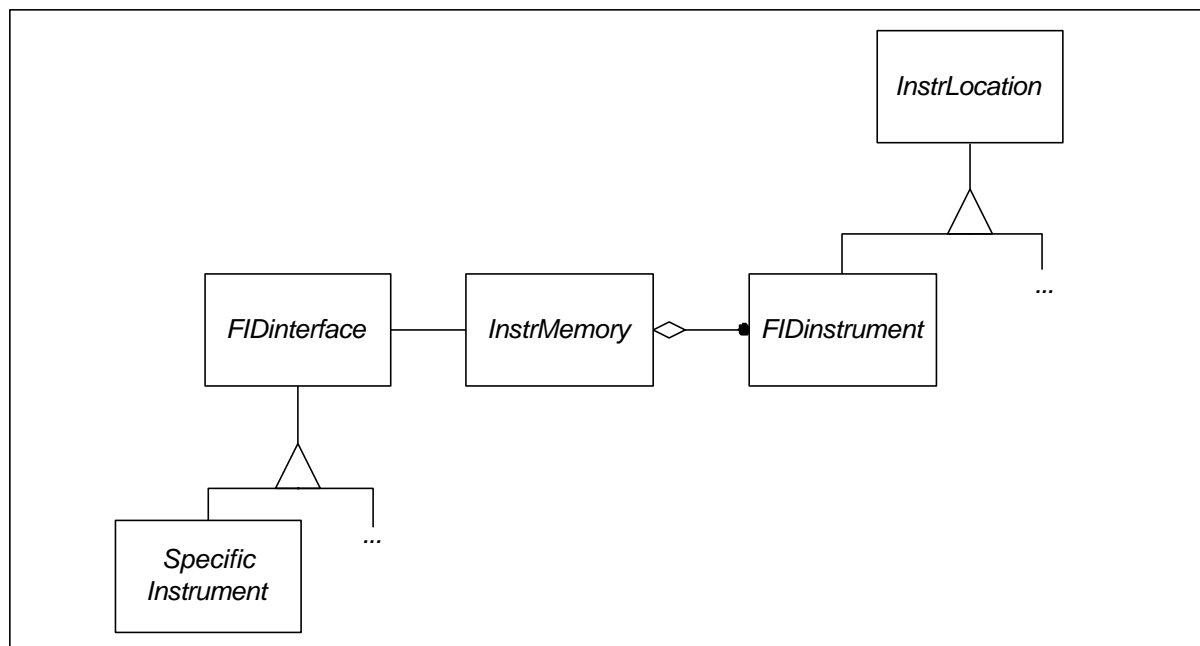
details zoals het GPIB adres of de coördinaten van een module in een modulair toestel. Het is aan de functionele driver om een vertaling te voorzien van de toestelreferentie die binnen de applicatie gebruikt wordt naar de nodige adresgegevens voor de specifieke driver. Bovendien is het ook de bedoeling dat er slechts één versie van de specifieke driver geïmplementeerd wordt, ook als er meerdere toestellen (op een ander GPIB-adres) van hetzelfde type geconfigureerd zijn.

Elk van deze opgesomde eigenschappen geeft aanleiding tot een object bij het samenstellen van het objectmodel voor de functionele instrumentdriver. De kern van het objectmodel is de *FIDinterface*-klasse die voor de functie-abstractie zorgt door een verzameling van eenduidige functies te voorzien. De specifieke implementaties voor elk type instrument, zijn dan afgeleide klassen : *Specific instrument*.

Om de GPIB-adressen en de coördinaten van een module te bewaren, wordt een algemene klasse *InstrLocation* voorzien. De *FIDinstrument*-klasse wordt daarvan afgeleid, als uitbreiding voor het soort toestel. Deze klasse zal dan extra attributen bevatten om de soortafhankelijke waarden van het toestel te bewaren, bijvoorbeeld timeout, delays,

Gezien de *FIDinterface*-klasse moet in staat zijn om meerdere toestellen tegelijkertijd te beheren, wordt de *FIDinstrument*-klasse niet rechtstreeks gebruikt. De *FIDinstrument*-klasse wordt omvat door een *InstrMemory*-klasse, die ervoor zal zorgen dat meerdere *FIDinstrument*-objecten kunnen gestockeerd worden in één *FIDinterface*-object.

Figuur 3-8 toont dit alles genoteerd volgens de methode van Rumbaugh [3.4], [3.5]. De implementatie van dit model wordt behandeld in hoofdstuk 7

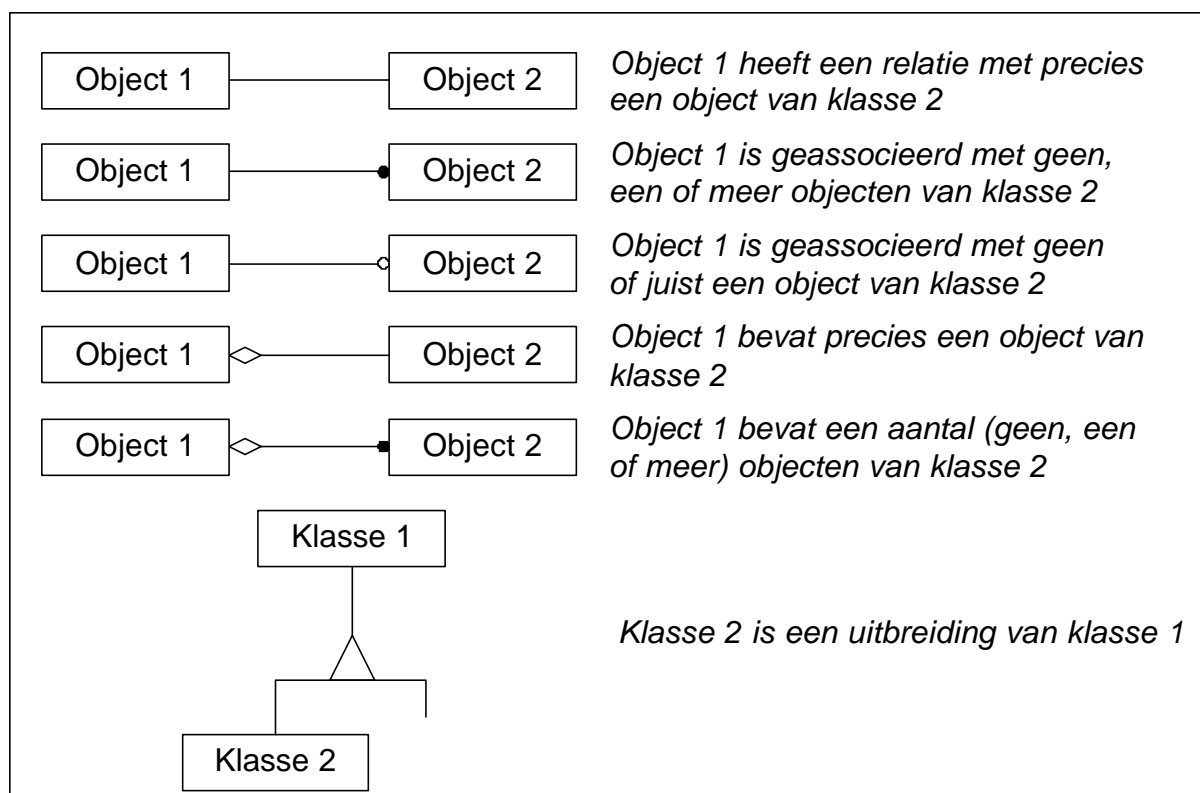


Figuur 3-8 : Het objectmodel van de functionele instrumentdriver

3.5 Korte introductie tot objectnotatie volgens Rumbaugh.

In dit proefschrift werd gekozen voor de methode van Rumbaugh als notatie voor de objectmodellen. Zonder volledigheid na te streven, wordt hier een kort overzicht gegeven van de verschillende syntaxelementen die nodig zijn om de objectmodellen die in het kader van dit proefschrift voorgesteld worden te noteren. Voor een volledige beschrijving wordt er verwezen naar het oorspronkelijke boek van Rumbaugh [3.4] of naar een meer recente publikatie van Martin en Odell, waar in hoofdstuk 25 een overzicht gegeven wordt van een aantal methodes [3.5].

De methode noteert de diverse objecten als rechthoeken, die onderling verbonden worden met lijnen om de verbanden tussen de objecten aan te geven. De uiteinden van die lijnen kunnen voorzien worden van verschillende symbolen om een bepaald aspect van de relatie voor te stellen. Bij de voorstelling van de modellen in het kader van dit proefschrift worden twee symbolen gebruikt : een “bolletje” en een “ruit”. Een overzicht van de gebruikte combinaties wordt gegeven in Figuur 3-9.



Figuur 3-9 : Gebruikte notaties voor objectmodellen

Een zwart bolletje geeft aan dat het om een “één of meer”-relatie gaat, een wit bolletje geeft aan dat het om een optionele relatie gaat (“nul of één”) en geen bolletje geeft aan dat het om een “precies één”-relatie gaat.

Het gebruik van een ruit geeft aan dat het niet enkel om een relatie gaat maar dat het ene object (waar het ruitje getekend is) het andere object bevat. Het ruitje kan vervolgens gecombineerd worden met het bolletje om aan te geven of het er “precies één”, “nul of één” dan

wel “één of meer” bevat. Een typisch voorbeeld hiervan is de kostenfunctie, die steeds één of meer kostentermen zal bevatten.

Als derde symbool om een verband tussen twee objecten uit te drukken wordt het “driehoekje” gebruikt. Dit geeft aan dat een bepaald object (onderaan het driehoekje verbonden) een uitbreiding is ten opzichte van een ander (verbonden met de punt van het driehoekje). Er wordt ook gezegd dat het object onderaan het driehoekje afgeleid werd van het object boven het driehoekje.

3.6 Een objectmodel voor parameterextractie

3.6.1 De klassieke functionele benadering van parameterextractie

In zijn meest rudimentaire vorm kan elke parameterextractiesituatie gezien worden als een samengaan van een mathematisch model (al dan niet analytisch), een hoeveelheid meetdata, een optimaliseringsalgoritme en een uitdrukking voor de fout tussen berekende en gemeten data. Het optimaliseringsalgoritme zal aan de hand van de parameters en het model een nieuw set parameters voorstellen en daarvan de fout evalueren aan de hand van de foutuitdrukking. Als die fout voldoende klein geworden is of als er reeds teveel stappen gezet zijn zal het algoritme stoppen. In het eerste geval is er convergentie naar een oplossing, in het tweede geval niet.

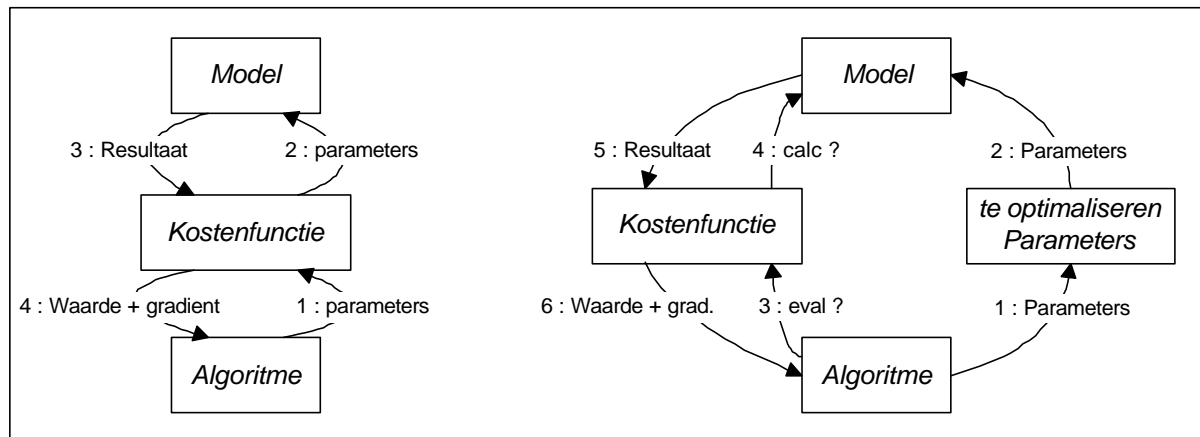
Traditioneel werkt het optimaliseringsalgoritme met de kostenfunctie (foutuitdrukking) en is het eigenlijke model ingebouwd in de uitdrukking voor de kostenfunctie. Een dergelijke benadering houdt ondermeer in dat er voor elke combinatie van model, algoritme en kostenfunctie een nieuw programma geschreven moet worden. Dit is niet bevorderlijk voor de evaluatie van diverse combinaties en zorgt ervoor dat elke gebruiker een expert ter zake moet zijn om veranderingen te kunnen aanbrengen.

3.6.2 Een eerste benadering van het objectmodel

De hoofdbedoeling van de objectbenadering voor het parameterextractieprobleem is om ervoor te zorgen dat een nieuwe combinatie of een ander model/optimaliseringsalgoritme geen verandering teweegbrengt in de rest van de applicatie. Verder moet het objectmodel er ook voor zorgen dat het mogelijk wordt om een verandering aan te brengen zonder dat er expertise nodig is over de hele applicatie en dat bij voorkeur een deel van de implementatietaken kunnen overgenomen worden door codegeneratoren. Het toevoegen van een nieuw lasermodel zou zich idealiter moeten beperken tot het specificeren van de eigenschappen ervan (naam en parameters) en het invullen van de eigenlijke berekeningscode in de automatisch gegenereerde code alvorens te compileren.

Om een objectmodel voor het parameterextractieprobleem te kunnen opstellen, moet eerst de intense verstrengeling van de drie componenten (model, kostenfunctie en optimaliseringsalgoritme) teniet gedaan worden. In de veronderstelling dat het optimaliseringsalgoritme, het lasermodel en de kostenfunctie afzonderlijke objecten vormen, verdwijnen in de objectbenadering de lasermodelparameters uit de kostenfunctie en worden ze attributen van het lasermodel, in tegenstelling tot de functionele benadering, waar ze een input zijn voor de kostenfunctie. Ze zijn met andere woorden eigendom van het lasermodelobject en de buitenwereld (lees het optimaliseringsalgoritme) heeft enkel toegang tot hun waarden via een

gespecificeerde interface. De te optimaliseren parameters echter behoren bij wijze van spreken zowel tot het optimaliseringsalgoritme als tot het model. Zoals te zien is in Figuur 3-10 verandert de manier waarop de kostenfunctie berekend wordt in de objectbenadering. In plaats van de waarden van parameters door te geven via de kostenfunctie en het resultaat terug te krijgen (links op de figuur), wordt in de objectbenadering de kostenfunctie in twee stappen uitgerekend (rechts op de figuur). Eerst worden de waarden van de te optimaliseren parameters doorgegeven aan het model en vervolgens wordt de kostenfunctie berekend, die daarvoor o.a. het model oproept. Merk op dat bij de interactie tussen lasermodel en kostenfunctie geen lasermodelparameters meer ter sprake komen.



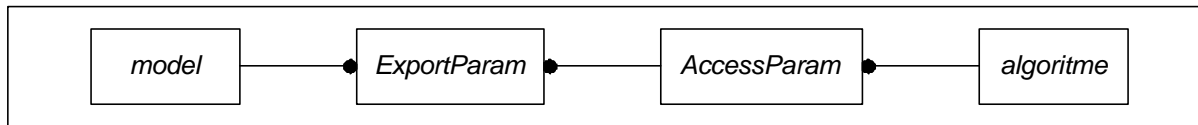
Figuur 3-10 : Traditionele visie op parameterextractie (links) en een objectbenadering ervan (rechts)

3.6.3 De relatie lasermodel - optimaliseringsalgoritme

De relatie tussen het lasermodel en het algoritme wordt gegeven door de parameters die aangepast kunnen worden tijdens het uitvoeren van het algoritme. De relatie vervult dus twee doelen : enerzijds geeft ze aan welke parameters gebruikt worden, anderzijds zorgt ze ervoor dat de waarden van de parameters in beide richtingen kunnen doorgegeven worden.

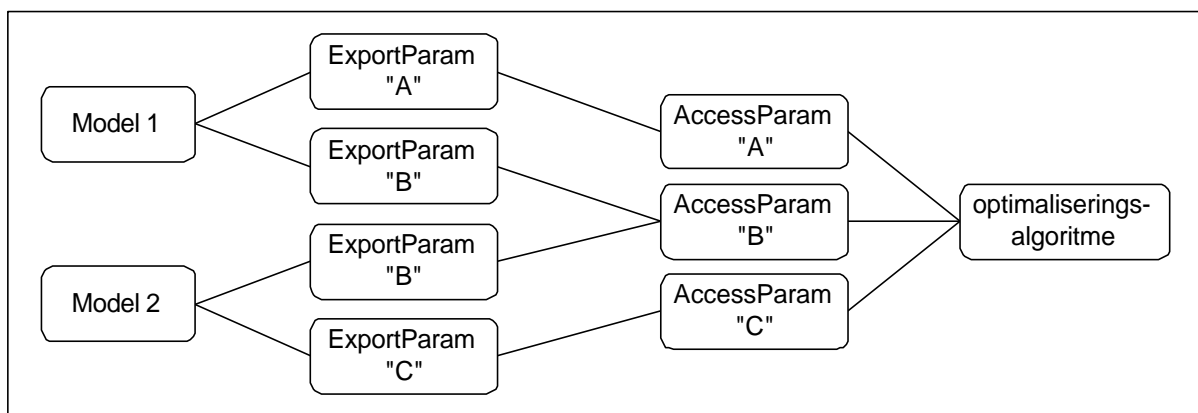
Het optimaliseringsalgoritme moet met andere woorden toegang krijgen tot de interne parameters van het lasermodel en tegelijkertijd moet het geheel zodanig ontworpen zijn dat het optimaliseringsalgoritme geen weet heeft van de interne structuur van het lasermodel. Het lasermodel moet zijn parameters ter beschikking kunnen stellen, zonder dat het weet heeft over de structuur van de gebruiker. Er moet bijgevolg een abstract mechanisme ontworpen worden om dit op te lossen.

De oplossing hiervoor ligt erin om twee klassen te definiëren, een eerste klasse om de waarde van de parameter te “exporteren” en een tweede klasse om toegang te krijgen tot de waarde van een parameter. Deze klassen werden respectievelijk “*ExportParam*” en “*AccessParam*” genoemd, hetgeen aanleiding geeft tot het model voorgesteld in Figuur 3-11. In de literatuur komt deze constructie overeen met een “impedance mismatch” probleem [3.6] dat typisch optreedt wanneer twee systemen een andere visie hebben op eenzelfde ding.



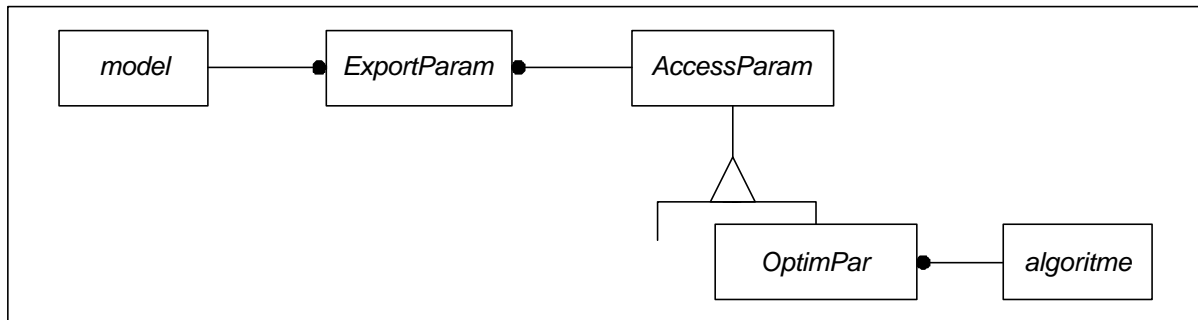
Figuur 3-11 : Modelling van de relatie tussen model en algoritme

Dit voorstel lost niet alleen de abstractie op, het staat ook toe om het multipliciteitsprobleem op te lossen, een probleem dat optreedt wanneer meerdere modellen tegelijkertijd moeten geoptimaliseerd worden. In dat geval kunnen de modellen gemeenschappelijke parameters hebben. Wanneer twee modellen een gemeenschappelijke parameter hebben (elk met hun eigen *ExportParam*-object), zal het optimaliseringsalgoritme slechts één te optimaliseren parameter hebben, die aanleiding geeft tot één *AccessParam*-object. Een voorbeeld van een dergelijke situatie wordt weergegeven in Figuur 3-12.



Figuur 3-12 : Implementatievoorbeeld van een meermodelsoptimaliseringssituatie

In de praktijk is deze oplossing echter niet voldoende. Wanneer optimaliseringsalgoritmes gebruikt worden, zal ernaar gestreefd worden om de te optimaliseren parameters ongeveer even groot te maken, om de numerieke stabiliteit van het optimaliseringsproces te bevorderen. Dergelijke schaalfactoren kunnen ingebouwd worden in de lasermodellen maar dit zou het lasermodel opnieuw afhankelijk maken van het gebruikte optimaliseringsalgoritme, hetgeen net niet de bedoeling was van het parameterextractieframework. Het is dan ook correcter om een dergelijke schaalfactor te modelleren aan de hand van de relatie lasermodel-optimaliseringsalgoritme : er wordt een nieuwe klasse gedefinieerd als uitbreiding op de *AccessParam*-klasse, die naast de toegangsfunctie ook de schaalfactor zal realiseren. Het eindresultaat van de modellering van de relatie lasermodel-optimaliseringsalgoritme is te zien in Figuur 3-13.

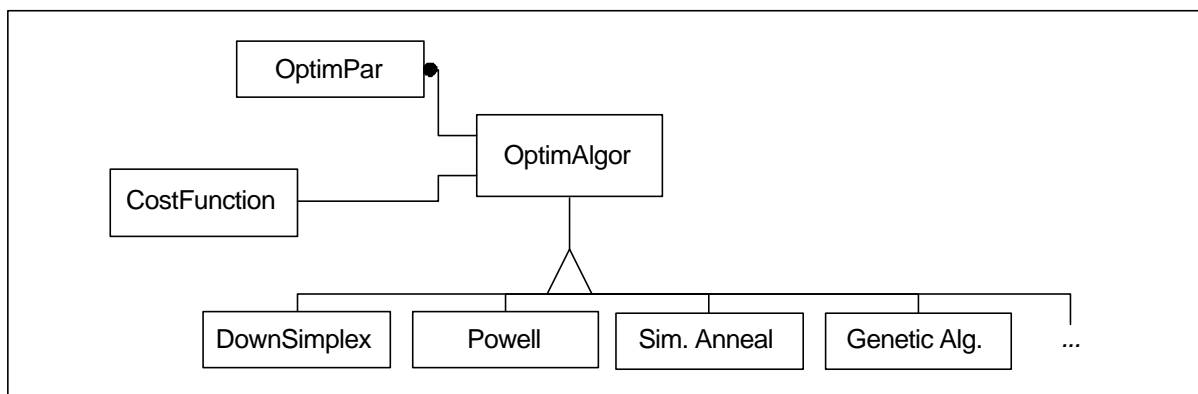


Figuur 3-13 : Eindresultaat van de objectmodellering van de relatie lasermode-
optimaliseringsalgoritme

3.6.4 Het optimaliseringsalgoritme

De verdere verfijning van het objectmodel voor het optimaliseringsalgoritme is nodig om de algemeenheid te garanderen. Net zoals bij de functionele driver, wordt er voor optimaliseringsalgoritmes een abstracte klasse voorzien dat de gemeenschappelijke kenmerken bevat van alle optimaliseringsalgoritmes, zoals daar zijn : maximum toegelaten aantal iteratiestappen, initialisering van het algoritme, uitvoering van de optimalisering en het bijhouden van de te optimaliseren parameters. De abstracte optimaliseringsalgoritme-klasse zal met andere woorden een uniforme interface bieden gecombineerd met een generieke functionaliteit, de eigenlijke implementaties die de berekeningen verzorgen tijdens de optimalisering zullen dan terecht komen in afgeleide objecten.

Naast de eigenlijke opbouw van de optimaliseringsalgoritme-objecten, maakt het objectmodel ook gebruik van de kostenfunctie en de te optimaliseren parameters. Om beide aspecten zo generiek mogelijk te implementeren, worden er voor beide aspecten afzonderlijke objecten voorzien, zoals te zien is op Figuur 3-14.



Figuur 3-14 : Het objectmodel voor optimaliseringsalgoritmes

3.6.5 Het lasermode

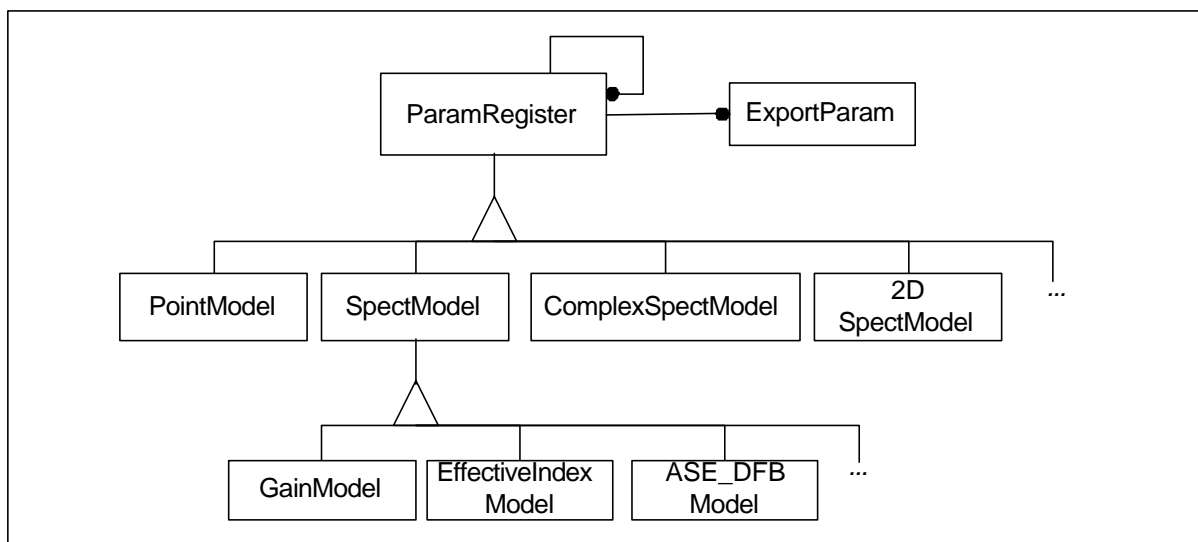
Net zoals bij de andere verfijningen, zal er ook bij de verfijning van het modelobjectmodel een abstracte klasse gebruikt worden om de gemeenschappelijke kenmerken van de diverse modellen te groeperen. Deze gemeenschappelijke kenmerken vallen echter

uiteen in twee fundamenteel verschillende stukken. Enerzijds hebben alle modellen als gemeenschappelijke eigenschap dat ze parameterattributen hebben, die elk moeten voorzien worden van een *exportparam*-object. Anderzijds kunnen de modellen ook ingedeeld worden volgens de signatuur van de berekeningsmethode : een punt, een rij getallen, een rij complexe getallen, een meerdimensionale rij getallen, ...

Als eerste abstracte klasse, zal er een klasse (*ParamRegister*) voorzien worden die als taak heeft de nodige structuren aan te bieden om de verschillende *ExportParam*-objecten bij te houden in een lijst. Deze lijst kan dan door andere objecten geraadpleegd worden als ze toegang tot de waarde van een bepaalde parameter nodig hebben. Bij de implementatie van dit object moet ervoor gezorgd worden dat zowel het aanmaken van de lijst als het raadplegen ervan op een transparante manier gebeurt, zodat de uiteindelijk complexe structuur van het objectmodel volledig verborgen wordt en er voor de gebruiker enkel een krachtig en bruikbaar geheel overblijft.

Afgeleid van deze *ParamRegister*-klasse worden er vervolgens een aantal klassen voorzien die de verschillende modellen groeperen op basis van de berekeningssignatuur. Elk van deze klassen heeft dan opnieuw afgeleide klassen die de eigenlijke implementatie van het lasermodel verzorgen. Het resultaat hiervan is te zien in Figuur 3-15. Binnen het kader van dit proefschrift werd enkel het *SpectModel*-object geïmplementeerd.

Het dient opgemerkt te worden dat het objectmodel een recursie van de *ParamRegister*-klasse voorziet, zoals het te zien is in Figuur 3-15. Deze recursie werd voorzien om ervoor te zorgen dat lasermodellen konden gebruik maken van andere (laser-)modellen. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk dat een lasermodel ter berekening van een spontane emissie-spectrum gebruik maakt van een model om de effectieve brekingsindex te berekenen en van een ander model gebruik maakt om de optische versterking te berekenen. Wanneer de recursie niet voorzien is, moet elk spontane emissie-spectrummodel telkens opnieuw de berekening voor de effectieve brekingsindex en de optische versterking implementeren.



Figuur 3-15 : Het objectmodel voor modellen in meer detail.

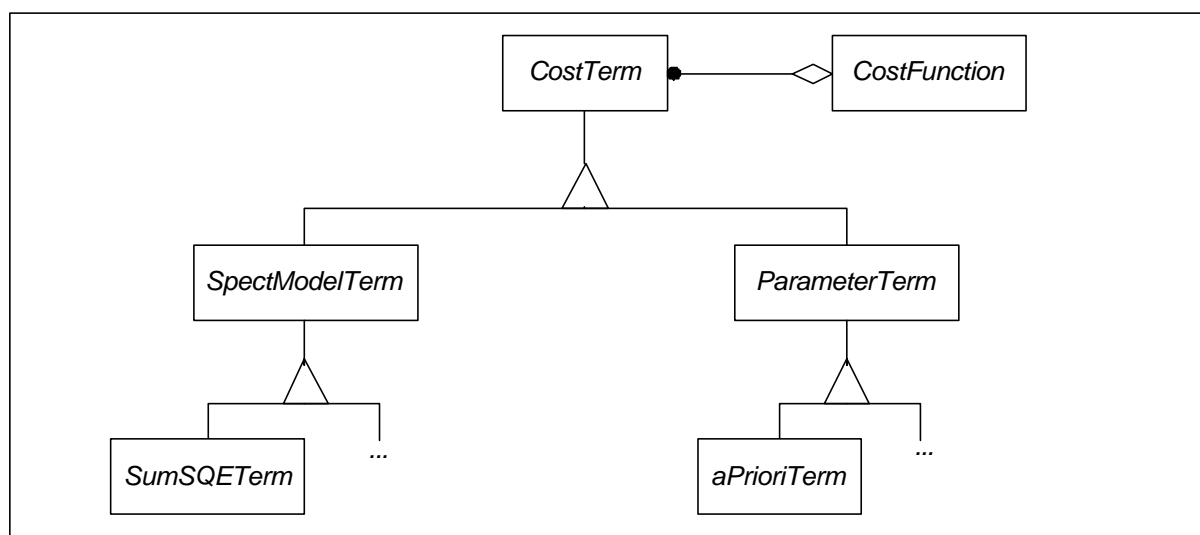
3.6.6 De kostenfunctie

De kostenfunctie is een uitdrukking voor de fout tussen model en meting, maar kan veel meer zijn dan een eenvoudig verschil tussen meting en gesimuleerde resultaten, ze kan ook een uitdrukking zijn van bepaalde a priori “kennis”, zoals in hoofdstuk 2 aangetoond werd. De alomgekende uitdrukkingen als som van kwadraten van de afwijking tussen berekend en gemeten data is een voorbeeld van een term op basis van de verschillen tussen een lasermodel en een meting. A priori kennis kan omgerekend worden naar een kostgetal op basis van een voorafgekende waarde van een parameter, de probabiliteitsdistributie van die parameterwaarde wordt omgerekend naar een kost en op die manier wordt de a priori kennis meegegeven aan het optimalisatiealgoritme.

In zijn algemene vorm zal de kostenfunctie dus bestaan uit een aantal termen, die samen de totale kost bepalen. De verschillende termen worden afzonderlijk uitgerekend en al dan niet gewogen bij elkaar opgeteld. Deze kostetermen kunnen in verschillende basisvormen voorkomen, twee vormen werden reeds aangegeven : termen op basis van modellen en termen op basis van parameters.

In object termen levert dit een abstract kosteterm-klasse op, met daarvan afgeleid enkele verzamel-klassen om de verschillende soorten kostetermen te groeperen, waarvan dan de specifieke vormen/implementaties afgeleid worden. (cf. Figuur 3-16). Het zijn dan ook die “verzamel-klassen” die de nodige structuren zullen implementeren om toegang te krijgen tot modevaluaties (*SpectModelTerm*) of parameterwaarden (*ParameterTerm*) door respectievelijk gebruik te maken van het *SpectModel*- en het *AccessParam*-object.

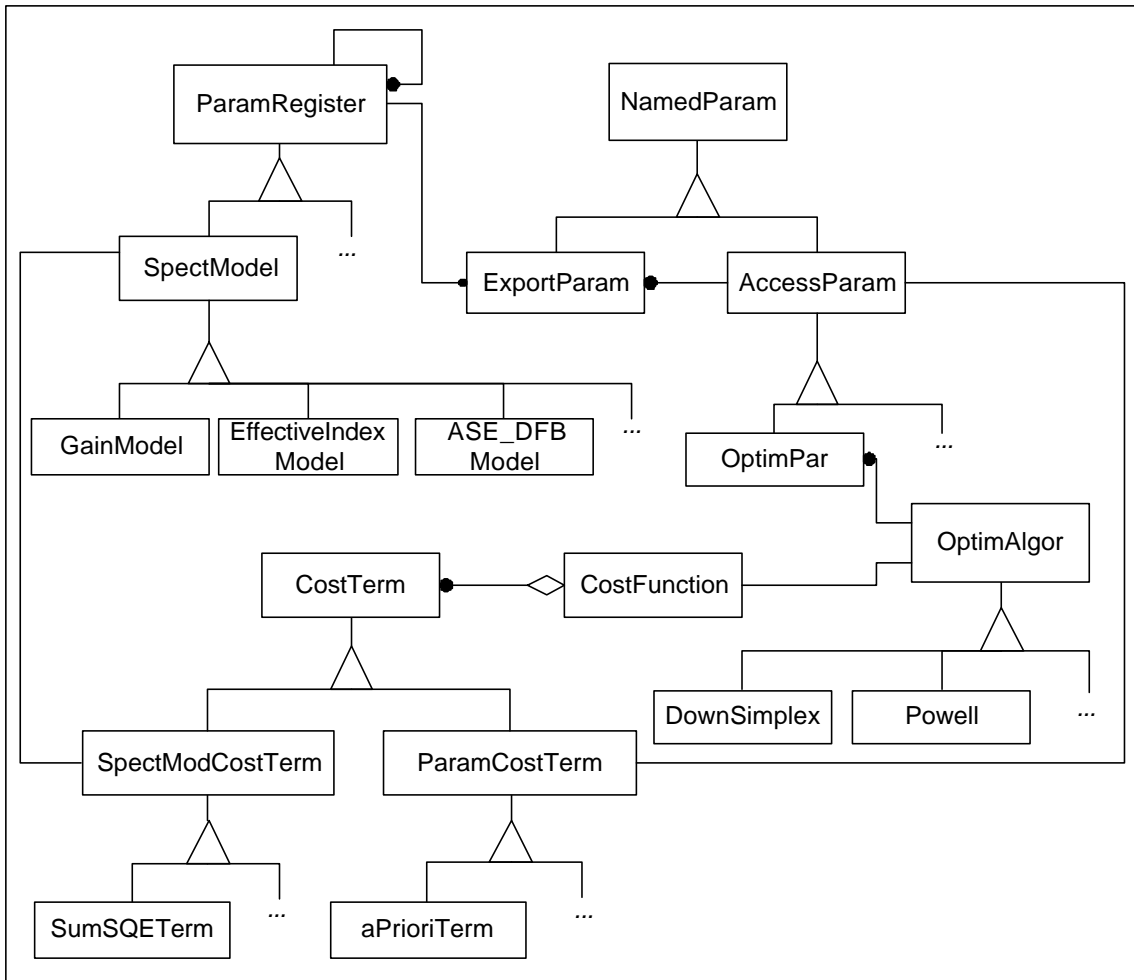
Zo zal bijvoorbeeld een *SumSQETerm*-object eerst met behulp van de “calc”-methode aan het lasermodel een berekening van het model vragen alvorens het resultaat te vergelijken met de gemeten resultaten die het bevat. Een *aPrioriTerm*-object zal echter via een *AccessParam-ExportParam*-combinatie de waarde van een bepaalde parameter opvragen en aan de hand van de eigen a priori kennis over die parameter een kostgetal uitrekenen.



Figuur 3-16 : Het objectmodel van de kostenfunctie in meer detail

3.6.7 Het volledige objectmodel voor het parameterextractieprobleem

Wanneer alle besproken submodellen gecombineerd worden en een extra abstracte klasse (*NamedParam*) ingevoerd wordt om gemeenschappelijke kenmerken en functionaliteiten van het *ExportParam*- en het *AccessParam*-object te groeperen, bekomt men het volledige objectmodel, weergegeven in Figuur 3-17.



Figuur 3-17: Een overzicht van het ontwikkelde objectmodel voor parameterextractie

3.7 *Besluit*

In dit hoofdstuk werden de funderingen uiteengezet voor de softwaretoepassingen die in het kader van dit proefschrift ontwikkeld werden. Vanuit de algemene voorstelling van meetsoftware als softwarecomponenten die met elkaar en met meetinstrumenten samenwerken, werden de twee communicatievormen uitgewerkt: de interapplicatiecommunicatie en de communicatie met de meetinstrumenten. De eerste is nodig om toepassingen met elkaar te laten samenwerken, de tweede is nodig om toepassingen met meetinstrumenten te laten samenwerken.

Om de interapplicatiecommunicatie te kunnen realiseren op een algemene manier, werd in het kader van dit proefschrift, een formele syntax (met naam ODIF) ontwikkeld, die toelaat om informatie omtrent instellingen en het resultaat van de metingen of berekeningen te bewaren op een gestructureerde manier.

Vanuit de huidige situatie in de meetwereld werd de interactie tussen toepassingen en meetinstrumenten bestudeerd. Om tegemoet te komen aan de noden werd een abstractie ontworpen op het niveau van het meettoestel (de “functionele instrument driver”) die toestaat om meettoepassingen instrumentonafhankelijk te implementeren. Op die manier kunnen toepassingen beschermd worden tegen veranderingen bij de meetinstrumenten.

In het derde deel van dit hoofdstuk werd een softwaremodel ontwikkeld dat toestaat om een flexibele omgeving te realiseren voor parameterextractietoepassingen. Hiervoor werd de onderlinge relatie tussen optimaliseringsalgoritme, lasermodel en kostenfunctie op een abstracte manier geanalyseerd en aan de hand van objectgeoriënteerde technieken gemodelleerd. De aldus bekomen objecten laten toe om de afzonderlijke componenten (lasermodellen, termen in de kostenfunctie en optimaliseringsalgoritmes) te veranderen of nieuwe toe te voegen, zonder dat een gedetailleerde kennis van het geheel vereist is.

-
- [3.1] P. Verhoeve, “ODIF Information Site”, <http://www.intec.rug.ac.be/Research/Groups/optoMC/odif/>
 - [3.2] P. Verhoeve, “An Optical Data Interchange format”, appendix A from the book: “How to model and measure PHOTONIC DEVICES. Experiences from a European collaboration”, G. Guekos (Editor), Springer Verlag GmbH (Berlin), 1998
 - [3.3] N. Wirth, “What can we do about the unnecessary diversity of notation for syntactic definitions?”, Communications of the ACM, vol. 20, 11, 1977.
 - [3.4] J. Rumbaugh, M. Blaha, W. Premerlani, F. Eddy, W. Lorensen, “Object-oriented modeling and design”, Prentice Hall, 1991
 - [3.5] J. Martin, J. Odell, “Object oriented methods, a foundation”, Chapter 25, Prentice Hall 1995
 - [3.6] P. Heinckens, “Building Scaleable Database Applications: Object-Oriented Design, Architectures and Implementation”, Addison Wesley Longman, 1998

HOOFDSTUK 4

Parameterextractie voor laserdiodes

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van een aantal fysische laserparameters en parameterextractiemethodes om ze te bepalen aan de hand van metingen. De parameters worden in vier categorieën opgesplitst: golfgeleidereigenschappen, statische lasereigenschappen, ruis-eigenschappen en dynamische lasereigenschappen.

Het overzicht beperkt zich tot de meest bekende en meest gebruikte methodes uit de literatuur. De meer geavanceerde methodes en specifiek in het kader van dit proefschrift bestudeerde extractietechnieken komen aan bod in het volgende hoofdstuk.

4.2 Eigenschappen van de golfgeleider

Elke halfgeleiderlaserdiode bestaat uit een golfgeleider met specifieke eigenschappen die kunnen beschreven worden aan de hand van een aantal parameters. Een degelijke kennis van die golfgeleider meer bepaald zijn eigenschappen is van essentieel belang bij het bepalen van de parameters van een laserdiode.

De belangrijkste eigenschappen zijn de optische versterking, de interne verliezen, de effectieve brekingsindex en daaraan verbonden: de groepsindex en uiteindelijk ook de reflectiecoëfficiënten aan de uiteinden van de golfgeleider. Verder kan er een diffractierooster aangebracht zijn binnen de golfgeleider dat ook van groot belang is voor de uiteindelijke laserwerking. Elk van deze parameters worden in de volgende puntjes behandeld, samen met een korte beschrijving van één of meer methodes om de parameters op te meten.

4.2.1 De optische versterking of “Gain” en aanverwante parameters

4.2.1.1 De optische versterking

De optische versterking, ook wel “gain” of winst genoemd, is voor laserwerking een fundamentele grootheid. De technieken voor het bepalen van de optische versterking zijn reeds geruime tijd bekend. Reeds in 1973 legden B. Hakki en T. Paoli [4.1] de grondslagen voor alle latere meetmethodes voor de optische versterking. De methode steunt op de spectrale eigenschappen van de Fabry-Perot caviteit en berekent aan de hand van de verhoudingen van de vermogens van nabijgelegen pieken $P_{\max}(\lambda \in \lambda_{\max})$ en dalen $P_{\min}(\lambda \in \lambda_{\min})$ de gemiddelde optische versterking in het interval $[\lambda_{\min} \in \lambda_{\max}]$ aan de hand van de uitdrukking (4.1). Hierbij

staat L voor de lengte van de caviteit en R_L (R_R) staan voor de vermogensreflectiecoëfficiënt van het linker (rechter) facet. Alhoewel de initiële formule voorgesteld werd als een passieve golfgeleidermeting die uitgevoerd werd aan de hand van ingekoppeld licht, levert de afleiding in het geval van een actieve golfgeleider of Fabry-Perot-laserdiode waar het licht in de golfgeleider aangemaakt wordt, hetzelfde resultaat. In het geval van een laserdiode dient de berekening wel uitgevoerd te worden aan de hand van een spontane emissiespectrum dat bij een instelstroom kleiner dan de drempelstroom opgemeten wordt.

$$G = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{\sqrt{P_{\max}} - \sqrt{P_{\min}}}{\sqrt{P_{\max}} + \sqrt{P_{\min}}} \right) + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_L R_R} \right) \quad (4.1)$$

De berekende modale optische versterking G is dan een functie van de optische versterking van het materiaal (g), de vulfactor (“*confinement factor*” of Γ) en de optische verliezen van de golfgeleider (α) zoals gegeven in uitdrukking (4.2).

$$G = \Gamma g - \alpha_i \quad (4.2)$$

Indien de waarden van de zuivere materiaalparameters gewenst zijn, moet er bijgevolg voor gezorgd worden om de interne verliezen en de optische versterking te kunnen onderscheiden. In de literatuur zijn verschillende oplossingen voorgesteld die ondermeer steunen op de transparantiegolflengte, de golflengte waar de optische versterking gelijk is aan de interne verliezen en het licht ongehinderd en onversterkt door de caviteit kan geleiden. Dit punt kan men ondermeer bepalen doordat in dat punt ingekoppeld licht niet langer interageert met de caviteit [4.2]; aan de hand van het feit dat de curven voor TM en TE optische versterking elkaar kruisen in het transparantiepunt [4.3], of zelfs via een combinatie van beide methodes [4.4] die voldoende nauwkeurigheid biedt om de temperatuursafhankelijkheid van de optische versterking na te gaan [4.5].

4.2.1.2 De differentiële optische versterking

Naast de optische versterking, is ook de differentiële optische versterking een belangrijke parameter. Immers eenmaal de laserdiode zich boven de drempelwaarde bevindt ligt de globale waarde van de optische versterking vast doordat de ladingdragersdichtheid niet meer verandert. Wanneer de laserdiode echter gemoduleerd wordt (klein signaalgedrag), zijn het de kleine veranderingen of met andere woorden de afgeleide van de optische versterking naar de ladingsdragers die de modulatiereponsie van de laserdiode bepalen. Namelijk, hoe groter de differentiële optische versterking, hoe sneller de gestimuleerde emissie verandert in functie van de ladingsdragersdichtheid en hoe sneller de laserdiode kan gemoduleerd worden.

De differentiële optische versterking wordt soms met het symbool “ g_0 ” aangeduid, maar om alle verwarring met de optische versterking van het materiaal te vermijden, wordt er in het kader van dit proefschrift de expliciete notatie gebruikt met de afgeleide erin (zie uitdrukking (4.3)).

$$\text{differentiële optische versterking} : \frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \quad (4.3)$$

4.2.1.3 De niet lineaire versterking

Indien de laserdiode gebruikt wordt bij instelstromen die veel groter zijn dan de drempelstroom, zal de evenwichtssituatie van de ladingsdragers, die zorgen voor het proces

van gestimuleerde emissie tijdelijk verstoord worden. Dit fenomeen dat “*spectral hole burning*” [4.6] genoemd wordt, herstelt zich na een korte tijd maar zorgt er toch voor dat de optische versterkings eigenschappen van het materiaal veranderen. De invloed van dit fenomeen op de optische versterking kan uitgerekend worden aan de hand van de *rate-equations* en kan samengevat worden in een versterkingsonderdrukkingsfactor “*e*” of niet lineaire versterking, die volgens uitdrukking (4.4) in verband staat met de optische versterking [4.7].

$$g(N, E, S) = \frac{g(N, E, 0)}{1 + eS} \quad (4.4)$$

Deze parameter kan op twee manieren bepaald worden : aan de hand van een extractie op basis van het relatieve intensiteitsruisspectrum en aan de hand van het spontane emissiespectrum boven drempel [4.8]. De eerste methode kan toegepast worden bij alle laserdiodes en komt in meer detail aan bod in het volgende hoofdstuk. De tweede methode vereist een heel specifieke constructie van de laserdiode, gezien het spontane emissiespectrum boven drempel gemeten wordt loodrecht op de lasercaviteit.

4.2.2 *Het optisch intern verlies*

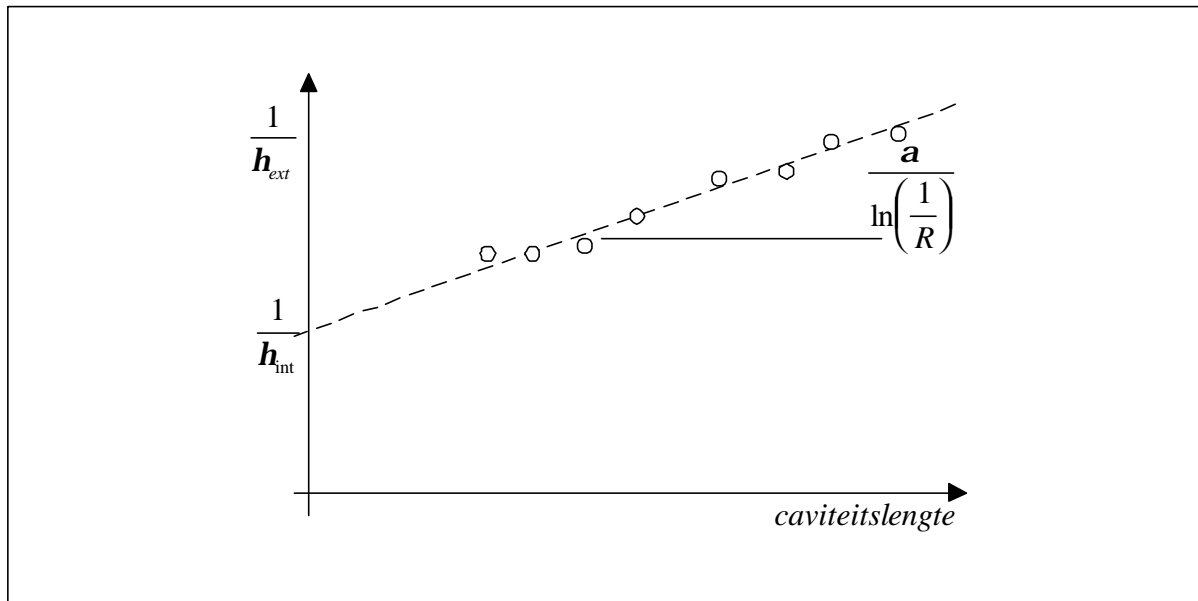
Gezien de modale optische versterking ondermeer bepaald wordt door het intern verlies, zijn alle meetmethodes voor de optische versterking ook bruikbaar als meetmethode voor het optisch verlies van de golfgeleider. De enige moeilijkheid is om de twee fenomenen te kunnen onderscheiden, hetgeen op twee manieren kan gebeuren : enerzijds kan men het punt opzoeken waarbij de netto optische versterking (d.i. versterking - verliezen) nul is en anderzijds kan men aan de hand van een limietgedrag een situatie bereiken waar de eigenlijke modale optische versterking nul is, en het gemeten getal bijgevolg het verlies van de golfgeleider is.

De eerste methodes die steunen op het transparantiepunt zijn reeds aangehaald bij de beschrijving van de optische versterking in de vorige sectie, de methodes die steunen op het limietgedrag zullen hier besproken worden.

De oudste en veruit meeste verspreide methode om de interne verliezen van een set lasers te bepalen, maakt gebruik van het feit dat de grafiek met als abscis de caviteitslengte en als ordinaat de reciproke efficiëntie ($1/\eta_{\text{ext}}$) een rechte lijn is (cf. Figuur 4-1) voor een set nominaal identieke Fabry-Perot lasers [4.9], [4.10]. Vanuit de theorie kan uitdrukking (4.5) afgeleid worden.

$$\frac{1}{h_{\text{ext}}} = \frac{1}{h_{\text{int}}} \left(1 + \frac{a_i L}{\ln\left(\frac{1}{R}\right)} \right) \quad (4.5)$$

Met andere woorden de helling van de rechte komt overeen met de interne verliezen en het snijpunt met de Y-as levert de interne efficiëntie op. Alhoewel deze methode vaak gebruikt wordt, heeft ze als voornaamste nadeel dat enkel de gemiddelde interne verliezen voor een aantal lasers kunnen bepaald worden en niet de interne verliezen van elke laser afzonderlijk.



Figuur 4-1 : Bepaling van interne verliezen aan de hand van de efficiëntie voor nominaal identieke lasers met een verschillende caviteitslengte

De “*below bandgap*” methode van Ketelsen [4.11] steunt op het feit dat voor grote golflengtes of energieën kleiner dan de *bandgap* de versterking door het optische materiaal heel klein is en bijgevolg kan verwaarloosd worden tegenover de verliezen.

Het grote voordeel van deze methode is dat ze resultaten oplevert voor elke laser afzonderlijk en niet voor een “gemiddelde” laser. Bovendien kan deze methode ook gebruikt worden voor DFB lasers, die buiten het golflengtegebied waar het diffractierooster actief is Fabry-Perot effecten vertonen. Dit veronderstelt wel dat de laserdiode niet met een antireflectieve coating uitgerust is, want dan verdwijnen de Fabry-Perot effecten en wordt de methode bijgevolg onbruikbaar.

De methode werkt echter alleen maar als de interne verliezen niet golflengteafhankelijk zijn, de methode bepaalt immers per definitie de interne verliezen bij een golflengte die niet overeenkomt met de golflengte waar de laser actief is. Een bijkomend praktisch nadeel van deze methode is dat er bij de hoge golflengtes die overeenkomen met het “*below bandgap*”-gebied weinig signaal aanwezig is, hetgeen de metingen bemoeilijkt.

4.2.3 Groepsindex - effectieve brekingsindex

Naast de optische versterking en verliezen zijn de effectieve brekingsindex en de daaraan verbonden groepsindex belangrijke factoren die de werking van de laserdiode bepalen. Het verband tussen de effectieve brekingsindex en de groepsindex wordt gegeven door de uitdrukking (4.6).

$$n_g = n_e - 1 \left(\frac{\mathcal{I}n_e}{\mathcal{I}1} \right) \quad (4.6)$$

Het is niet mogelijk om de effectieve brekingsindex van een golfgeleider rechtstreeks te bepalen maar in het geval van een Fabry-Perot caviteit (een golfgeleider met spiegels) kan er gebruik gemaakt worden van de afstand tussen de verschillende Fabry-Perot modes om de

groepsindex te bepalen aan de hand van uitdrukking (4.7). Eenmaal die gekend is kan via het verband tussen de groepsindex en de effectieve brekingsindex deze laatste berekend worden.

$$n_g = \frac{I^2}{2L\Delta I} \quad (4.7)$$

4.2.4 Reflecties aan de uiteinden

De reflecties aan de uiteinden van de golfgeleider vormen in eerste instantie de caviteit die de laser en zijn werking definieert. In tegenstelling tot de eenvoud van het fenomeen, is het bepalen van de uiteindelijke waarde van de reflectiecoëfficiënten een complexe materie. Zolang het gaat over een “gewone” overgang tussen halfgeleidermateriaal en lucht, kan de reflectiecoëfficiënt berekend worden als de brekingsindices gekend zijn. Als er echter een coating op het facet aangebracht werd, is de waarde niet zonder meer te berekenen doordat de technologie voor het aanbrengen van dergelijke coatings een niet triviale techniek is. Vanuit de technologie kan men dan ook vaak niet meer specificeren dan een zekere bovengrens of hooguit een getal met een grote fout erop.

Gezien de waarde van de reflectiecoëfficiënten voorkomt in de reeds aangehaalde methodes om optische versterking en interne verliezen te bepalen, kunnen diezelfde methodes gebruikt worden om de reflectiecoëfficiënten te bepalen, indien de andere waarden gekend zijn. Zo kan de combinatie van componenten met een identieke structuur maar verschillende facetreflecties (bijvoorbeeld wel en niet gecoat) gebruikt worden om de reflectiecoëfficiënten te bepalen.

4.2.5 Eigenschappen van het ingebouwd diffractierooster

Om de laserdiodes een specifieke golflengte karakteristiek te geven, wordt er ondermeer gebruik gemaakt van een ingebouwd diffractierooster. Hierdoor wordt er een specifieke golflengte (of een aantal golflengtes als meerdere roosters gecombineerd worden) op een gedistribueerde manier gereflecteerd binnen de caviteit en kan de laserdiode een grotere golflengtestabiliteit verkrijgen zoals dit het geval is bij een DFB-laserdiode.

De eigenschappen van dit rooster worden beschreven door de roosterperiode die gekend is bij fabricage, de brekingsindex van de golfgeleider en de koppelingscoëfficiënt, die aangeeft hoe sterk de interactie is tussen het rooster en het licht in de golfgeleider. De uitdrukking (4.8) geeft aan dat de golflengte waarbij de reflectie van het diffractierooster maximaal is, bepaald wordt door een combinatie van de roosterperiode (L) en de effectieve brekingsindex (n_{eff}) van de golfgeleider.

$$I_B = 2\Lambda n_{eff} \quad (4.8)$$

Het opmeten van die koppelingscoëfficiënt is geen triviale zaak, idealiter zou de situatie met en zonder rooster moeten vergeleken worden, doch dit is niet mogelijk gezien het rooster onderdeel uitmaakt van de golfgeleider. De enige manier om de invloed van het diffractierooster te bepalen is door gebruik te maken van indirecte metingen, om vanuit het optisch spectrum de roosterparameters te bepalen.

In de literatuur zijn verschillende methodes beschreven voor DFB-laserdiodes, waar de aanwezigheid van het diffractierooster zich manifesteert als een stopband, een “gat” in het optisch spectrum: de golflengte-afstand tussen de twee modes die vlak naast de eigenlijke

lasermode liggen is groter dan de afstand tussen de andere modes onderling die in het spectrum te zien zijn. De bepaling van de koppelingscoëfficiënt kan gebeuren op basis van de grootte van die stopband [4.12], [4.13] en [4.14], weergegeven in uitdrukking (4.9), door een combinatie van de roosterperiode, de effectieve brekingsindex en de breedte van de stopband.

$$k = \frac{pn_{eff} \Delta l_{stopband}}{I_B^2} = \frac{p}{4} \frac{\Delta l_{stopband}}{n_{eff} \Lambda^2} \quad (4.9)$$

Maar de bepaling kan ook gebeuren op basis van de verhouding van de beide modepieken aan weerszijden van de stopband [4.15].

Verder is er een meer algemene doch complexe methode die gebruik maakt van een (al dan niet) analytische uitdrukking voor het optisch spectrum beneden drempel. Deze uitdrukking wordt gefit aan de meetresultaten en op die manier worden de parameters, waaronder de koppelingscoëfficiënt bekomen. Het nadeel van deze methode is dat fitten in een multidimensionele ruimte niet triviaal is, maar het grote voordeel is wel dat deze methode bruikbaar is voor alle soorten laserdiodes.

4.3 De statische lasereigenschappen

4.3.1 Drempelstroom

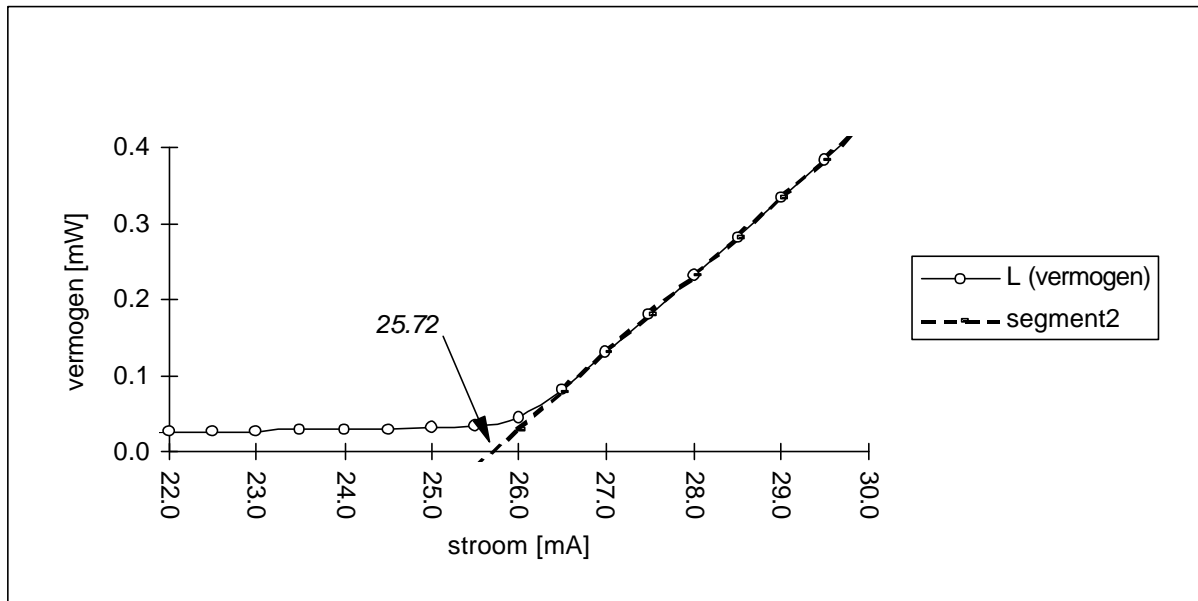
De drempelstroom van een laserdiode wordt als volgt gedefinieerd :

“De stroom waarbij de laser in werking zou treden indien er geen spontane emissie aanwezig zou zijn”.

Alhoewel de drempelstroom een van de meest eenvoudige karakteristieken van een laserdiode is, is vaak de correcte omschrijving niet gekend en circuleren er verschillende berekeningsmethodes. Deze geven hetzelfde resultaat (binnen de foutenmarge) indien ze met de nodige zorg gebruikt worden. Voor de volledigheid, worden de drie methodes hier kort besproken. Bij de meeste realisaties en ook binnen het kader van dit proefschrift wordt de eerste methode gebruikt, omwille van haar eenvoudige berekeningswijze en haar directe relatie tot eigenlijke definitie van de drempelstroom.

4.3.1.1 Methode één : het intersectiepunt met de abscis

De eerste methode om de drempelstroom te bepalen (weergegeven in Figuur 4-2) steunt letterlijk op de definitie ervan : door de laserwerking te extrapoleren, kan men het punt vinden waar de laser theoretisch begint te werken.



Figuur 4-2 : Intersectiemethode om de drempelstroom te bepalen

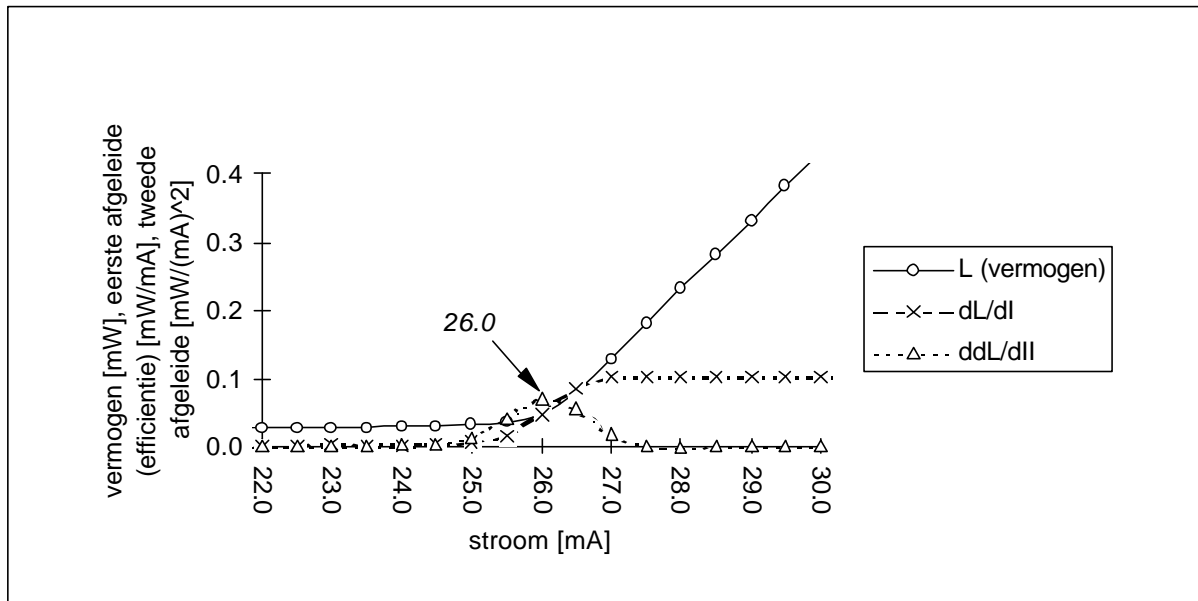
Naast het feit dat er voor deze methode lineaire regressie moet gebruikt worden, is ook enige omzichtigheid geboden bij de keuze van de punten die gebruikt worden voor de regressie. Indien de laserdiode last heeft van thermische effecten (de helling van de vermogenscurve bij laserwerking daalt bij hogere instelstromen), zal dit een drempelstroom opleveren die veel te klein is.

4.3.1.2 Methode twee : het buigpunt van de vermogenscurve

De tweede methode bepaalt het buigpunt van de opgemeten vermogenscurve als waarde voor de drempelstroom (zie Figuur 4-3). De motivering hiervoor is dat het buigpunt kan gezien worden als de werkelijke overgang tussen de spontane emissie en de laserwerking; vanaf die stroom wordt de laserdiode “bruikbaar” als laser.

Deze methode lijkt eenvoudiger te zijn dan de vorige gezien hier slechts twee keer een afgeleide moet berekend worden in plaats van een lineaire regressie uit te voeren, maar de realiteit is anders. In eerste instantie is afleiden een proces dat nogal gevoelig is aan ruis, hetgeen de berekening minder betrouwbaar maakt. In tweede instantie is de methode heel gevoelig aan de afstand tussen de meetpunten. Doordat de tweede afgeleide enkel berekend kan worden in de meetpunten zelf, zal de drempelstroom (met name het maximum van de afgeleide) ook altijd gevonden worden in een gemeten punt, met nauwkeurigheid gelijk aan de halve afstand tussen de meetpunten.

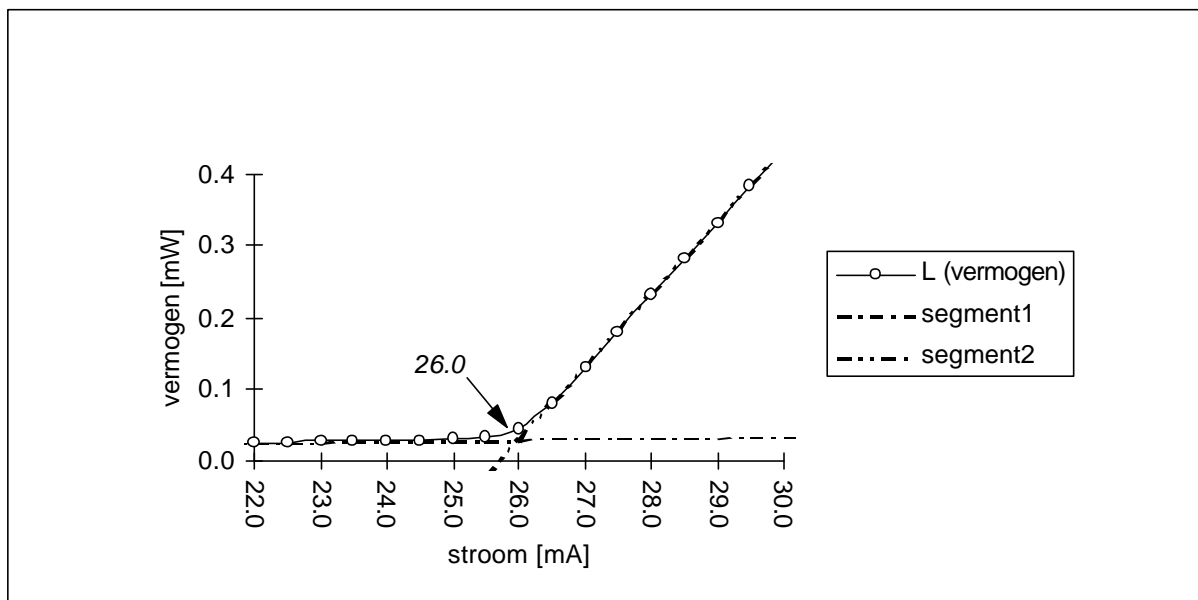
Bovendien is het van wezenlijk belang dat de afgeleide zorgvuldig berekend wordt : naast het bepalen van de differenties voor waarde van de afgeleide, moet er ook gecontroleerd worden of de abscis van de berekende afgeleide niet verschoven ligt ten opzichte van de gemeten punten. Indien hiermee geen rekening gehouden wordt, kan de waarde van de drempelstroom een volledig meetpunt verschuiven en bijgevolg een foutief resultaat opleveren.



Figuur 4-3 : Buigpunt van de vermogenscurve als bepaling voor de drempelstroom

4.3.1.3 Methode drie : snijpunt van de spontane emissie en de laserwerking

De derde methode bepaalt de drempelstroom door het snijpunt te bepalen van twee rechten zoals te zien is in Figuur 4-4. De eerste stelt de spontane-emissiewerking voor, de tweede stelt de laserwerking voor en beide worden bekomen door gebruik te maken van lineaire regressie.



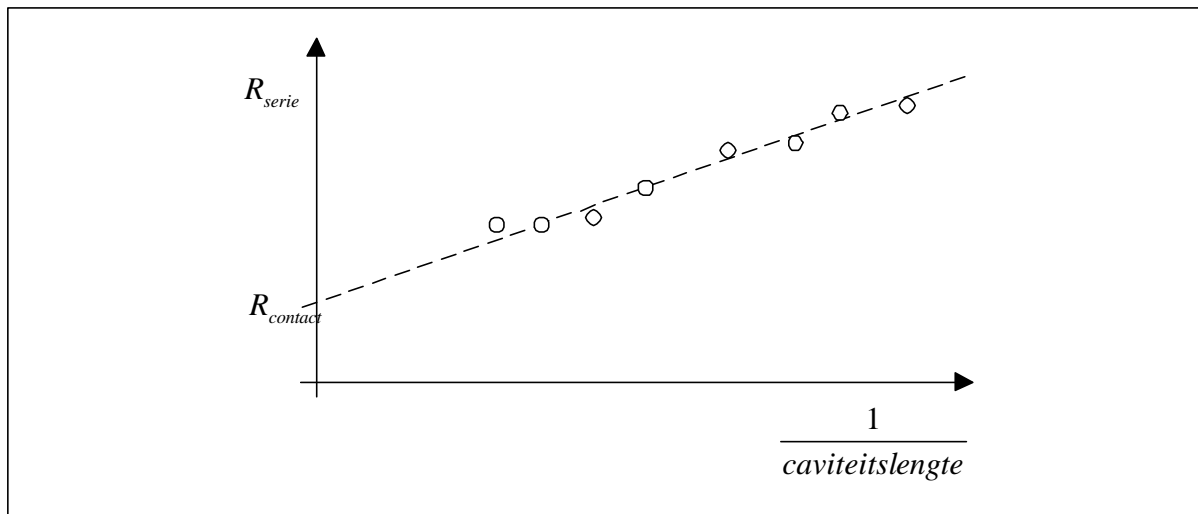
Figuur 4-4 : Snijpunt van spontane emissie en laserwerking

Net zoals de vorige methode, wordt ook hier een poging ondernomen om een nauwkeuriger beeld te vormen van de eigenlijke stroom waar de laserwerking sterker wordt dan de spontane emissie. Door gebruik te maken van de lineaire regressie, is het resultaat niet

langer afhankelijk van de afstand tussen de meetpunten. Dit wil zeggen : zolang er voldoende punten zijn om de regressie te verantwoorden en zolang beide fenomenen lineair blijven.

4.3.2 Serieweerstand

De serieweerstand van de component wordt, zoals alle weerstanden, opgemeten door de spanning over de component te meten als functie van de stroom. Indien er meerdere metingen mogelijk zijn op identieke componenten met een verschillende lengte, kan men de contactweerstand extraheren. Deze blijft immers constant bij veranderlijke lengte, waar de serieweerstand afneemt met de lengte (cf. Figuur 4-5).

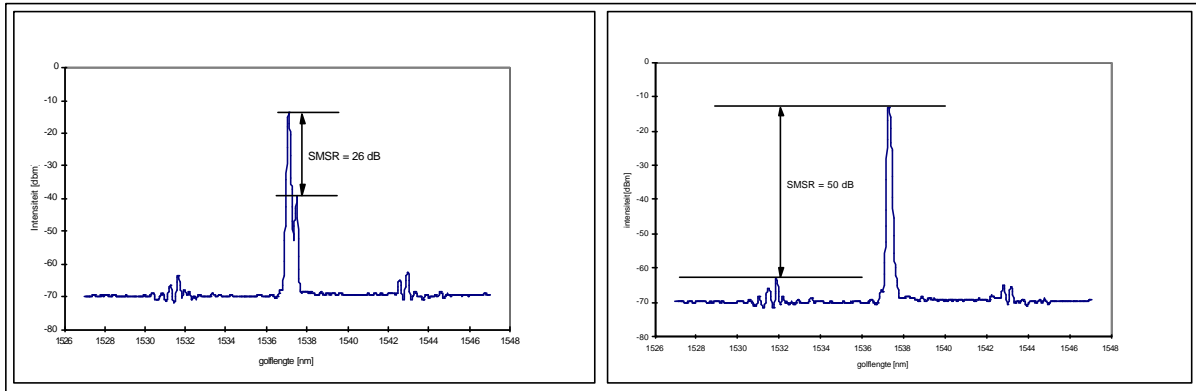


Figuur 4-5 : Serieweerstand als functie van de inverse caviteitslengte

4.3.3 De piekgolflengte en spectrale zuiverheid

De piekgolflengte is de dominante golflengte in het optisch spectrum en wordt daarom ook de lasergolflengte genoemd. Naast deze evidente parameter zijn er ook parameters die de spectrale zuiverheid omschrijven. Deze wordt aangegeven door twee getallen : de zijmode-onderdrukkingsratio (“*side mode suppression ratio*” of “SMSR”) en de lijnbreedte. De zijmode-onderdrukkingsratio wordt vooral bepaald door de opbouw van de laserdiode en wordt hier kort besproken, de lijnbreedte daarentegen ontstaat als gevolg van ruis en wordt besproken in sectie 4.4.3.

De zijmode-onderdrukkingsratio wordt gedefinieerd als de verhouding van het vermogen bij de dominante golflengte (mode) tot het vermogen bij de nabijgelegen golflengte (mode) met net iets minder vermogen zoals aangegeven in Figuur 4-6. Bij “eenvoudige” lasersdiodes gaat het hierbij meestal om verschillende longitudinale modes, m.a.w. de verschillende caviteitsmodes, bij meer complexe laserdiodes zoals de in golflengte afstembare laserdiodes met groot bereik (WTLS) kan het ofwel om de longitudinale modes (Figuur 4-6, rechts) gaan ofwel om de meest nabijgelegen supermode (Figuur 4-6, links). In de praktijk neemt men de kleinste waarde van beide als “de” zijmode-onderdrukkingsratio voor de laserdiode.



Figuur 4-6: Zijmode-onderdrukkingsratio ten gevolge van longitudinale modes (links) en supermodes (rechts) bij de in golflengte afstembare laserdiodes met groot bereik.

Het opmeten van de piekgolflengte en de zijmode-onderdrukkingsratio gebeurt via het optisch spectrum dat opgemeten wordt met een optische spectrumanalyser. Hierbij dient een toestel gekozen te worden met een voldoende hoog dynamisch bereik, bij voorkeur een *double pass* optische spectrumanalyser. Dit is nodig omdat de verschillende longitudinale modes heel dicht bij elkaar liggen zodat de filterkarakteristiek van de gebruikte optische spectrumanalyser voldoende steil moet zijn om ze te kunnen onderscheiden. Typische waarden zijn 50 dB op een afstand van 0.5 nm ten opzichte van de dominante golflengte.

Indien enkel de piekgolflengte moet opgemeten worden volstaat een single pass optische spectrumanalyser (typisch dynamisch bereik 35 dB op een afstand van 1 nm ten opzicht van de dominante mode) en als de zijmode-onderdrukkingsratio voldoende hoog is in de gemeten punten, kan ook gebruik gemaakt worden van een golflengtemeter, die een veel hogere golflengteresolutie biedt (1 à 10 ppm, zijnde 10 MHz of 1 pm bij 1550 nm)

4.3.4 Karakteristieke temperatuur : T_0

De karakteristieken van een laserdiode zijn temperatuursafhankelijk gezien de onderliggende processen beïnvloed worden door een temperatuursverandering. Naast de veranderingen in de optische verliezen [4.16], [4.17], [4.18], de lekstromen [4.19], is ook de optische versterking een belangrijke factor voor de temperatuursafhankelijkheid [4.20], [4.21].

Deze thermische afhankelijkheid komt vooral tot uiting in een toename van de drempelstroom en een afname van de efficiëntie van de laserdiode. De temperatuursafhankelijkheid van de drempelstroom kan worden beschreven door een exponentiële functie :

$$I_{th} = I_0 e^{\frac{T}{T_0}} \quad (4.10)$$

Met andere woorden hoe hoger de karakteristieke temperatuur T_0 , hoe minder de laser onderhevig is aan temperatuursveranderingen. Het bepalen van de karakteristieke temperatuur gebeurt door de exponentiële functie te fitten aan drempelstroommetingen bij verschillende temperaturen.

Recent werd er een nauwkeuriger uitdrukking voorgesteld [4.22], die het verband legt, gegeven in uitdrukking (4.11), tussen de stroomdichtheid bij drempel en de temperatuursafhankelijkheid.

$$J_{th} = \left(\frac{P}{C} (T_{max} - T) \right)^{\frac{1}{P}} \quad (4.11)$$

Hierbij is C een temperatuursonafhankelijke constante bepaald door de lagenstructuur van het actieve materiaal in de golfgeleider, P is ongeveer gelijk aan 0.5 en T_{max} stelt de karakteristieke temperatuur voor.

4.3.5 *Het nabije en verre veld*

Het nabije veld van de laserdiode beschrijft hoe het licht ter hoogte van het laserfacet eruit ziet. Gezien het opmeten van alle informatie in het nabije veld van een laserdiode niet triviaal is (er moet zowel amplitude als fase van het licht opgemeten worden) en gezien deze eigenschap niet echt van belang is bij het beschrijven van laserdiodes voor fabricageprocessen en systeemtoepassingen, wordt er in het kader van dit proefschrift verder geen aandacht aan besteed.

Het verre veld komt overeen met het stralingspatroon van de laserdiode en is, in tegenstelling tot het nabije veld, heel relevant voor systeemtoepassingen. De vorm van het stralingspatroon bepaalt immers hoe efficiënt er naar optische vezel kan gekoppeld worden. De optische vezel is immers een ronde golfgeleider en het verre veld van een laserdiode is normaal ellipsvormig door de technologische beperkingen bij de fabricage. Het opmeten van het verre veld en de daarbij horende aligneringstolerantie is vooral interessant wanneer het gaat om laserdiodes met geïntegreerde structuren die specifiek ontworpen zijn om een betere koppeling naar optische vezel te verwezenlijken [4.23], [4.24], [4.25].

4.3.6 *Het optisch spectrum*

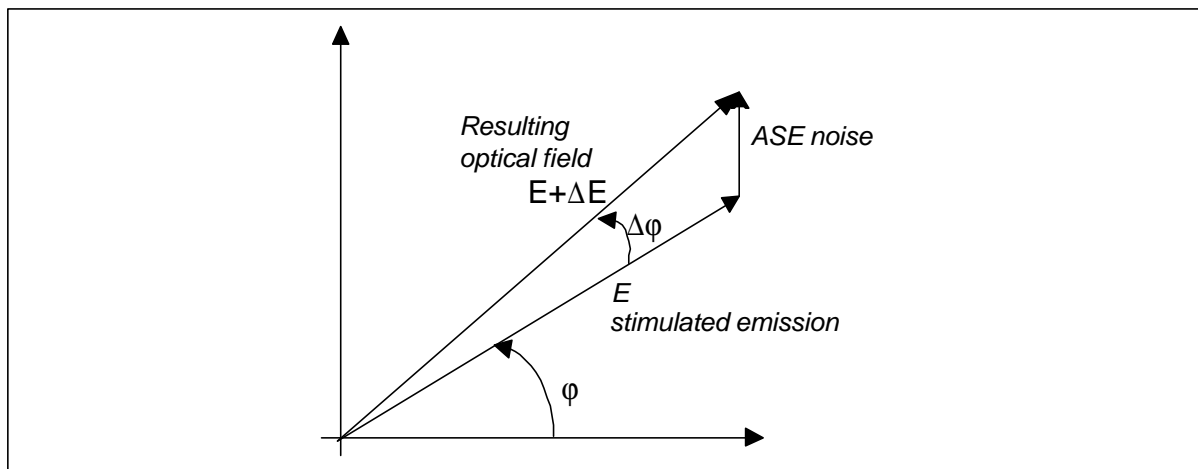
Het optisch spectrum wordt bepaald door de combinatie van vele eigenschappen van de golfgeleider. Het is dan ook een ware bron van informatie, maar jammer genoeg heeft deze combinatie van parameters ook tot gevolg dat het moeilijk wordt de verschillende parameters te onderscheiden en hun afzonderlijke waarden te bepalen aan de hand van het spectrum. Een mogelijke oplossing om de parameters op een indirecte manier te bepalen is door gebruik te maken van geavanceerde technieken zoals het fitten van een numeriek model aan de meting. Dit wordt vooral gedaan om informatie te extraheren op basis van het spontane emissiespectrum van de laserdiode. In het kader van dit proefschrift werden de mogelijkheden van deze methode dieper uitgewerkt en deze worden meer in detail besproken in het volgende hoofdstuk.

Naast het fitten van het spectrum aan een analytisch model, kan men ook gebruik maken van andere metingen om aan de hand van het spontane emissie-spectrum parameters te bepalen. Zo kan de dispersie bepaald worden aan de hand van een meting met een Michelson interferometer waarbij de te meten component in een arm geplaatst wordt [4.26], meer bepaald de dispersie in de groepsvertraging (“*group delay dispersion*”) en de optische versterking.

4.4 Ruiseigenschappen van laserdiodes

4.4.1 Inleiding

Ten gevolge van het feit dat de optische versterking geen perfect proces is en de aanwezigheid van de spontane emissie, is er ook ruis aanwezig in de laserdiode. Zoals te zien is in Figuur 4-7 komt de invloed van de spontane emissie op het complexe veld op twee manieren tot uiting : enerzijds verandert de lengte van de veldvector, hetgeen aanleiding geeft tot amplitudevariaties. Anderzijds verandert ook de hoek van de veldvector, hetgeen aanleiding geeft tot een fasevariatie in de gestimuleerde emissie [4.27].



Figuur 4-7 : De invloed van de spontane emissie op het complexe veld

De amplitudevariaties van die ruiseffecten hebben tot gevolg dat er ruis zit op het uitgestraalde vermogen, de fasevariaties van die ruiseffecten zorgen ervoor dat de laser niet op perfect één golflengte uitstraalt maar dat de laserlijn verbreedt. Beide fenomenen kunnen worden opgemeten, de amplitudevariaties worden uitgedrukt als *relatieve intensiteitsruis* (Relative Intensity Noise of RIN, eenheid dB/Hz), de fasevariaties worden uitgedrukt als een lijnbreedte (met als eenheid kHz).

4.4.2 Amplituderuis : de relatieve intensiteitsruis

Daar, zoals bij alle communicatiefenomenen, ook bij optische telecommunicatie niet zozeer de hoeveelheid ruis maar wel de relatieve hoeveelheid ruis ten opzichte van het signaal van belang is, spreekt men meestal niet over de hoeveelheid intensiteitsruis van een laserdiode. De ruis van de laserdiode wordt relatief uitgedrukt ten opzichte van het gemiddelde lichtvermogen dat door de laserdiode uitgestraald wordt, hetgeen gezien kan worden als een signaal-ruis-verhouding (SNR) waarbij het signaal geen gemoduleerde informatie is maar het constante lichtniveau. Deze relatieve grootte wordt relatieve intensiteitsruis of “RIN” genoemd en kan ondermeer rechtstreeks in verband gebracht worden met de signaal-ruis-verhouding wanneer er wel gemoduleerde informatie aanwezig is.

Gezien de relatieve intensiteitsruis een eigenschap is die opgemeten wordt bij een constante instelstroom en gezien de meting toch dynamische informatie over de laserdiode kan leveren doordat het een ruismeting is, kreeg de RIN-karakterisering specifieke aandacht in het

kader van dit proefschrift en wordt in het volgende hoofdstuk (sectie 5.3) in meer in detail behandeld.

4.4.3 Faseruis : de lijnbreedte

Zoals reeds aangegeven is de lijnbreedte van een laserdiode een maat voor de spectrale zuiverheid van de laserdiode. Door de fasevariatiën in de verschillende ruisbijdragen ontstaat er een zekere spreiding op de optische frequentie van het laserlicht. Deze spreiding wordt de lijnbreedte genoemd en theoretisch kan aangetoond worden dat de lijnbreedte zich manifesteert onder de vorm van een Lorentzianse uitdrukking als functie van de optische frequentie. De lijnbreedte kan volgens uitdrukking (4.12) geschreven worden als een functie van de laserparameters [4.27]. Het eerste deel van de uitdrukking (de breuk) wordt de Schawlow-Townes-lijnbreedte genoemd. Het tweede deel van de uitdrukking, met name $(1+a^2)$ drukt uit dat bij halfgeleiderlaserdiodes de werkelijke lijnbreedte groter is dan hetgeen de algemene theorie van lasers voorspelt. Dit fenomeen werd voor het eerst opgemerkt in 1981 [4.28] en kan verklaard worden aan de hand van de koppeling van fase- en amplitudevariatiën in het optische veld. De parameter α wordt de lijnbreedteverbredingsfactor of “*linewidth enhancement factor*” genoemd.

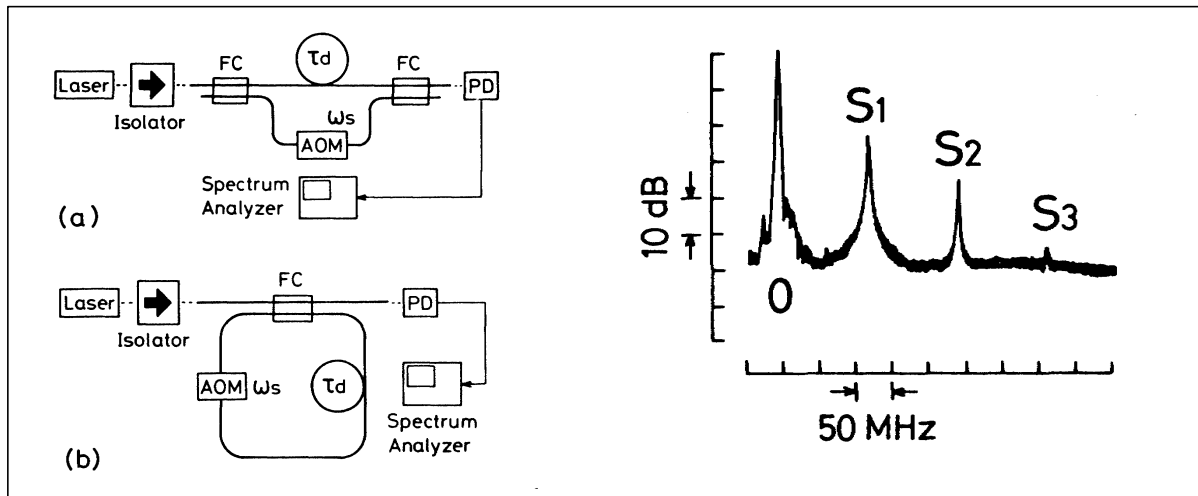
$$dn = \frac{v_g^2 h n R_{sp} g a_m}{8 p P} (1 + a^2) \quad (4.12)$$

De lijnbreedteverbredingsfactor wordt bepaald door de verhouding van de verandering van het reële deel van de brekingsindex tot de verandering van het imaginaire deel ervan. Of indien beide veranderingen uitgedrukt worden als relatieve veranderingen ten opzichte van de ladingsdragersdichtheid, kan de lijnbreedteverbredingsfactor ook geschreven worden als de verhouding van de AM-modulatie ten opzichte van de FM-modulatie, zoals te zien is in uitdrukking (4.13).

$$a = \frac{\int \text{Re}(n)}{\int \text{Im}(n)} = \frac{\frac{\int \text{Re}(n)}{\int N}}{\frac{\int \text{Im}(n)}{\int N}} = \frac{AM}{FM} \quad (4.13)$$

Gezien lijnbreedte een belangrijke parameter is voor optische telecommunicatie, is er steeds, zowel in het verleden als in het heden, veel aandacht besteed aan het meten van de lijnbreedte. De meest directe methode om lijnbreedte te meten is door gebruik te maken van een optische filter met voldoende smalle karakteristieken zoals een Fabry-Perot-etalon [4.29] of een Mach-Zehnder interferometer [4.30]. Deze methodes volstaan echter niet om de steeds nauwere lijnbreedtes van de steeds betere laserdiodes te kunnen meten. Daarom werden dan ook reeds in 1980 meettechnieken op basis van coherente methodes geïntroduceerd. Hierbij wordt het principe van heterodynering toegepast: het te meten laserlicht wordt gemengd met licht van een laser met een licht afwijkende golflengte en een uiterst smalle lijnbreedte. Het mengproduct wordt dan met behulp van een detector en een elektrische spectrumanalyser opgemeten. Gezien laserlicht een beperkte coherentielengte heeft, kan men de stabiele lichtbron ook vervangen door het licht uit de te meten laserdiode dat voldoende vertraagd wordt (typisch door gebruik te maken van een delay-line). Figuur 4-8 toont de evolutie van een eenvoudige heterodyne opstelling [4.31] naar een opstelling in een lus [4.32] waardoor verschillende mengproducten ontstaan en de lijnbreedte nauwkeuriger kan gemeten worden. Indien men nog een optische

versterker in de lus aanbrengt [4.33], kunnen lijnbreedtes tot een paar honderd Hz opgemeten worden.



Figuur 4-8 : Evolutie van de zelf heterodyne techniek voor het meten van lijnbreedte, rechts een voorbeeld van een opgemeten spectrum met meetopstelling (b)

Het is ook mogelijk om gebruik te maken van een homodyne opstelling die er identiek uitziet op de acousto-optische modulator na. Deze aanpak heeft echter het nadeel dat de elektrische spectrumanalyser van hoge kwaliteit moet zijn, gezien het mengproduct in dat geval rond de 0 Hz gecentreerd is. Dergelijke homodyne meetopstellingen, inclusief software zijn echter wel commercieel te verkrijgen.

Naast de directe meting met lange coherentielengtes, kan ook gebruik gemaakt worden van meetprocedures gebaseerd op subcoherente vertragingen. Het gemeten spectrum levert dan niet langer rechtstreeks de lijnbreedte op, maar deze kan bekomen worden door het fitten van een theoretische uitdrukking aan de meting. Op die manier kan er een nauwkeurige meetopstelling gerealiseerd worden zonder dat er ettelijke kilometers optische vezel nodig zijn voor het meten van lasers met een smalle lijnbreedte. Deze korte vertragingstechniek (“*short delay line*”) kan zowel uitgevoerd worden op basis van een heterodyne [4.34] opstelling of op basis van een homodyne meetopstelling [4.35]. De laatste heeft als groot voordeel dat de gebruikte meetopstelling uiterst eenvoudig te realiseren is doordat er geen acousto-optische modulator nodig is.

In het kader van dit proefschrift werd de extractieprocedure voor deze laatste methode (de homodyne meetopstelling met korte vertraginglijn) geïmplementeerd. In dat geval kan de uitdrukking (4.14) neergeschreven worden voor het door de elektrische spectrumanalyser opgemeten signaal. De laatste term van deze uitdrukking kan verwaarloosd worden, hetgeen een eenvoudig optimaliseringsprobleem oplevert in twee dimensies (de lijnbreedte en een offset voor de koppelingsverliezen). De vertraging van de interferometer (t_d) is immers gekend vanuit de opbouw van de opstelling. Het fitten van de uitdrukking gebeurt op een logaritmische schaal.

$$S(f) = \frac{\Delta n}{p(f^2 + (\Delta n)^2)} \left[1 - e^{-2pt_d \Delta n} \left(\cos(2pft_d) + \frac{2p\Delta n}{f} \sin(2pft_d) \right) \right] + d(f) e^{-2pt_d \Delta n} \quad (4.14)$$

4.5 De dynamische lasereigenschappen

4.5.1 Inleiding

Niettegenstaande de dynamische eigenschappen van laserdiodes belangrijke eigenschappen zijn, worden de rechtstreekse meetmethodes niet uitgebreid behandeld in dit proefschrift. De reden hiervoor is dat van bij het begin van dit proefschrift steeds “eenvoudige” metingen vooropgesteld waren en dat de klemtoon vooral gelegd is op de fysische laserparameters en niet zozeer op de systeemparameters. Modulatiemetingen horen niet echt thuis in de categorie “eenvoudige” metingen door het feit dat het maken van een goede elektrische verbinding tussen de hoogfrequente signaalbron (een tiental GHz) en de laserdiode geen triviale zaak is. Bovendien hebben de modulatiemetingen wel een duidelijk praktisch nut, maar kan dezelfde parameterinformatie uit ruismetingen gehaald worden.

4.5.2 AM-modulatie

In de huidige telecommunicatiewereld, waar alle optische communicatie gebeurt op basis van intensiteits- of amplitudemodulatie, is de bepaling van de modulatiebandbreedte van de laserdiode natuurlijk een belangrijke meting. De meting van die bandbreedte is qua concept een eenvoudige meting: de laserdiode wordt gemoduleerd en de responsie wordt opgemeten. Doordat de laserdiodes zelf meestal een hoge bandbreedte hebben is het van het grootste belang om ervoor te zorgen dat het meetresultaat niet bepaald wordt door de beperkingen van de meetopstelling. Het is immers niet evident om signalen die tot enkele tientallen GHz kunnen oplopen op een correcte manier (zonder reflecties of andere neveneffecten) in de laserdiode te krijgen.

Vanuit de *rate-equations* kan een kleinsignaaluitdrukking afgeleid worden die de vorm van het AM-modulatiespectrum beschrijft [4.36]. Deze uitdrukking is weergegeven in (4.15), waar de term met f_{par} aangeeft dat het modulatiegedrag van de actieve laag beperkt wordt door de parasitaire effecten van de structuur.

$$|M(f)|^2 = \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_{par}} \right)} \right) \left(\frac{f_r^4}{(f_r^2 - f^2)^2 + \left(\frac{g}{2p} \right)^2 f^2} \right) \quad (4.15)$$

Gezien het proefschrift vooral mikt op het bepalen van laserparameters aan de hand van “eenvoudige” metingen en gezien de informatie-inhoud van deze meting met betrekking tot de fysische laserparameters overeenkomt met de informatie-inhoud van de relatieve intensiteitsruismeting, wordt er behalve een beschrijving van het resultaat, geen uitgebreide aandacht gegeven aan deze meting.

4.5.3 FM-modulatie

Naast een modulatie van de intensiteit van laserdiodes, kan ook de optische frequentie van een laserdiode gemoduleerd worden. Deze FM-modulatietechnieken worden vooral gebruikt bij coherente communicatiesystemen, die tegenwoordig door het opkomen van de

WDM-technieken op de achtergrond geplaatst zijn. Om die reden wordt er dan ook verder geen aandacht aan dit fenomeen besteed in het kader van dit proefschrift.

4.5.4 AM-FM koppeling

Naast de zuivere AM-modulatie en de FM-modulatie van laserdiodes, is vooral het verband tussen beide van belang. Zoals reeds aangegeven bij de bespreking van de ruisfenomenen in laserdiodes, bestaat er een koppeling tussen amplitudevariatiën en fase- of frequentievariatiën. Hierdoor zal de golflengte van de laserdiode veranderen wanneer de amplitude van het laserlicht gemoduleerd wordt. Dit fenomeen wordt “*chirp*” genoemd en wordt gekarakteriseerd door middel van de lijnbreedteverbredingsfactor a , die reeds vermeld werd bij de bespreking van de lijnbreedte (sectie 4.4.3).

Het bepalen van de *chirp* en de lijnbreedteverbredingsfactor kan op verschillende manieren gebeuren, o.a. zoals uitdrukking (4.13) aangeeft, uit de meting van de AM en FM-responsie van de laser. Maar ook andere technieken zoals het gebruik van dispersieve optische vezel in combinatie met numerieke modellen voor de transmissie [4.37] [4.38], het gebruik van interferometrie d.m.v. een etalon [4.39] of een Mach-Zehnder-structuur [4.40]. Gezien het gaat om een koppeling tussen AM- en FM-modulatie, is het zelfs mogelijk om de drie fenomenen tegelijkertijd te bepalen [4.41].

4.6 Besluit

In dit hoofdstuk werd een overzicht gegeven van de belangrijkste parameters van een laserdiode en de bestaande methodes om ze te bepalen. Dit gebeurde in drie stappen: de parameters van de golfgeleider, de parameters die het statisch gedrag beschrijven en de parameters die het dynamisch gedrag beschrijven.

-
- [4.1] B.W. Hakki T.L. Paoli, “CW degradation at 300 K of GaAs double-heterostructure junction lasers. II Electronic gain”, J. Appl. Phys, 44-9,1973, pp 4113-4119
 - [4.2] P.A. Andrekson, N.A. Olsson, T. Tanbun-ek, R.A. Logan, D. Coblentz, H. Temkin, “Novel technique for determining internal loss of individual semiconductor lasers”, Ell. Lett., vol 28, 1992 pp 171
 - [4.3] E.A. Avrutin, I.E. Chebunina, I.A. Eliashevitch, S.A. Gurevich, G.E. Shtengel, "TE and TM optical gains in AlGaAs/GaAs single QW lasers", Semicond. Sci. Technol., 8-1, 1993, pp. 80-87
 - [4.4] G.E. Shtengel, D.A. Ackerman, "Internal optical loss measurements in 1.3 um InGaAsP lasers", Ell. Lett., 31-14, 1995, pp. 1157-1159
 - [4.5] D.A. Ackerman, G.E.Shtengel, M.S. Hybertsen, P.A. Morton, R.F. Kazarinov, T. Tanbun-Ek, R.A. Logan, "Analysis of gain determining T0 in 1.3 semiconductor lasers", J. of selected topics in QE, 1-2, 1995, pp. 250-263
 - [4.6] M. Asada, Y. Suematsu, “Density-matrix theory of semiconductor lasers with relaxation broadening model-gain and gain suppression in semiconductor lasers”, JQE, 21, 1984, pp. 434-442
 - [4.7] G. Morthier, P. Vankwikelberge, “Handbook of distributed feedback laser diodes”, Artech House, inc., 1997]

-
- [4.8] F. Girardin, G.H. Duan, C. Chabran, P. Gallion, M. Blez, M. Allovon, "Determination of non linear gain coefficient of semiconductor lasers from above threshold spontaneous emission measurement", *Phot. techn. Lett*, 6-8, 1994, pp. 894-896
- [4.9] J.R. Biard, W.N. Carr, B.S. Reed, "Analysis of a GaAs laser", *Trans. Metall. Soc. AIME*, 1964, 230, pp.286-290
- [4.10] H.C. Casey, M.B. Panish, W.O. Schlosser, T.L. Paoli, "GaAs-Al_xGa_{1-x}As heterostructure laser with separate optical and carrier confinement", *J. Appl. Phys*, 45-1, 1974, pp. 322-333
- [4.11] L.J.P. Ketelsen, "Simple technique for measuring cavity loss in semiconductor lasers.", *Ell. Lett.*, 30-17, 1994, pp 1422-1424
- [4.12] H. Kogelnik, C. Shank, "coupled wave theory of DFB lasers", *J. Appl. Physics*, 1972, 43, pp. 2327-2335
- [4.13] H. Okuda, J. Kinoshita, Y. Hirayama, Y. Uematsu, "Longitudinal mode characteristics for 1.3um InGaAsP/InP DFB lasers just below the threshold current", *ibid.*, 1983, 19, pp. 362-363
- [4.14] W. Streifer, D. Scifres, R. Burnham, "Coupling coefficients for distributed feedback single and double heterostructure diode lasers", *JQE*, Vol. 11, 1975, pp. 867-873
- [4.15] Y. Hirayama et al, "Determination of Coupling coefficient of DFB lasers by a newly proposed method", *Ell. Lett.*, 23-3, 1987, pp. 101-103
- [4.16] A.R. Adams, M. Asada, Y. Suematsu, Y. Itaya and S. Arai, "The temperature dependence of the efficiency and threshold current of InGaAsP lasers related to intervalence band absorption", *J. Appl. Phys*, 19, 1980, pp. 621-624
- [4.17] M. Asada, A.R. Adams, K.E. Stubkjaer, Y. Suematsu, Y. Itaya and S. Sarai, "The temperature dependence of the threshold current of InGaAsP/InP DH lasers", *JQE*, 17, 1981, pp. 611-619
- [4.18] M. Asada and Y. Suematsu, "The effects of loss and nonradiative recombination of the temperature dependence of threshold current in 1.5-1.6 μm InGaAsP/InP lasers", *JQE*, 19, 1983, pp. 917-923
- [4.19] M. Yano, H. Nishi and M. Takusagawa, "Temperature characteristics of threshold current in InGaAsP/InP double heterostructure lasers", *J. Appl. Phys*, 51, 1980, pp. 4022-4028
- [4.20] Y. Zou, J.S. Osinski, et al., "Experimental study of Auger recombination, gain and temperature sensitivity of 1.5 μm compressively strained semiconductor lasers", *JQE*, 29, 1993, pp. 1565-1575
- [4.21] D.A. Ackerman, G.E.Shtengel, M.S. Hybertsen, P.A. Morton, R.F. Kazarinov, T. Tanbun-Ek, R.A. Logan, "Analysis of gain determining T0 in 1.3 semiconductor lasers", *J. of selected topics in QE*, 1-2, 1995, pp. 250-263
- [4.22] J.D. Evans, J.G. Simons, "New insight into the temperature sensitivity of the threshold current of long wavelength semiconductor lasers", *Proc. Of the IEEE Semiconductor laser conference, Hawaii 1994*, pp. 237-238.
- [4.23] J. Buus, W.J. Stewart, J. Haes, J. Willems, R.G. Baets, "Spot size expansion for laser-to-fibre coupling using an integrated multimode coupler", *JLT*, 11-4, 1993, pp. 582-588
- [4.24] G. Vermeire, F. Vermaerke, R. Baets, P. Van Daele, P. Demeester, "Low threshold current 780 nm InAlGaAs/AlGaAs strained QW lasers and the integration with a passive, non-absorbing tapered mode-size transformer", *ISLC94*, , 1994, pp. 129-130
- [4.25] L.N. Langley, D.J. Robbins, P.J. Williams, T.J. Reid, I. Moerman, X. Zhang, P. Van Daele, P. Demeester, "DFB laser with integrated waveguide taper grown by shadow masked MOVPE", *Ell. Lett.*, 32, 1996, pp. 738-739
- [4.26] K. Naganuma, "Semiconductor laser cavity dispersion measurement based on interferometric crosscorrelation of amplified spontaneous emission", *App. Phys. Lett*, 64-3, 1994, pp. 261-263
- [4.27] C. H. Henry, "Theory of the linewidth of semiconductor lasers", *JQE*, 18-2, 1982, pp. 259-264

-
- [4.28] M.W. Fleming, A. Mooradian, "Fundamental line broadening of single-mode (GaAl)As diode lasers", *Appl. Phys. Lett.*, 38, pp. 511, 1981
- [4.29] M. Fujise, M. Ichikawa, "Linewidth measurements of a 1.5 μ m range DFB laser", *Ell. Lett.*, 21-6, 1985, pp. 231-232
- [4.30] J. A. Constable, I.H. White, "Laser linewidth measurement using a Mach-Zehnder interferometer and an optical amplifier", *Ell. Lett.*, 30-2, 1994, pp. 140-142
- [4.31] T. Okoshi, K. Kikuchi, A. Nakayama, "Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum", *Ell. Lett.*, 16-16, 1980, pp. 630-631
- [4.32] H. Tsuchida, "Simple technique for improving the resolution of the delayed self heterodyne method", *Optics Letters*, 15-11, 1990, pp. 640-642
- [4.33] J.W. Dawson, N. Park, K.J. Vahala, "An improved delayed self heterodyne interferometer for linewidth measurements", *Phot. techn. Lett.*, 4-9, 1992, pp. 106-1066
- [4.34] L.E. Richter, H.I. Mandelberg, M.S. Kruger and P.A. McGrath, "Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times", *JQE*, 22-11, 1986, pp. 2070-2074
- [4.35] M. Okai, T. Tsuchiya, A. Takai and N. Chinone, "Factors limiting the spectral linewidth of CPM-MQW-DFB lasers", *Phot. techn. Lett.*, 4, 1992, pp. 526-528
- [4.36] R. Nagarajan, T. Fukushima, J. Bowers, R. Geels and L. Coldren, "High speed InGaAs/GaAs strained multiple quantum well lasers with low damping", *Appl. Phys. Lett.*, 58-21, 1991, pp. 2326-2328
- [4.37] A. Røyset, L. Bjerkan, D. Myhre, L. Hafskjaer, "Use of dispersive optical fibre for characterisation of chirp in semiconductor laser", *Ell. Lett.* Vol. 30, 1994, pp. 710-712
- [4.38] R. Srinivasan and J. Cartledge, "On using fibre transfer functions to characterise laser chirp and fibre dispersion", *Phot. Tech. Lett.* Vol. 7, 1995, pp. 1327-1329
- [4.39] S. Tammela, H. Ludvigsen, T. Kajava, M. Kaivola, "Time-resolved frequency chirp measurement using a silicon-wafer etalon", *Phot. Techn. Lett.*, Vol. 9, 1997, pp. 475-477
- [4.40] A. Saavedra, R. Passy, J.P. Von der Weid, E. Manganote, A. Bordeaux, "Measurements of chirp and linewidth enhancement factor of DFB-semiconductor lasers using a self-homodyne interferometric system", *IEEE Int. Microwave and Opto-electronics conference*, 1997, Natal-Brazil
- [4.41] U. Krüger, K. Krüger, "Simultaneous measurement of the linewidth, linewidth enhancement factor and FM and AM Response of a semiconductor laser", *JLT*, Vol. 13.1995, pp. 592-597

HOOFDSTUK 5

Geavanceerde parameterextractie bij laserdiodes

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de meer geavanceerde methodes voor parameterextractie bij laserdiodes besproken. In tegenstelling tot de methodes besproken in het vorige hoofdstuk gaat het hier om relatief eenvoudige metingen die een hoge informatie-inhoud bezitten. Er is echter een complexe parameterextractie en een fitprocedure nodig om de metingen om te zetten in termen van bruikbare parameters.

In het eerste deel van dit hoofdstuk wordt de parameterextractie aan de hand van het spontane emissie-spectrum behandeld. Na de algemene beschrijving van de procedure, wordt de praktische situatie voor een DFB- en een Fabry-Perot-laserdiode bestudeerd. De parameterextractie op basis van het spontane emissie-spectrum voor een DBR-laserdiode komt aan bod in hoofdstuk 8. Het tweede deel van het hoofdstuk behandelt de parameterextractie op basis van het relatieve intensiteitsruisspectrum.

Na de bespreking van de extractiemethodes voor één laserdiode, wordt in het derde deel van het hoofdstuk de gecombineerde situatie bekeken. Hierbij worden eerst de mogelijkheden tot het combineren van verschillende metingen op één laserdiode beschreven. Daarna komt ook de situatie aan bod waarbij niet alleen verschillende metingen maar ook nog eens verschillende laserdiodes gecombineerd worden.

5.2 Extractie uit het spontane emissie-spectrum

De vorm van het spontane emissie-spectrum van laserdiodes wordt bepaald door de gehele caviteit ervan en bevat dan ook veel informatie over de eigenschappen van die caviteit. Het is echter niet mogelijk om alle eigenschappen rechtstreeks uit het spontane emissie-spectrum te bepalen. Gezien de complexe combinatie van de vele parameters is de enige mogelijkheid het fitten van een theoretisch model aan het opgemeten spectrum.

Eerst worden een aantal algemene aspecten van het fitten op spontane emissie-spectra gegeven, vervolgens wordt een overzicht gegeven van de parameterextractie bij een DFB-laserdiode en tenslotte wordt aan de hand van een spontane emissie-spectrum van een Fabry-Perot-laserdiode aangegeven dat de wiskundige “valkuilen” van het fitten niet altijd even duidelijk te zien zijn.

5.2.1 Algemene aspecten van fitten op het spontane emissie-spectrum

5.2.1.1 De modellen

Om te kunnen fitten is het nodig om een analytisch model van het spontane emissie-spectrum van de laserdiode op te stellen. Een niet-analytische uitdrukking kan theoretisch ook gebruikt worden, maar zal door zijn langere rekentijd het numeriek fitten sterk bemoeilijken. Bovendien is het voor de meeste lasers mogelijk om, mits een paar vereenvoudigingen, een relatief eenvoudige uitdrukking te bepalen startende van een transfertmatrixbeschrijving van de lasercaviteit. Deze methode is reeds meermaals gebruikt om modellen af te leiden voor DFB [5.1], [5.2], [5.3] en DBR laserdiodes [5.4].

Algemeen kan worden opgemerkt dat de analytische modellen met hun fysische parameters meestal een groter aantal parameters hebben dan kan worden gefit. Zo komt in de modellen de modale optische versterking voor, die altijd uitgedrukt wordt als een combinatie van de materiaalversterking, de vulfactor en de interne verliezen (zoals aangegeven in uitdrukking (4.2)). Dit impliceert dat enkel de combinatie van die parameters kan bepaald worden en niet de parameters afzonderlijk. Een ander voorbeeld is de combinatie van de periode van een diffractierooster en de effectieve brekingsindex, gezien enkel de combinatie ervan het reflectiespectrum van het rooster bepaalt. Een aantal voorbeelden hiervan worden gegeven bij de bespreking van het DFB-model in dit hoofdstuk en bij de bespreking van de modellen voor DBR- en Fabry-Perot-laserdiodes in hoofdstuk 8.

Naast de combinaties van parameters, zijn er ook wiskundige fenomenen die ervoor kunnen zorgen dat de gevonden oplossing wel een goede fit vormt, maar geen realistische oplossing. Voor een voorbeeld van een dergelijk fenomeen wordt er verwezen naar de bespreking van het spontane emissie-spectrum bij Fabry-Perot laserdiodes.

5.2.1.2 Het fitten

Om een fitting met succes te voltooien, is het belangrijk om de startwaarden van de modellen met voldoende zorg te kiezen. Op die manier ligt de startpositie reeds in de buurt van de te bepalen oplossing, vermindert de rekentijd van het fitalgoritme en vergroot de kans dat de gevonden oplossing een fysisch correcte oplossing is.

Zoals aangegeven in hoofdstuk 2 (sectie 2.5), kan gebruik gemaakt worden van extra termen in de kostenfunctie om de kansen op het vinden van fysische oplossingen te verhogen.

5.2.1.3 De betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de oplossing

De vele dimensies, de complexiteit van het model en de werking van het optimaliseringsalgoritme maken het zo goed als onmogelijk om aan de hand van de waarde van de kostenfunctie een uitspraak te doen over de kwaliteit en de absolute nauwkeurigheid van de oplossing. Zoals reeds vermeld is het enkel een wiskundig proces dat op een gegeven ogenblik beëindigd wordt. De kwaliteit van de oplossing daarentegen hangt af van de uiteindelijke interpretatie van de gegevens.

Niettemin kan er toch iets gezegd worden over de gevonden oplossing. Gezien het gaat om fysische modellen en echte componenten, kan er een tweede fit uitgevoerd worden bij licht verschillende condities. Zo kan er een tweede spontane emissie-spectrum opgemeten worden bij een andere instelstroom. Een fit op dit tweede spectrum zal een nieuw set parameters opleveren, waarvan er een aantal identiek moeten zijn aan de waarden gevonden door de eerste

fit. Parameters zoals de reflectiecoëfficiënten en de koppelingscoëfficiënt van het diffractierooster zijn immers onafhankelijk van de instelstromen. Andere parameters zoals de optische versterking moeten op een welbepaalde manier veranderen als functie van de stroom, zo moet de optische versterking toenemen bij groter wordende stroom. Indien de parameters in de verschillende fits de juiste trends volgen, geeft dit duidelijk aanleiding tot een groter vertrouwen over de waarde van de parameters.

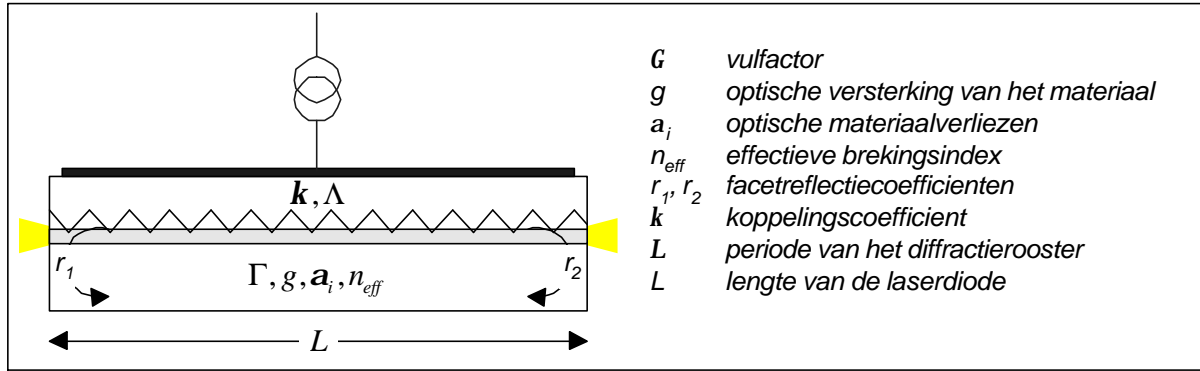
Naast het bekijken van verschillende resultaten onder verschillende condities kan ook nagegaan worden in hoeverre het model (of correcter de kostenfunctie) in staat is om een bepaalde parameter te bepalen. Doordat de diverse parameters op een andere wiskundige manier in het model staan, zal eenzelfde variatie van die parameters een andere impact hebben op het resultaat. Zo zal een kleine verandering in de effectieve brekingsindex ervoor zorgen dat het Bragg-rooster op een heel andere golflengte zal reflecteren, hetgeen drastische veranderingen teweegbrengt in het berekende spectrum. In het kader van dit proefschrift werd een dergelijke analyse uitgevoerd voor een DFB-laserdiode, de resultaten hiervan zijn te vinden in [5.5].

Een mogelijkheid om toch een idee te krijgen van de nauwkeurigheid van de parameters is bekijken in hoeverre een oplossing kan gevonden worden bij een variatie van de te onderzoeken parameter. Hierbij is het nodig om de te onderzoeken parameter te variëren en telkens de fitprocedure te doorlopen waarbij alle parameters vrij zijn behalve de te onderzoeken parameter. Er wordt met andere woorden bekeken in hoeverre de andere parameters kunnen compenseren voor de afwijking op de te onderzoeken parameter. Eenmaal de nieuw gevonden oplossing een bepaalde hoeveelheid (de foutgrens) afwijkt, kan er besloten worden dat de nauwkeurigheidsgrens van de parameter bereikt is. Het grote nadeel van deze procedure is dat er voor elke parameter een groot aantal fitprocedures moet doorlopen worden, hetgeen heel omslachtig en tijdrovend is. Daarnaast is er ook de vraag in hoeverre enkel de waarde van kostenfunctie kan gebruikt worden om de verschillende oplossingen te vergelijken.

5.2.2 *Spontane emissie-spectrum gebaseerde extractie bij DFB-laserdiodes*

Bij een DFB-laserdiode wordt er een diffractierooster aangebracht in de caviteit, om de golflengte te stabiliseren. Naast de parameters die de golfgeleider beschrijven zoals de vulfactor (G), de optische versterking (g) en verliezen (α_i), de effectieve brekingsindex (n_{eff}), de lengte (L) en de reflectiecoëfficiënten (r_1 en r_2), zal het model bijkomende parameters bevatten die het rooster beschrijven. Dit zijn de periode van het diffractierooster (Λ) en de koppelingscoëfficiënt (k), die respectievelijk beschrijven hoe het rooster eruitziet en hoe sterk het diffractierooster de voorwaarts propagerende golf koppelt aan de achterwaarts propagerende golf.

De koppeling tussen beide golven via het diffractierooster treedt op doordat de effectieve index periodisch is ten gevolge van het rooster (indexkoppeling). Als het diffractierooster ook (ten dele) aanwezig is in het actieve deel van de golfgeleider, wordt ook de optische versterking (ten dele) periodisch, hetgeen tot een koppeling leidt. In dat geval spreekt men van koppeling door optische versterking. Gezien in de berekeningen aan de hand van complexe getallen de effecten van de effectieve brekingsindex en de optische versterking zich respectievelijk voordoen als een imaginair en een reëel deel van de propagatie, is ook de koppelingscoëfficiënt een complex getal. Met name de indexkoppeling wordt gegeven door het reële deel en de koppeling ten gevolge van optische versterking door het imaginaire deel.



Figuur 5-1 : Schematische voorstelling van een DFB-laserdiode met de verschillende parameters van het model

5.2.2.1 Het spontane emissie-spectrummodel

Als model voor het spontane emissie-spectrum van een DFB-laserdiode, werd in dit werk het model voorgesteld door T. Makino en J. Glinski gebruikt [5.6]. Dit model berekent het spontane emissie-spectrum met behulp van de transfertmatrixanalyse methode. Voor de eigenlijke berekening wordt er verwezen naar de publicatie, maar het is toch interessant en relevant om het eindresultaat gegeven door uitdrukking (5.1), naderbij te bekijken.

$$P_{ASE}(I) = C(1 - |r_2|^2) \frac{\int_0^L (|F_L|^2 + |F_R|^2) dz}{|RNT|^2} \quad (5.1)$$

waarbij :

$$\begin{aligned} F_L &= a_{22} + r_1 a_{21} \\ F_R &= a_{12} + r_1 a_{11} \end{aligned} \quad (5.2)$$

en

$$RNT = a_{22}(L) + r_1 a_{21}(L) - r_2 a_{12}(L) - r_1 r_2 a_{11}(L) \quad (5.3)$$

De coëfficiënten van de transfertmatrix (a_{11} , a_{12} , a_{22} , a_{21}) worden gegeven door :

$$\begin{aligned} a_{11} &= \left(\cosh(\mathbf{d}z) - j\Delta\mathbf{b} \frac{\sinh(\mathbf{d}z)}{\mathbf{d}} \right) e^{-j\mathbf{b}_g z} \\ a_{12} &= j\mathbf{k} \frac{\sinh(\mathbf{d}z)}{\mathbf{d}} e^{-j\mathbf{b}_g z} \\ a_{22} &= \left(\cosh(\mathbf{d}z) + j\Delta\mathbf{b} \frac{\sinh(\mathbf{d}z)}{\mathbf{d}} \right) e^{+j\mathbf{b}_g z} \\ a_{21} &= -j\mathbf{k} \frac{\sinh(\mathbf{d}z)}{\mathbf{d}} e^{+j\mathbf{b}_g z} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Hierbij is \mathbf{d} gegeven door :

$$\mathbf{d} = \sqrt{\mathbf{k}^2 - (\Delta\mathbf{b})^2} \quad (5.5)$$

en is Δb gegeven door:

$$\Delta b = \frac{2pn_{eff}}{\mathbf{l}} - \mathbf{b}_g + j \frac{\Gamma g - \mathbf{a}_{int}}{2} \quad (5.6)$$

$$\mathbf{b}_g = \frac{\mathbf{p}}{\Lambda} \quad (5.7)$$

Alvorens de uitdrukking (5.1) kan gebruikt worden in een parameterextractieproces moet er ook een model gegeven worden voor de optische versterking en de effectieve brekingsindex. Hierbij kan verondersteld worden dat enkel statisch gedrag wordt beschreven en mogen de temperatuurseffecten verwaarloosd worden gezien de temperatuur van de laser tijdens de meting gestabiliseerd wordt. Dit levert dan de volgende uitdrukkingen op voor de optische versterking (5.8) en de effectieve brekingsindex (5.9).

$$g = g_0 - g_2 \left(E - E_{piek} \right)^2 \quad (5.8)$$

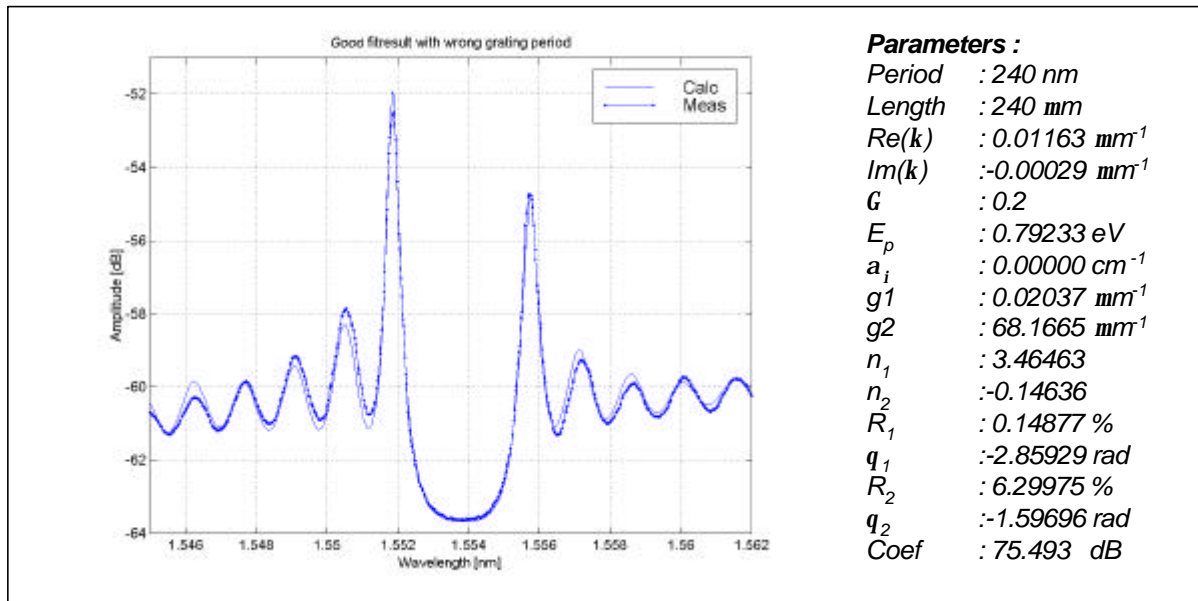
$$n_{eff} = n_0 + n_1 \mathbf{l} \quad (5.9)$$

5.2.2.2 Evaluatie van het spontane emissie-spectrummodel van de DFB-laserdiode

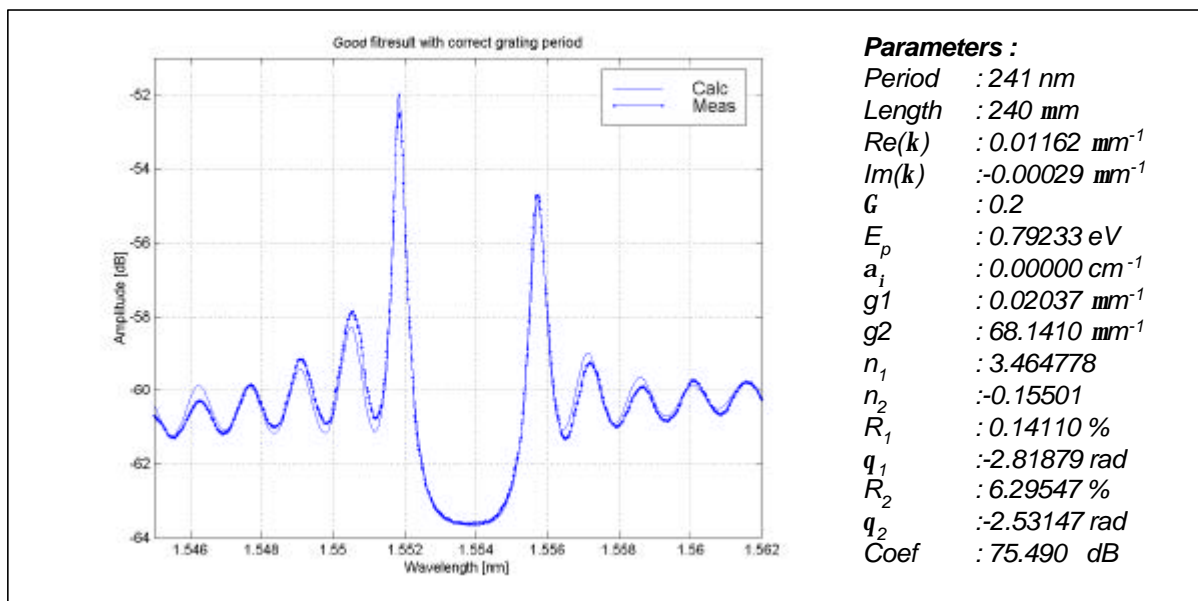
A. PARAMETERCOMBINATIES

Net zoals alle ASE-modellen, heeft het numerieke model voor de DFB-laserdiode een aantal eigenschappen waardoor niet alle parameters kunnen geëxtraheerd worden. Uitdrukking (5.6) geeft aan dat zoals in elk laserdiodemodel de optische versterking en de interne verliezen altijd gecombineerd voorkomen, hetgeen een onafhankelijke extractie belet. De vulfactor (\mathbf{G}) en de interne optische verliezen (\mathbf{a}_i) kunnen aanzien worden als “schaalfactoren” voor de optische versterking van het materiaal t.o.v. de modale optische versterking.

Gezien de DFB-laserdiode gebruik maakt van een ingebouwd diffractierooster, zal ook hier enkel de combinatie van het diffractierooster en de effectieve brekingsindex van belang zijn, zoals wordt aangegeven door uitdrukkingen (5.6) en (5.7). Met andere woorden een foutief ingeschatte roosterperiode levert toch een goede fit op door een compensatie van de effectieve brekingsindex, zoals te zien is in Figuur 5-2 en in Figuur 5-3. Beide figuren zijn bekomen door te fitten op hetzelfde spontane emissie-spectrum, enkel de waarde van de roosterperiode verschilt. In beide gevallen is de Bragg-golflengte $1.554 \mu\text{m}$ ($\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda$); zoals verwacht, wordt het verschil in roosterperiode (0.240 en $0.241 \mu\text{m}$) volledig opgevangen door een verandering in de effectieve brekingsindex bij die golflengte (respectievelijk 3.2371 en 3.2239).



Figuur 5-2 : Een voorbeeld van een “goede” fit, niettegenstaande een foutieve waarde voor de roosterperiode werd gebruikt.



Figuur 5-3 : Een voorbeeld een “goede” fit, waarbij een correcte waarde voor de roosterperiode werd gebruikt

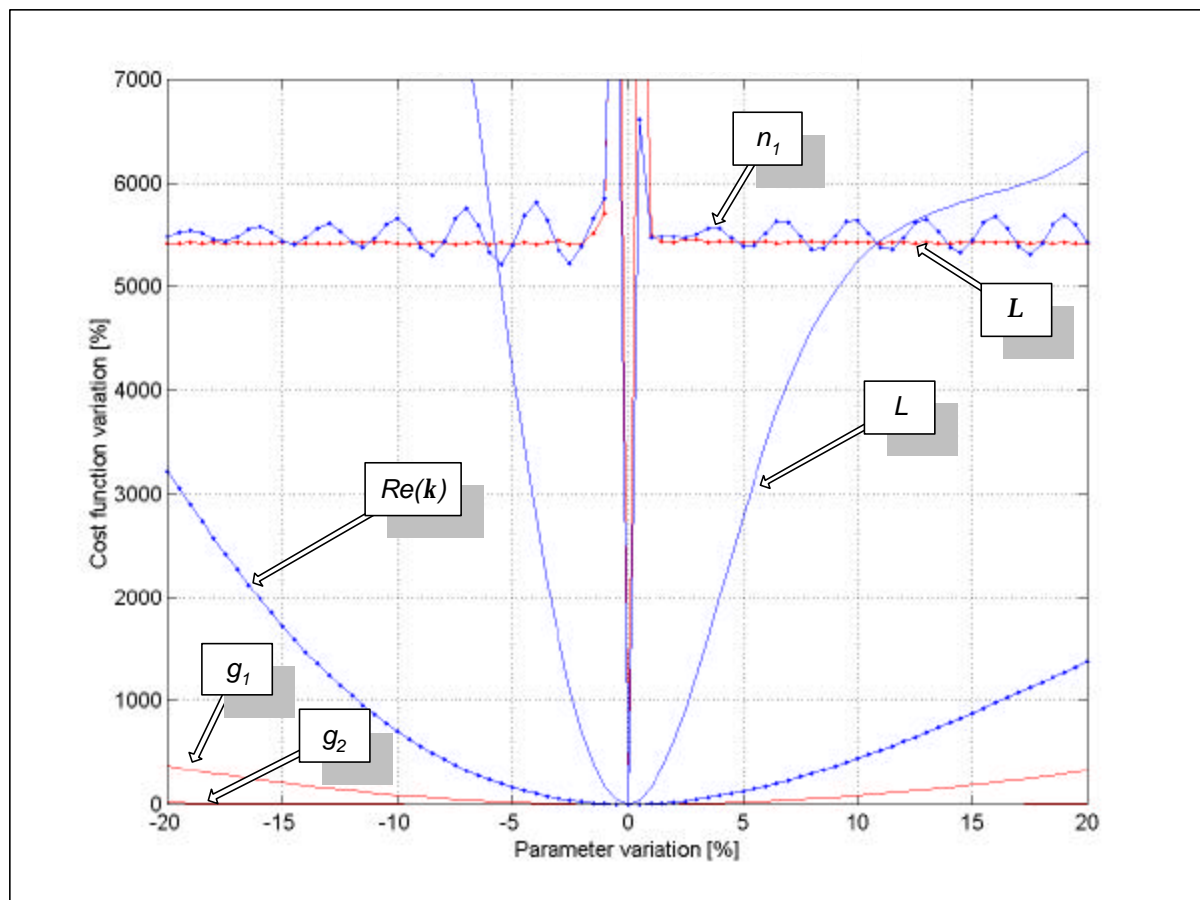
B. GEVOELIGHEID VAN DE KOSTENFUNCTIE AAN DE PARAMETERS

Om de gevoeligheid van de kostenfunctie te bestuderen, werden voor een gevonden oplossing, de parameters afzonderlijk gevarieerd en werd de invloed op de kostenfunctie berekend. De parameters werden over een identiek bereik van -20 tot +20 % gevarieerd, de verandering van de kostenfunctie werd ook procentueel uitgedrukt ten opzichte van de resterende waarde in de gevonden oplossing, resultaten hiervan zijn te zien in Figuur 5-4.

Uit de figuur blijkt dat de kostenfunctie niet even gevoelig is aan elke parameter. Het is duidelijk te zien dat de periode van het diffractierooster (L) en de effectieve brekingsindex

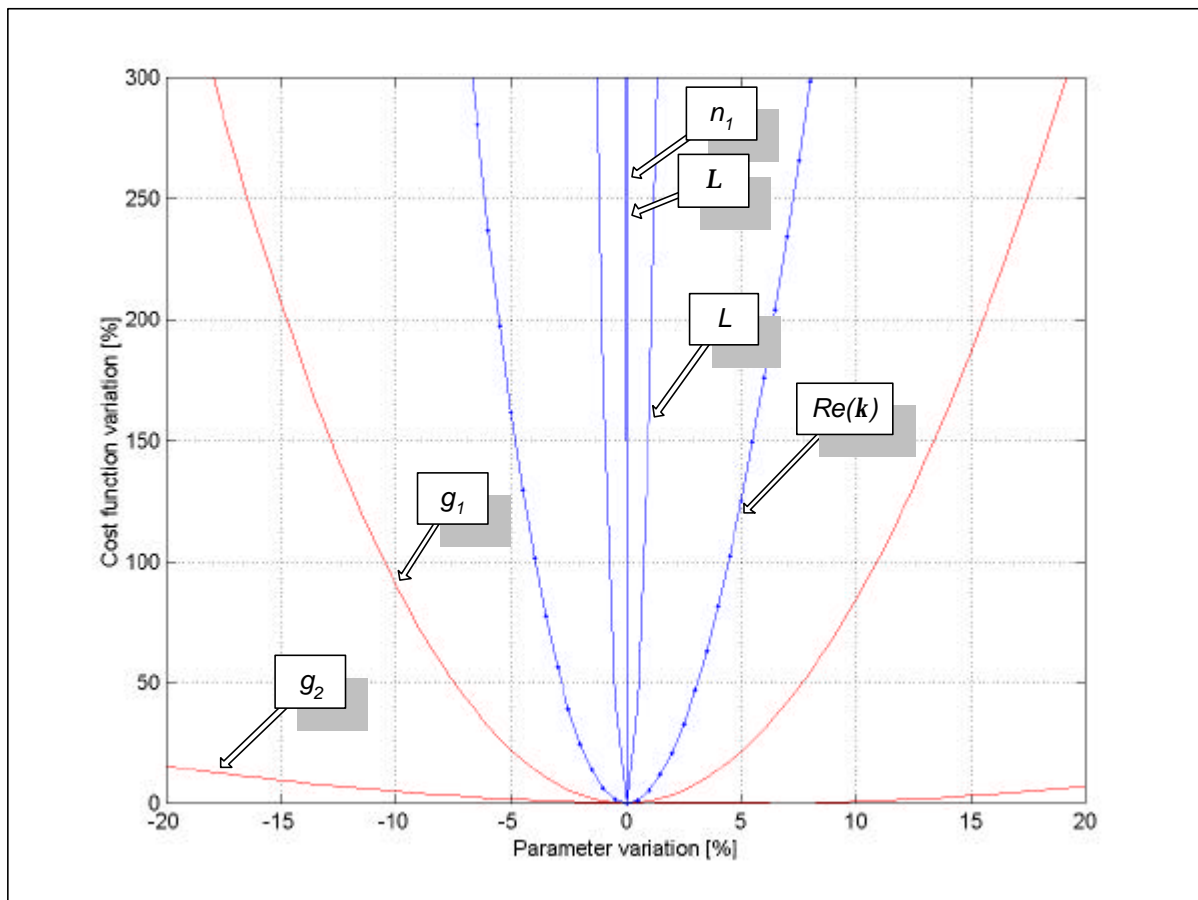
(op de figuur de golflengte-onafhankelijke component ervan, n_1) een gelijkaardige invloed hebben op de kostenfunctie. Dit is logisch gezien het de combinatie van beiden is die de golflengte bepaald waar het Bragg-diffractierooster reflecteert. Een kleine verandering van de parameter, doet de reflectiepiek naar een andere golflengte verschuiven en de waarde van de kostenfunctie neemt sterk toe. Eenmaal de activiteit van het diffractierooster buiten het berekende golflengtebereik ligt, verandert de waarde van kostenfunctie niet veel meer, het berekende spectrum ziet er dan uit als een Fabry-Perot-spectrum. In dat geval heeft de roosterperiode geen invloed meer op het berekende spectrum en bijgevolg ook geen invloed meer op de waarde van de kostenfunctie. De effectieve brekingsindex daarentegen zorgt nog voor een verschuiving van de modes in het Fabry-Perot-spectrum, hetgeen het periodiek effect in de kostenfunctie verklaart.

Dit gedrag van de kostenfunctie ten opzichte van de effectieve brekingsindex en de roosterperiode, verklaart ook waarom een goede startwaarde van belang is voor deze parameters. Eenmaal de parameters, of correcter hun combinatie, ervoor zorgt dat het effect van het Braggrooster buiten het berekende gebied ligt, is de waarde van kostenfunctie niet alleen heel groot maar is het verloop van de kostenfunctie voor die parameters heel vlak. Er is voor de effectieve brekingsindex en de roosterperiode geen gradiënt meer aanwezig die het optimaliseringsalgoritme naar de juiste oplossing zou brengen. Het is met andere woorden niet enkel inefficiënt om de startwaarden van deze parameters volledig vrij te kiezen, een slechte keuze maakt het vinden van een goede oplossing zelfs bijna onmogelijk.



Figuur 5-4: De procentuele veranderingen van de waarde van de SQE-kostenfunctie bij verandering van een aantal parameters.

Alhoewel op het eerste zicht lijkt dat de koppelingscoëfficiënt en de coëfficiënten voor de optische versterking geen groot effect hebben op de kostenfunctie, hetgeen zou betekenen dat ze niet goed bepaald kunnen worden, is de realiteit toch anders. Door het enorme effect van de brekingsindex en de roosterperiode is het uitzicht van de grafiek verstoord. Indien de grafiek tot meer normale proporties teruggebracht wordt zoals te zien is in Figuur 5-5, blijkt duidelijk dat de waarde van de koppelingscoëfficiënt en de coëfficiënten voor de optische versterking toch naar behoren kunnen bepaald worden. Het is enkel de waarde g_2 die de kromming van de optische versterking beschrijft die minder nauwkeurig kan bepaald worden. Dit is te begrijpen vanuit het feit dat de optimalisering uitgevoerd wordt op een heel beperkt golflengtegebied rond de stopband. Indien dit golflengtegebied zou uitgebreid worden, zou de waarde van die parameter beter bepaald kunnen worden.



Figuur 5-5 : Detail van de veranderingen in de waarde van de SQE-kostenfunctie bij veranderingen van een aantal parameters.

5.2.2.3 Gebruikte fitprocedure

Door het groot aantal parameters is het natuurlijk niet mogelijk om vanuit willekeurige startwaarden te vertrekken en te hopen dat het optimaliseringsalgoritme erin slaagt de goede oplossing te vinden. Door de vele lokale optima is het nodig de startvoorwaarden omzichtig te kiezen. Zo kan er bijvoorbeeld vanuit de kennis van de Bragg-golflengte en de roosterperiode een eerste orde benadering gemaakt worden voor de effectieve brekingsindex, door middel van uitdrukking (5.10).

$$\mathbf{I}_B = 2\Lambda n_{eff} \quad (5.10)$$

Eenmaal een eerste resultaat behaald wordt kunnen de hogere ordes die het model verfijnen toegevoegd worden. Eenmaal een goede fit gevonden is voor een bepaalde stroom, kan deze oplossing gebruikt worden om via een volledig automatische procedure verdere parameterextracties te doen op spontane emissie-spectra gemeten bij licht verschillende instelstromen.

5.2.3 Spontane emissie-spectrum gebaseerde extractie bij Fabry-Perot-laserdiodes

Gezien de eenvoudige structuur van de Fabry-Perot laserdiodes, kan heel wat informatie rechtstreeks uit het spontane emissie-spectrum bepaald worden. Zoals reeds meerdere keren aangehaald, levert de Hakki-Paoli-methode de modale optische versterking op en uit de afstand van de modes kan de groepsindex bepaald worden. Er kan echter ook een fit uitgevoerd worden op het spontane emissie-spectrum om de effectieve brekingsindex te bepalen en om een beter beeld te krijgen van de parametercombinaties. Door zijn eenvoudige structuur, is de Fabry-Perot-laserdiode en zijn spontane emissie-spectrummodel ook uiterst geschikt om een aantal wiskundige aspecten van het fitten op complexe modellen te illustreren.

5.2.3.1 Het spontane emissie-spectrummodel voor een Fabry-Perot-laserdiode

Om een analytisch model af te leiden voor het spontane emissie-spectrum van een Fabry-Perot laserdiode kan dezelfde theorie gebruikt worden die geïntroduceerd werd om het spontane emissie-spectrum model af te leiden voor een DFB-laserdiode. Gezien er in een Fabry-Perot laserdiode geen diffractierooster aanwezig is, moet de koppelingscoëfficiënt echter op nul gesteld worden. Enig rekenwerk levert de uitdrukking (5.11) op.

$$P_{ASE}(\mathbf{I}) = \frac{r_1^2 e^{(\Gamma g - a_i)L} - e^{-(\Gamma g - a_i)L} + 1 + r_1^2}{(\Gamma g - a_i) \left(2r_1 r_2 + e^{-(\Gamma g - a_i)L} + r_1^2 r_2^2 e^{(\Gamma g - a_i)L} - 4r_1 r_2 \cos^2\left(\frac{2pn_{eff}}{\mathbf{I}} L\right) \right)} \quad (5.11)$$

Waarbij voor optische versterking en effectieve brekingsindex de modellen gegeven door uitdrukkingen (5.12) en (5.13) verondersteld worden.

$$g = g_0 - g_2 (E - E_{piek})^2 \quad (5.12)$$

$$n_{eff} = n_0 + n_1 \mathbf{I} \quad (5.13)$$

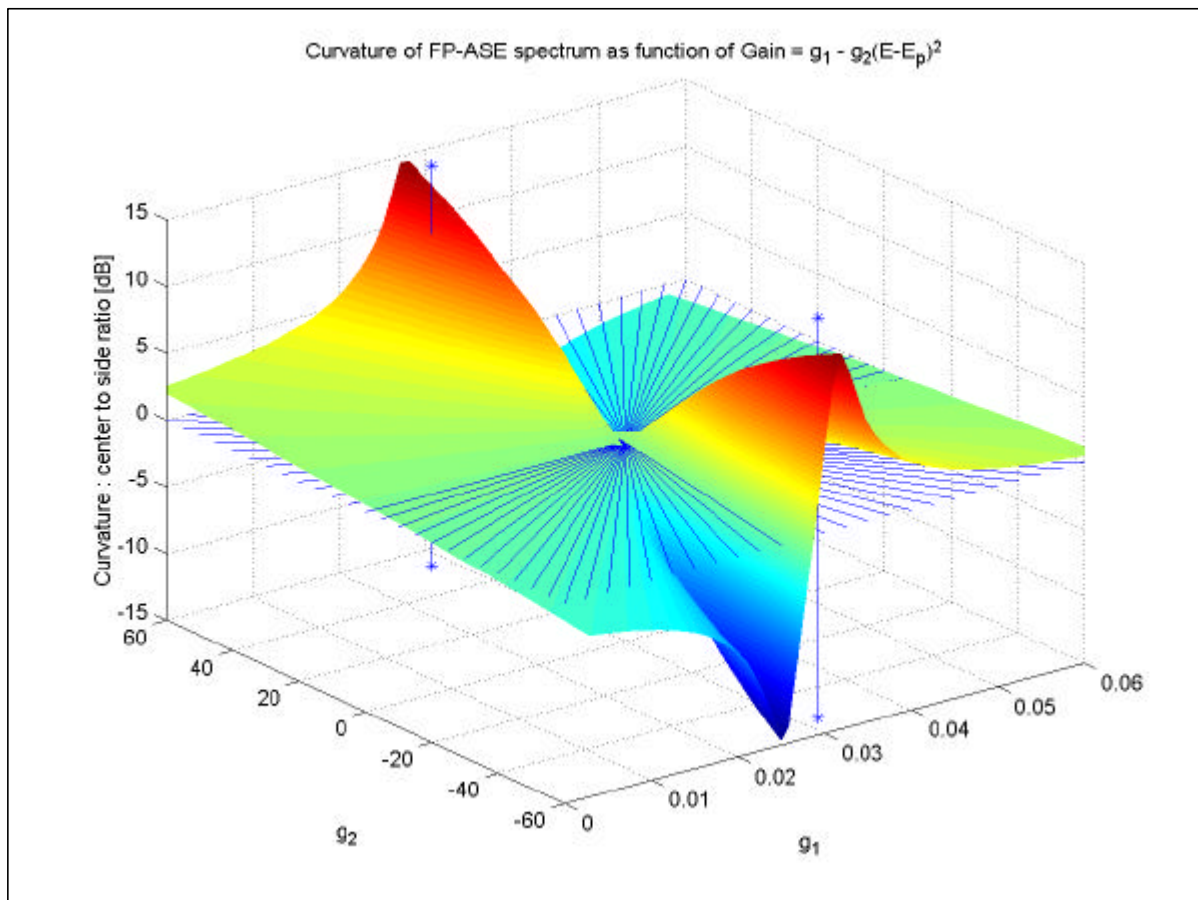
5.2.3.2 Evaluatie van het model

Zoals bij alle lasermodellen, komt enkel de modale optische versterking voor, hetgeen een onafhankelijke fit van de optische versterking van het materiaal, de vulfactor en de interne verliezen tegengaat.

Niettegenstaande uit (5.11) lijkt dat de twee reflectiecoëfficiënten r_1 en r_2 onafhankelijk kunnen worden gefit, leert de praktijk dat dit niet zo is. Wanneer er voor de parameters van het model realistische waarden gekozen worden, blijkt immers dat de teller van de uitdrukking min of meer constant is, hetgeen enkel de noemer overlaat als het fit-gevoelig stuk van de

uitdrukking. Daar komen de twee reflectiecoëfficiënten altijd gecombineerd voor, hetgeen een onafhankelijke fit verhindert.

Verder blijkt dat er ook een zekere wiskundige symmetrie bestaat van het model ten opzichte van de twee parameters voor de optische versterking : g_1 en g_2 . Dit aspect van het model wordt geïllustreerd in Figuur 5-6, waar de verhouding van de vermogens van een mode op de rand van het spectrum ten opzichte van een mode in het midden van het spontane emissie-spectrum van een Fabry-Perot-laserdiode als functie van de twee parameters g_1 en g_2 uitgezet zijn. Alle punten die boven het nulvlak uitsteken kunnen goede oplossingen zijn, waar het midden van het spectrum een grotere amplitude heeft dan de rand. De twee verticale lijnen in de figuur stellen de waarden voor van de optische materiaalversterkingsparameters die gebruikt zijn in Figuur 5-9 en Figuur 5-8.



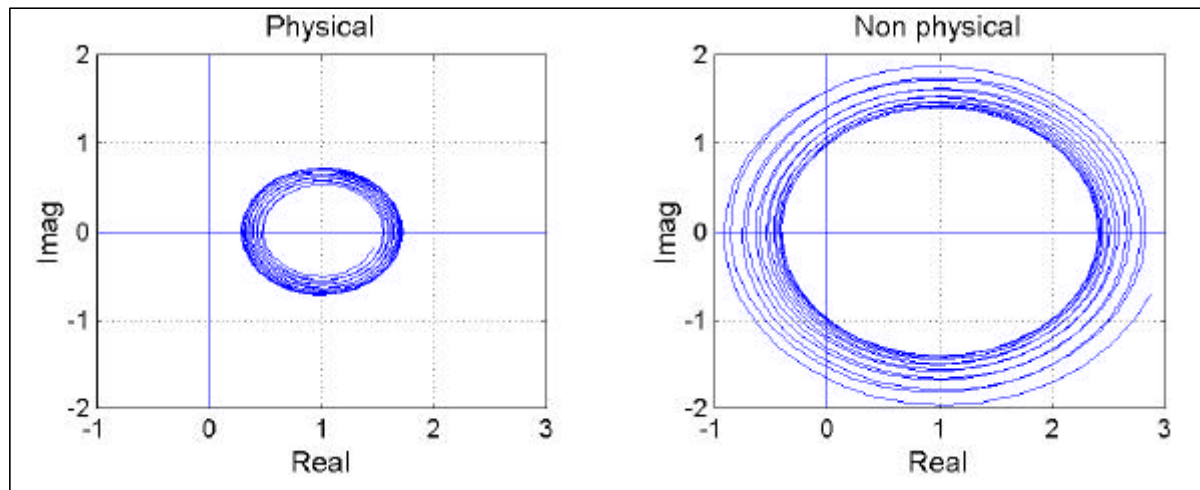
Figuur 5-6 : De verhouding van de vermogens van een mode op de rand van het spectrum ten opzichte van een mode in het midden van het spontane emissie-spectrum van een Fabry-Perotlaserdiode, als functie van de twee parameters die de optische versterking bepalen.

Het is duidelijk te zien dat het voorbeeld op de Figuur 5-9 van niet fysische oorsprong is. Dat de berekening met die waarden voor de optische versterkingsparameters toch een “goed” spectrum oplevert is te wijten aan het feit dat de golflengte-onafhankelijke optische versterkingsparameter (g_1) te groot is, hetgeen een duidelijke kromming veroorzaakt in de teller van uitdrukking (5.11). Op die manier neemt het resulterend spontane emissie-spectrum toch een “goede” vorm aan, waarvan de amplitude van de rand van het spectrum kleiner is dan de amplitude in het midden.

Om dit verschijnsel te verklaren, is het eenvoudiger om uitdrukking (5.11) te herschrijven in complexe notatie, dit levert dan uitdrukking (5.14) op. De oscillatie die in het spontane emissie-spectrum te zien is, is te wijten aan de noemer van de uitdrukking en kan gezien worden als een vector waarvan de lengte bepaald wordt door de reflectiecoëfficiënten en de optische versterking. Deze vector draait in het complexe vlak rond het punt (1,0) door een veranderende golflengte.

$$P_{ASE}(I) = \frac{r_1^2 e^{(\Gamma g - a_i)L} - e^{-(\Gamma g - a_i)L} + 1 + r_1^2}{(\Gamma g - a_i) \left| 1 - r_1 r_2 e^{(\Gamma g - a_i)L} e^{-j \frac{2p n_{eff}}{I} L} \right|^2} \quad (5.14)$$

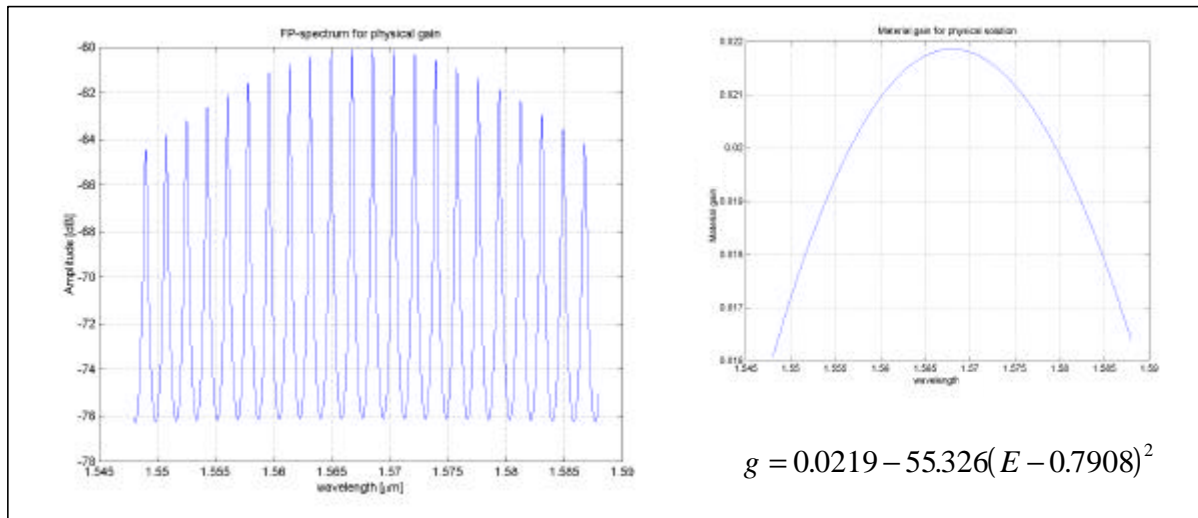
De term in de noemer waarvan de absolute waarde genomen wordt, wordt de roundtrip optische versterking genoemd. Figuur 5-7 toont hoe deze term zich gedraagt in het complexe vlak. Links op de figuur, de fysische situatie: beneden drempel blijft de roundtrip optische versterking steeds kleiner dan één, het resulterende optisch spectrum wordt weergegeven in Figuur 5-8. Rechts op Figuur 5-7 is de niet fysische situatie te zien: de roundtrip optische versterking is groter dan één. Doordat het nulpunt zich volledig binnen de beschreven baan bevindt, ziet het resulterende optisch spectrum er toch “goed” uit (zie Figuur 5-9).



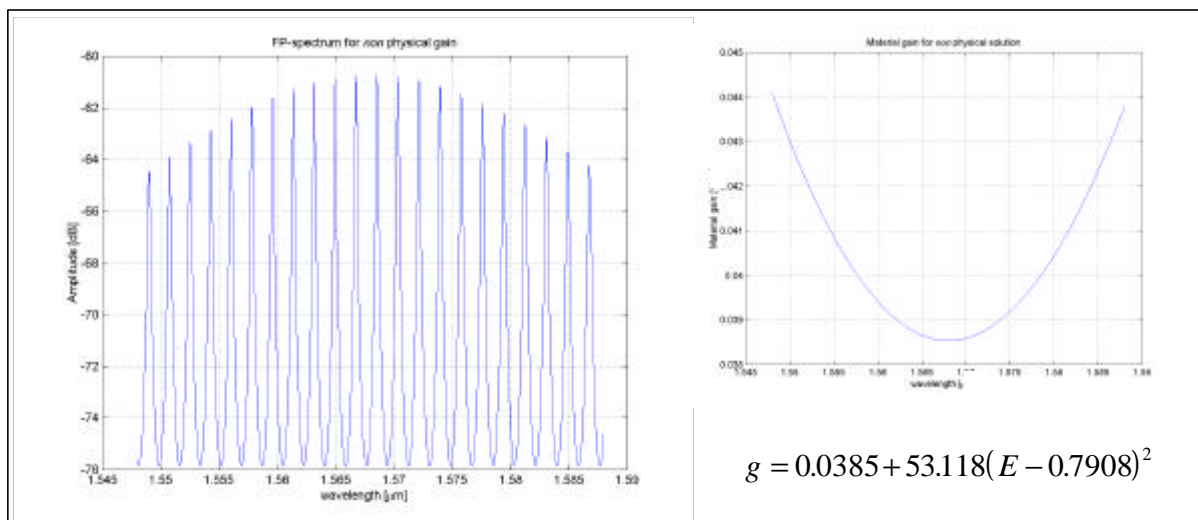
Figuur 5-7: De baan in het complexe vlak die beschreven wordt door opeenvolgende waarden voor de roundtrip optische versterking, bij een veranderende golflengte. Links is een spontane emissie-spectrum voorgesteld dat met fysische parameters berekend werd. Rechts is een niet fysische situatie voorgesteld.

Deze fysisch foutieve oplossing is echter heel eenvoudig te vermijden door ervoor te zorgen dat de kostenfunctie, gebruikt bij het optimaliseren, een negatieve golflengteafhankelijke parameter (g_2) afstraft. Daarnaast kan ook de eis gesteld worden dat de *roundtrip* optische versterking kleiner moet zijn dan één, hetgeen een voorwaarde oplevert voor g_1 , zoals te zien is in uitdrukking (5.15).

$$g_1 < \frac{1}{\Gamma} \left(\frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{r_1 r_2} \right) + a_i \right) \quad (5.15)$$



Figuur 5-8 : Links een spontane emissie-spectrum voor Fabry-Perot-laserdiode waarbij de optische materiaalversterking (rechts in beeld, uitgedrukt in $1/\text{mm}$ vs. mm) fysische waarden aanneemt.



Figuur 5-9 : Links een spontane emissie-spectrum voor een Fabry-Perot-laserdiode, rechts de optische materiaalversterking [$1/\text{mm}$] als functie van de golflengte [mm]. Een duidelijk niet fysische oplossing.

5.3 Extractie uit de relatieve intensiteitsruis (RIN)

5.3.1 Inleiding

Naast de zuiver optische eigenschappen zoals het optische spectrum, is ook de stabiliteit van het optisch vermogen een belangrijke factor voor het gebruik van laserdiodes in de telecommunicatieverbindingen. Net zoals alle fysische systemen, bevat het optische vermogen dat uit de laserdiode komt ruis als gevolg van het feit dat de optische versterking geen perfect proces is en dat er altijd spontane emissie aanwezig is in de laserdiode.

Bij laserdiodes wordt deze intensiteitsruis uitgedrukt ten opzichte van het gemiddelde vermogen en wordt er gesproken van relatieve intensiteitsruis of RIN (“*Relative Intensity Noise*”). Bij analoge communicatietoepassingen bestaat er immers een eenvoudig verband tussen de modulatie diepte van het signaal, de ruiseigenschappen van de laserdiode (de RIN) en de signaal-ruis-verhouding (SNR) gegeven door uitdrukking (5.16). Met andere woorden laserdiodes voor analoge telecommunicatie hebben bij voorkeur een lage RIN [5.7].

$$SNR = \frac{\langle i_{\text{signaal}} \rangle}{\langle i_{\text{ruis}} \rangle} = \frac{m^2}{2} \frac{\langle P \rangle^2}{\langle |\Delta P(f)|^2 \rangle} = \frac{m^2}{2RIN(f)} \quad (5.16)$$

Maar ook bij digitale communicatie is het “RIN-getal” bruikbaar bij evaluatie van de bruikbaarheid van de laserdiode in systemen. In dat geval, wordt niet de signaal-ruis-verhouding gebruikt maar de “*bit-error-rate*” (BER) [5.8], zoals aangegeven wordt in uitdrukking (5.17).

$$BER < 10^{-9} \Leftrightarrow \frac{1}{RIN} > (11.89)^2 \quad (5.17)$$

Naast de voordelen die ontstaan door het directe verband naar signaal-ruis-verhouding en bit-error-rate, heeft de bepaling van de RIN van een laserdiode nog andere voordelen: de meting gebeurt bij een constante instelstroom (zonder gemoduleerd signaal) en toch levert de meting informatie op over het dynamisch gedrag van de laserdiode. Om dit aan te tonen, moet de uitdrukking (5.18) voor het spectrum van de relatieve intensiteitsruis afgeleid worden [5.9] uit de *rate-equations* (rekening houdend met de niet-lineaire optische versterkingscoëfficiënt).

$$RIN(f) = \frac{\langle |\Delta P(f)|^2 \rangle}{\langle P \rangle^2} = \frac{4}{P} \mathcal{I}_{v_{st}} \left(\frac{f^2 + \left(\frac{g^*}{2p} \right)^2}{(f_r^2 - f^2)^2 + \left(\frac{g}{2p} \right)^2 f^2} \right) \quad (5.18)$$

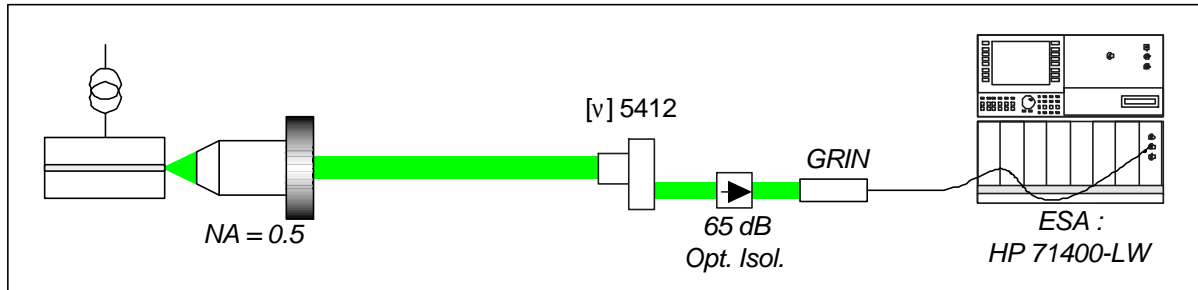
Hierbij stelt f de frequentie voor, γ de demping en f_r de resonantiefrequentie van de laserdiode, δv_{ST} stelt de lijnbreedte volgens de uitdrukking van Schawlow-Townes [5.10] voor, bij lage vermogens is γ^* gelijk aan γ .

Wanneer deze uitdrukking vergeleken wordt met de uitdrukking voor de AM-modulatie van een laserdiode (4.15), blijkt duidelijk dat er een verband bestaat en dat de meting van de relatieve intensiteitsruis kan gebruikt worden om de modulatie-eigenschappen van de laserdiode tot op zekere hoogte te bepalen. De gelijkensis tussen de uitdrukkingen geeft aan dat de ruismeting de modulatie-eigenschappen van de actieve laag modelleert, met andere woorden de intrinsieke bandbreedte berekend kan worden. Dit is de bandbreedte van de laserdiode zonder de parasitaire effecten.

5.3.2 De meting en elementaire extractie

Om de relatieve intensiteitsruis te bepalen, wordt er gebruik gemaakt van een detector om het licht om te zetten in een elektrisch signaal en vervolgens wordt het ruisspectrum van dat elektrisch signaal met behulp van een elektrische spectrumanalyser opgemeten. Zoals te zien is in Figuur 5-10, wordt de laserdiode van een constante stroom voorzien. Principieel is de RIN-meting een eenvoudige meting doordat alle instrumenten te verkrijgen zijn en de laserdiode niet

gemoduleerd moet worden. De realiteit is echter dat RIN-metingen niet eenvoudig te realiseren zijn: de elektrische spectrumanalyser moet een voldoende lage ruisvloer hebben en de koppeling naar optische vezel moet voldoende efficiënt zijn, zoniet wordt het ruissignaal te zwak en kan er niet gemeten worden.



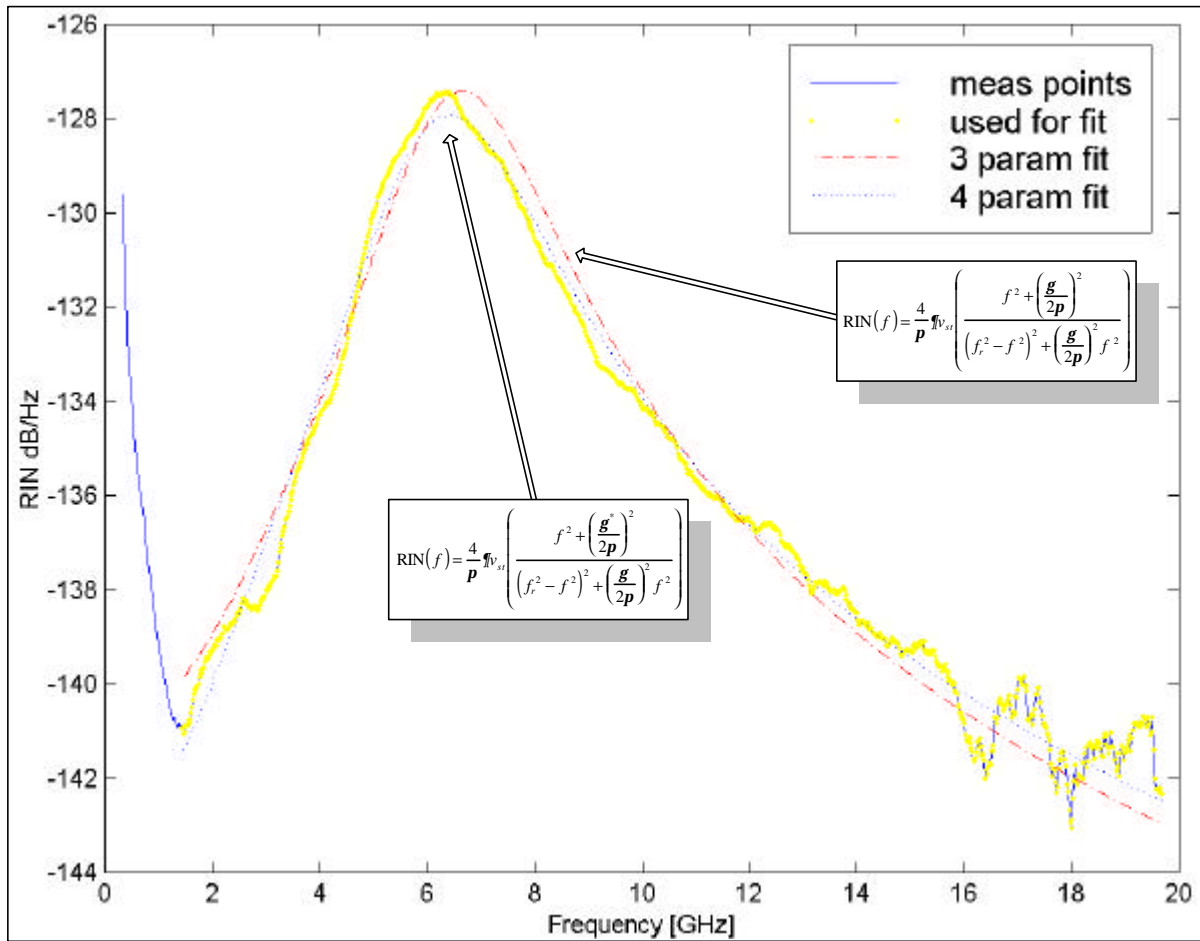
Figuur 5-10 : De meetopstelling om relatieve intensiteitsruis (RIN) te meten aan de hand van de HP71400 lightwave signal analyser.

De elektrische spectrumanalyser meet echter op zich geen relatieve intensiteitsruis: enige berekeningen zijn nodig om de waarde van de relatieve intensiteitsruis te bepalen. De elektrische spectrumanalyser meet het ruisvermogen binnen een bepaalde bandbreedte (de resolutiebandbreedte). Dat vermogen moet omgerekend worden naar een relatief vermogen binnen een bandbreedte van 1 Hz. Vervolgens moeten de ruisbijdragen van het gebruikte meetproces (de thermische ruis van het toestel en de hagelruis van de detector) afgetrokken worden, om de relatieve intensiteitsruis van de laserdiode te bepalen. Deze berekening is te zien in afleiding (5.19).

$$\begin{aligned}
 RIN_{system} &= RIN_{laser} + RIN_{thermal} + RIN_{shot} \\
 RIN_{laser} &= RIN_{system} - RIN_{thermal} - RIN_{shot} \\
 &= RIN_{system} - \frac{N_{thermal}}{P_{avg}} - \frac{2qI_{DC}R_L}{I_{DC}^2R_L} \\
 &= RIN_{system} - \frac{N_{thermal}}{R_L \left(rP_{avg(opt)} \right)^2} - \frac{2q}{rP_{avg(opt)}}
 \end{aligned} \tag{5.19}$$

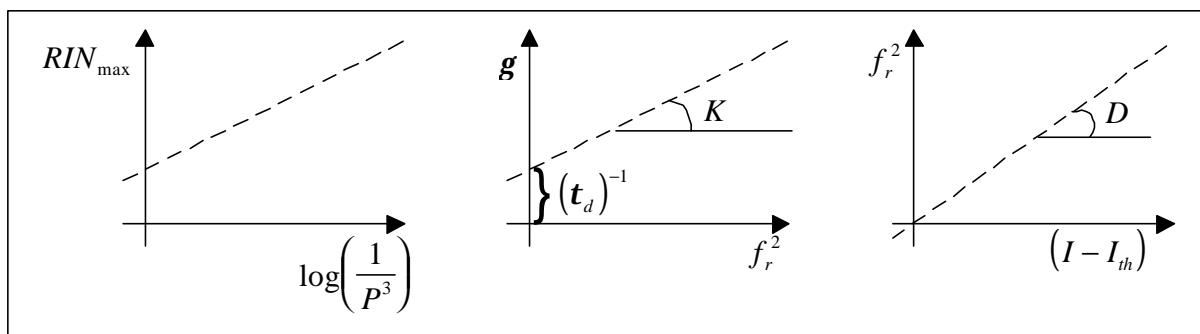
Het is met andere woorden nodig om $N_{thermal}$, het ruisniveau van het toestel (zonder ingangssignaal) op te meten en de combinatie van de responsiviteit (r), het invallend optisch vermogen ($P_{avg(opt)}$) en de impedantie van het toestel ($R_L = 50 \Omega$) te kennen.

Eenmaal de relatieve intensiteitsruis van de laserdiode gekend is, kan het spectrum gefit worden aan het model gegeven in (5.18) om de demping en de resonantiefrequentie te bepalen. Het fitten gebeurt op een logaritmische schaal voor de RIN-waarden en de frequenties worden uitgedrukt in GHz om de numerieke stabiliteit te verzekeren. Er wordt tevens voor gezorgd dat de punten die niet overeenkomen met het gemodelleerde gedrag (door aanwezigheid van $1/f$ ruis) niet in rekening gebracht worden. Onder die condities is het fitproces relatief goed geconditioneerd zodat er geen speciale aandacht moet besteed worden aan de startparameters. Door de startwaarde voor de resonantiefrequentie te laten overeenkomen met het maximum van het te fitten stuk, wordt het fitproces wel aanzienlijk korter.



Figuur 5-11 : Een voorbeeld van een gemeten RIN-spectrum en het gefitte spectrum voor een MQW-laserdiode. Merk op dat een fit waarbij de niet lineaire versterking verwaarloosd werd ($g = \hat{g}$) in dit geval geen goed resultaat oplevert.

Enmaal de gemeten RIN-spectra (als functie van instelstroom) gefit zijn, kan men de parameters gebruiken om een aantal fysische parameters van de laserdiode te bepalen. Dit gebeurt door eerst de gevonden parameters uit te zetten volgens de grafieken in Figuur 5-12, en dan de vergelijkingen van de rechten te bepalen door lineaire regressie. Vooral het verband tussen de demping en de resonantiefrequentie en het verband tussen de instelstroom en de resonantiefrequentie zijn interessant : ze leveren respectievelijk de “K-factor” [5.11], [5.12] en de “D-factor” op. Beide factoren kunnen vervolgens gebruikt worden om verdere eigenschappen en parameters van de laserdiode te bepalen.



Figuur 5-12 : Interpretaties van de gefitte parameters uit de relatieve intensiteitsruismetingen

5.3.3 Extractie van componentparameters

5.3.3.1 De “D-factor” : differentiële optische versterking

Om de “D-factor” om te zetten in componentparameters, vertrekken we vanuit de rate-equations om de uitdrukking (5.20) van de resonantiefrequentie te bepalen [5.13].

$$f_r^2 = \frac{n_g}{4p^2 t_p} \frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} S \quad (5.20)$$

Hierbij stelt S de fotondichtheid voor, die kan uitgedrukt worden als functie van de drempelstroom :

$$S = \frac{h_i t_p (I - I_{th})}{qwdL} \quad (5.21)$$

De combinatie van (5.20) en (5.21) levert dan het verband met de D-factor op :

$$\frac{f_r^2}{(I - I_{th})} = \frac{h_i v_g}{4p^2 qwdL} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right) = D \quad (5.22)$$

Met andere woorden, als de afmetingen van de caviteit (dwl) en de groepssnelheid (v_g) gekend zijn, kan de differentiële optische versterking bepaald worden. De injectie-efficiëntie (h_i) is meestal ongeveer gelijk aan één.

5.3.3.2 De “K-factor” : intrinsieke maximale bandbreedte en niet lineaire versterkings-coëfficiënt

De K-factor bepaalt, zoals aangegeven in uitdrukking (5.23), rechtstreeks de intrinsieke maximale bandbreedte van de laser [5.14]; met andere woorden de bandbreedte van de laserdiode bij de gegeven instelstroom en zonder aanwezigheid van RC-parasitaire effecten.

$$f_{\max} = \frac{2p\sqrt{2}}{K} \quad (5.23)$$

Om de meer fysische parameters van de laserdiode te bepalen aan de hand van de K-factor, wordt vanuit de rate-equations een uitdrukking voor de demping van de laserdiode bepaald [5.14], gegeven door (5.24).

$$g = \frac{1}{t_d} + 4p^2 \left(t_p + \frac{e}{v_g \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right)} \right) f_r^2 \quad (5.24)$$

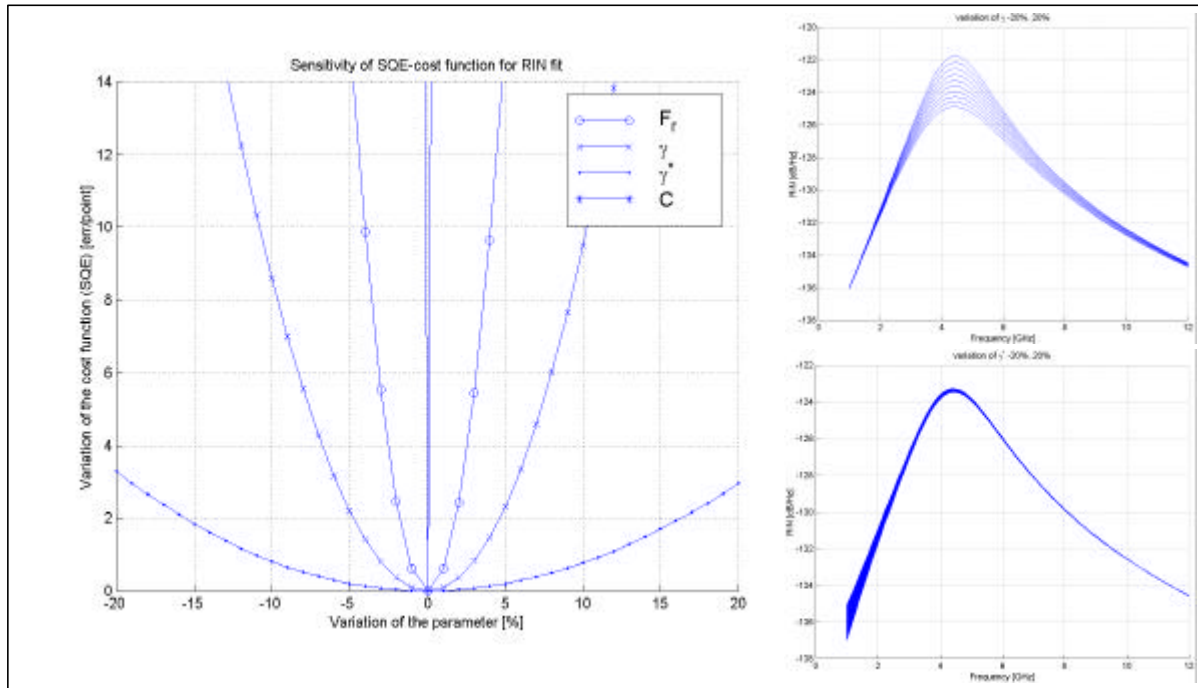
Als deze uitdrukking vergeleken wordt met de vergelijking van de rechte voorgesteld in Figuur 5-12, blijkt dat K en g_0 gegeven zijn door (5.25).

$$K = 4p^2 \left(t_p + \frac{e}{v_g \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right)} \right) \quad (5.25)$$

Diezelfde publikatie geeft ook een uitdrukking voor g^* in functie van de fysische parameters, gegeven door uitdrukking (5.26).

$$g_0 = \frac{1}{t_d} + 4p^2 t_p f_r^2 \quad (5.26)$$

Op het eerste zicht zou het fitten van g^* als functie van het kwadraat van de resonantiefrequentie gebruikt kunnen worden om de fotonlevensduur te bepalen. De realiteit is echter anders : zoals Figuur 5-13 aangeeft, is de uitdrukking van het RIN-spectrum (5.18) weinig gevoelig aan de waarde van g^* , hetgeen de gefitte waarde ervan onbruikbaar maakt.



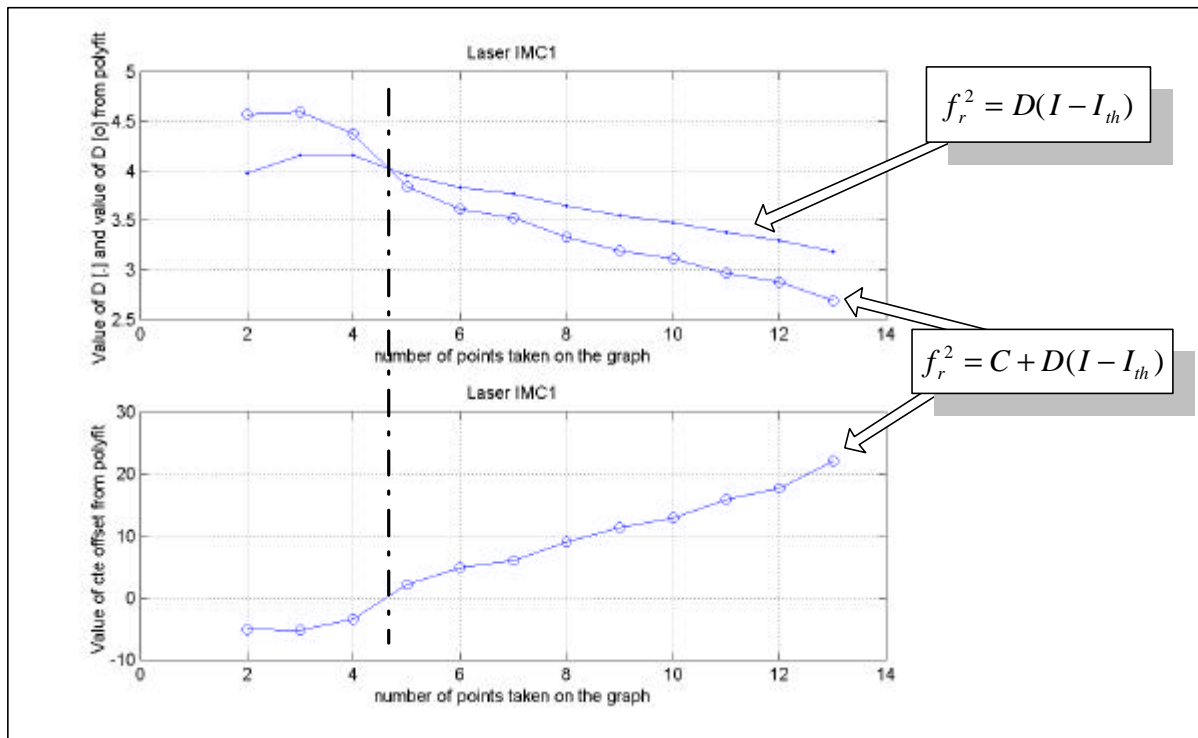
Figuur 5-13 : Links de verandering van de kostenfunctie voor de verandering van vier parameters uit het RIN-spectrum. Rechts is te zien hoe het RIN-spectrum varieert bij die veranderende parameters (boven : veranderende demping (g) en onder bij veranderende g^*).

5.3.3.3 Analyse van de extractienauwkeurigheid

Zoals bij elke extractie is het niet alleen nodig om de parameters te bepalen, het is ook nodig om een idee te krijgen van de nauwkeurigheid ervan. De Figuur 5-13 toont duidelijk aan dat enkel de demping (g) en de resonantiefrequentie (f_r) bruikbaar zijn als verdere basis voor extractie. Als er verondersteld wordt dat deze parameters “voldoend nauwkeurig” bepaald zijn door het fitalgoritme, kan een nauwkeurighedsanalyse uitgevoerd worden voor de verdere bepaling van de “D-” en “K-factor”, met de daaruit voortvloeiende parameters e en $\frac{fG}{fN}$.

In eerste instantie, moet er nagegaan worden hoe de “D-” en “K-factor” juist bepaald worden. De theorie spreekt over “de” best passende rechte, maar in praktijk bestaan er een groot aantal mogelijke best passende rechten : met name één voor elk aantal gebruikte punten bij de lineaire regressie. Immers, naargelang het aantal gebruikte punten, zal de helling en het intercept van de “best passende rechte” en bijgevolg de factoren veranderen.

In het geval van de “D-factor” kan er gebruik gemaakt worden van het feit dat het een rechte door de oorsprong moet zijn. Het is met andere woorden mogelijk om voor een telkens verschillend aantal punten de best passende rechte te bepalen en de resultaten hiervan uit te zetten als functie van het aantal punten. Normalerweise zal het intercept van de “best passende rechte” eerste negatief zijn en naarmate er meer punten in rekening gebracht worden positief worden. Er kan bijgevolg aangenomen worden dat de waarde van de “D-factor” gevonden wordt als de helling van de “best passende rechte” waarbij het intercept nul is. Figuur 5-14 geeft dit grafisch weer.



Figuur 5-14 : Op de bovenste grafiek zijn de waarden van de D-factor voorgesteld, bepaald uit de “best passende rechte” en een rechte die per definitie door de oorsprong gaat. De onderste grafiek geeft de waarde van het intercept van de “best passende rechte” weer.

In het geval van de “K-factor” kan een dergelijke redenering niet gebruikt worden, gezien de rechte in uitdrukking (5.24) per definitie een intercept heeft. Er kan wel gesteld worden dat gezien de geldige “D-factor” gevonden werd bij een bepaald aantal punten, de “K-factor” bij hetzelfde aantal punten zal gevonden worden. Een andere mogelijkheid is te stellen dat het verschil tussen de gevonden “K-waarden” gezien kan worden als de “nauwkeurigheid” van de parameter. Hierbij kan de eerste waarde (bepaling met slechts twee punten) rustig over het hoofd gezien worden, gezien er dan eigenlijk niet echt sprake is van een “best passende rechte”.

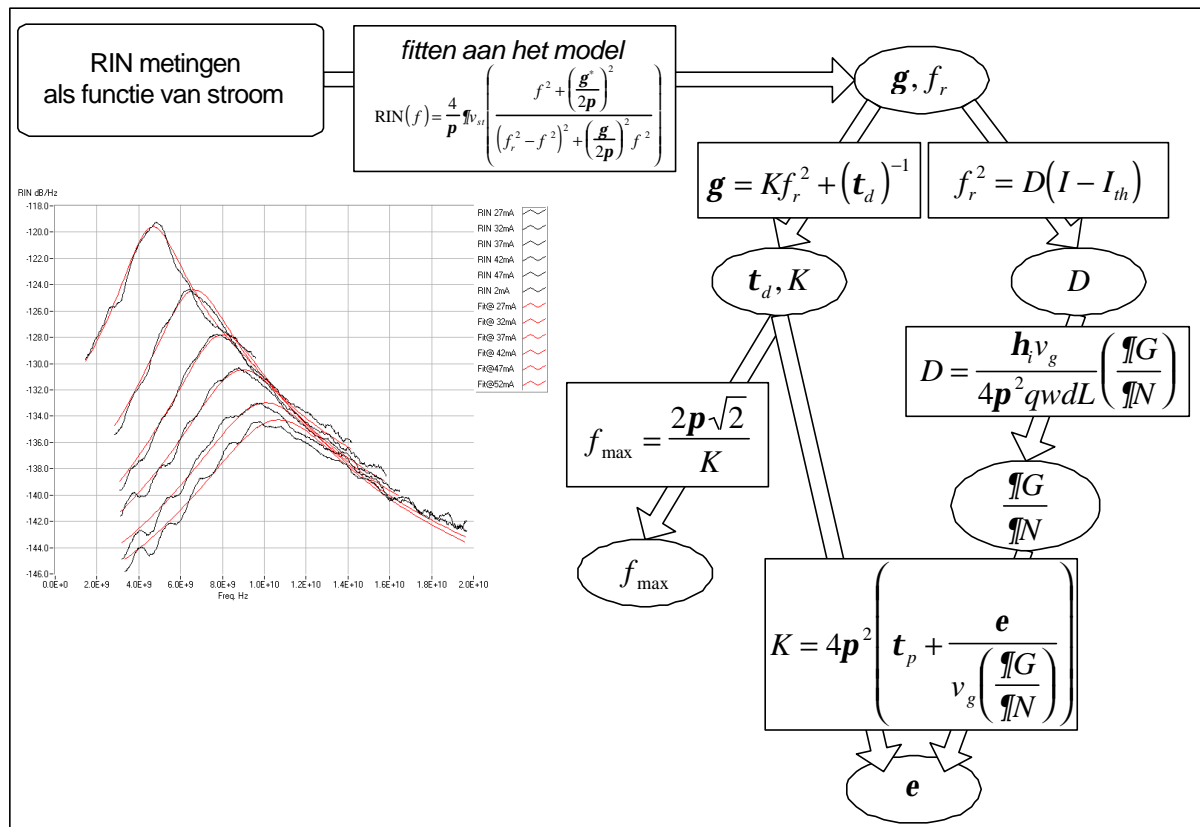
Om een volledige nauwkeurigheidsanalyse uit te voeren van de verdere berekeningen, startende van de gefitte waarden, kan een eerste orde benadering genomen worden, voorgesteld in uitdrukking (5.27). Met name de som van de eerste afgeleiden vermenigvuldigd met de nauwkeurigheid van elke parameter.

$$\Delta F(p_0, p_1, \dots, p_N) = \sum_{i=0}^N \left(\left(\frac{\partial F(p_i)}{\partial p_i} \right) \Delta p_i \right) \quad (5.27)$$

Hierbij dient er wel op gelet te worden om steeds terug te vallen op de basisparameters, met andere woorden in het geval van de niet lineaire optische versterking mag er niet gestopt worden bij de differentiële optische versterking, maar moet de uitdrukking ervan ingevuld worden alvorens af te leiden naar alle parameters. Indien dit niet gedaan wordt, levert de evaluatie van de niet lineaire optische versterking een quasi-onafhankelijkheid van de interne verliezen op, hetgeen niet correct is. De uitdrukkingen voor de verschillende partiële afgeleiden in het geval van de differentiële optische versterking en de niet lineaire optische versterking zijn terug te vinden in appendix C.

5.3.3.4 Totaaloverzicht van de extractie op basis van RIN-metingen

Een totaalbeeld van de parameterextractieprocedure gebaseerd op de relatieve intensiteitsruismetingen, is te zien in Figuur 5-15, samen met een voorbeeld van gemeten RIN-spectra voor een DFB-laserdiode en de bijhorende gefitte curven.



Figuur 5-15 : Voorbeeld van gemeten RIN-spectra met bijhorende gefitte curven, overzicht van het parameterextractieproces op basis van relatieve intensiteitsruismetingen.

5.4 Extractie uit een combinatie van metingen

Het is evident dat het niet mogelijk is om alle parameters uit één enkele meting te extraheren. Zelfs als er een meting zou bestaan waar “alle” parameters in terug te vinden zijn, is

de extractie niet mogelijk door de verschillende parametercombinaties. Indien het gewenst is om de meeste (alle) fysische parameters voor een laserdiode te kennen, is het noodzakelijk om de informatie van verschillende metingen te combineren.

Deze aanpak werd in het verleden reeds gerapporteerd, Hansmann [5.15] gebruikte reeds de combinatie van theoretische afleidingen en verschillende experimenten om tot een beschrijving van een DFB-laserdiode te komen. In tegenstelling tot het doel van dit proefschrift, maakte hij gebruik van relatief complexe numerieke modellen en metingen.

In het kader van dit proefschrift, werd onderzocht in hoeverre het mogelijk is om een nauwkeurige parameterextractie te bekomen zonder dat er een strikte nood was aan complexe metingen zoals modulatiemetingen. De eerste resultaten hiervan werden reeds in 1996 gepubliceerd op de internationale halfgeleiderlaserconferentie [5.16].

5.4.1 Een enkele laserdiode

Bij extractie op een enkele laserdiode, worden de verschillende metingen en hun extracties gebruikt om tot een volledige set parameters te komen. Het komt er dus op aan om metingen te kiezen die enerzijds eenvoudig uit te voeren zijn en die anderzijds een grote informatie-inhoud bezitten. Figuur 5-16 toont een overzicht van de metingen en hun combinatie in het geval van een DFB-laserdiode. Als basismetingen voor de extractie werden de metingen van de relatieve intensiteitsruis en het spontane emissie-spectrum gekozen, beide metingen die voldoen aan de twee vooropgestelde criteria van eenvoud en informatie-inhoud.

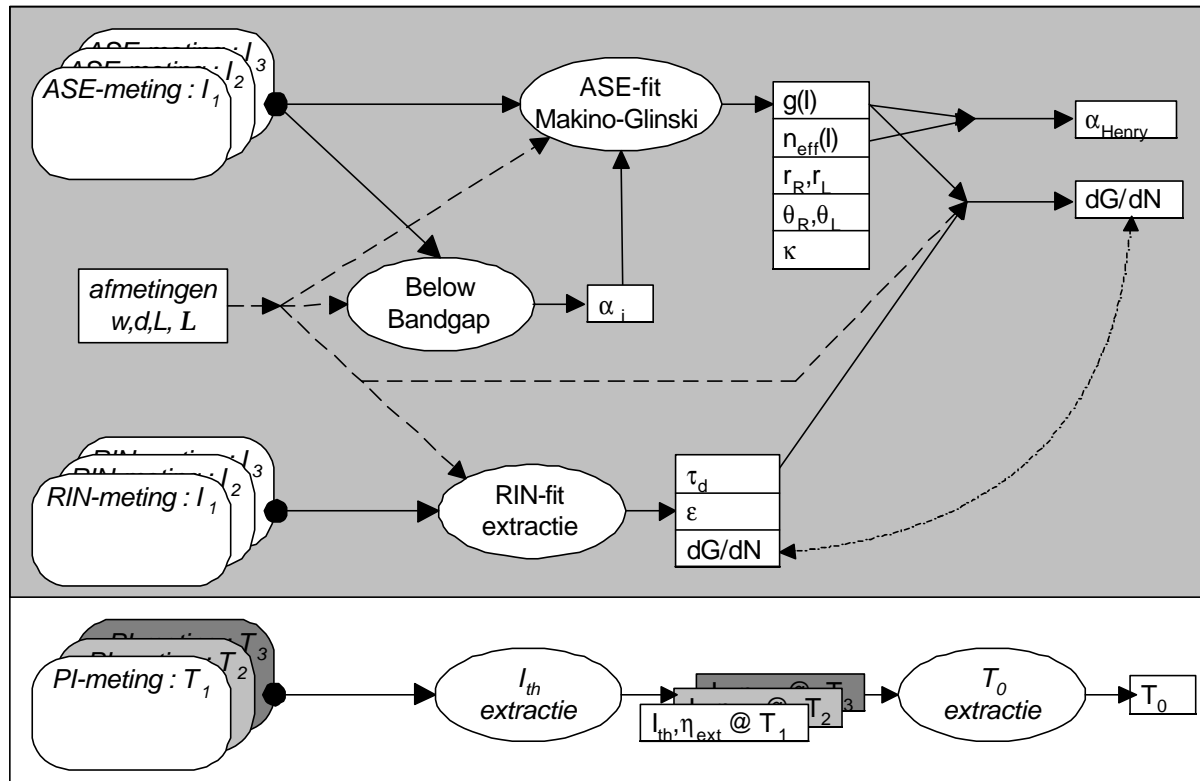
Indien de DFB-laserdiode niet voorzien is van antireflectiecoatings, kan de ‘*below bandgap*’-methode van Ketelsen (sectie 4.2.2) gebruikt worden om het interne optisch verlies van het golfgeleidermateriaal te bepalen. De waarde voor dit verlies kan vervolgens gebruikt worden bij de extractie op basis van het spontane emissie-spectrum.

Aan de hand van de in sectie 5.2 voorgestelde procedure kunnen de laserparameters uit het spontane emissie-spectrum geëxtraheerd worden. Door deze procedure te herhalen bij verschillende stroominstellingen, kan de stroomafhankelijkheid van de effectieve brekingsindex en de optische versterking bepaald worden. De stroomafhankelijkheid van deze twee parameters levert dan in een later stadium de lijnbreedteverbredingsfactor (\mathbf{a}_{Henry}) op.

Aan de hand van de extractieprocedure voorgesteld in sectie 5.3, kunnen de differentiële ladingsdragerslevensduur (t_d), de differentiële optische versterking (dG/dN) en de niet lineaire optische versterkingscoëfficiënt (ϵ) bepaald worden. De differentiële optische versterking kan aan de hand van uitdrukking (5.28) vergeleken worden met de optische versterking als functie van de stroom zoals die verkregen werd uit de extractie op basis van het spontane emissie-spectrum.

$$\left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right) \frac{t_d}{qwdL} = \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}I} \right) \quad (5.28)$$

Een gelijkaardige procedure kan gebruikt worden in het geval van een Fabry-Perot-laserdiode, zoals te zien is in Figuur 5-17.



Figuur 5-16 : Schematisch overzicht van de extractieprocedure voor een DFB-laserdiode. Op de grijze achtergrond: de metingen bij één bepaalde temperatuur, onderaan (witte achtergrond) de metingen bij variërende temperatuur.

5.4.2 Een set laserdiodes

5.4.2.1 Inleiding

Zoals aangegeven kunnen verschillende metingen en extracties gebruikt worden om tot een vollediger en beter resultaat te komen voor een laserdiode. Het is echter niet altijd mogelijk om alle methodes te gebruiken op de component. Als bijvoorbeeld een DFB-laserdiode voorzien is van antireflectiecoatings, kan de ‘*below bandgap*’-methode niet toegepast worden, hetgeen een onafhankelijke bepaling van de interne verliezen in de weg staat.

Indien er verschillende componenten ter beschikking zijn kunnen de resultaten, bekomen op de verschillende componenten vergeleken worden en kan er, mits de fabricage-technologie voldoende uniform is, een zekere statistische analyse uitgevoerd worden op de bekomen resultaten om de nauwkeurigheid en het vertrouwen in de gevonden waarden te vergroten. Maar, er is meer mogelijk: indien niet zomaar een aantal componenten gekozen worden, maar een set componentvarianten die onderling verschillen maar toch voldoende identiek zijn, kunnen de resultaten van de ene component gebruikt worden bij de andere. In het geval van de DFB-laserdiode met de antireflectiecoatings kan bijvoorbeeld de waarde voor het intern verlies bepaald worden aan de hand van een Fabry-Perot laserdiode die gefabriceerd werd met dezelfde actieve structuur. Dit alles veronderstelt natuurlijk wel dat de gerealiseerde lagenstructuur voldoende uniform is, zodat er aangenomen mag worden dat alle laserdiodes die uit eenzelfde plak halfgeleidermateriaal gefabriceerd werden, ook dezelfde materiaaleigenschappen hebben.

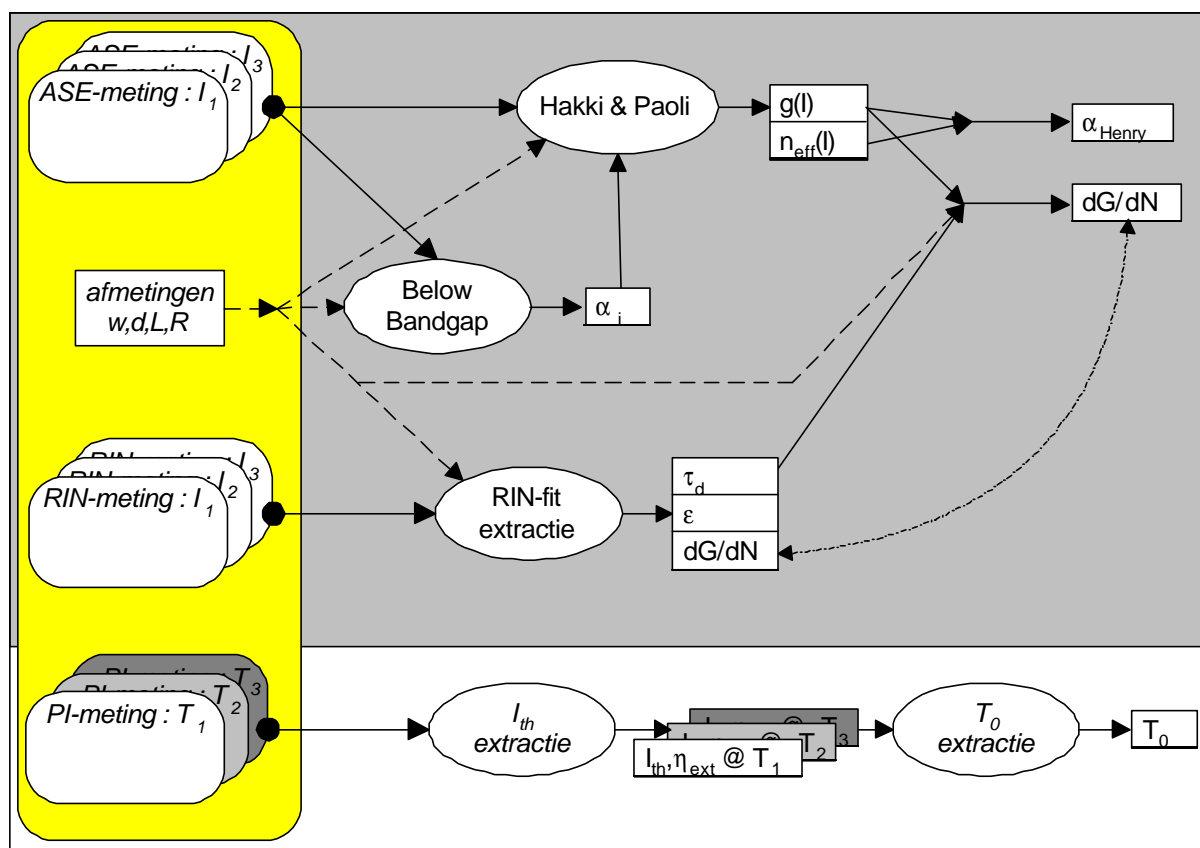
Alvorens over te gaan tot de bespreking van een extractieprocedure gebaseerd op verschillende componentvarianten, moet eerst de set van interessante componenten bepaald worden. Het is immers de bedoeling om met zo weinig mogelijk componenten en met zo weinig mogelijk metingen een zo volledig mogelijk beeld te krijgen van de laserparameters.

5.4.2.2 Een voorstel voor een set laserdiodes

Een mogelijk interessant set laserdiodes zou kunnen bestaan uit een aantal Fabry-Perot-laserdiodes en een aantal DFB-laserdiodes allen met dezelfde actieve structuur. In het geval van de Fabry-Perot-laserdiodes worden bij voorkeur een aantal componenten met een verschillende lengte voorzien want, dan is het immers mogelijk om de interne verliezen te bepalen aan de hand van de inverse efficiëntie versus de lengte van de laserdiode. De Fabry-Perot-laserdiodes zijn bij voorkeur niet voorzien van enige anti- of hoogreflectieve coatings. De DFB-laserdiodes hebben bij voorkeur een identiek diffractierooster en de verschillende componenten kunnen variëren in lengte en in de aangebrachte coatings.

5.4.2.3 Extractieprocedure op basis van een aantal Fabry-Perot-laserdiodes

Als eerste stap in de gecombineerde extractieprocedure voor Fabry-Perot-laserdiodes met een verschillende lengte, worden de laserdiodes afzonderlijk gekarakteriseerd, zoals te zien is in Figuur 5-17.



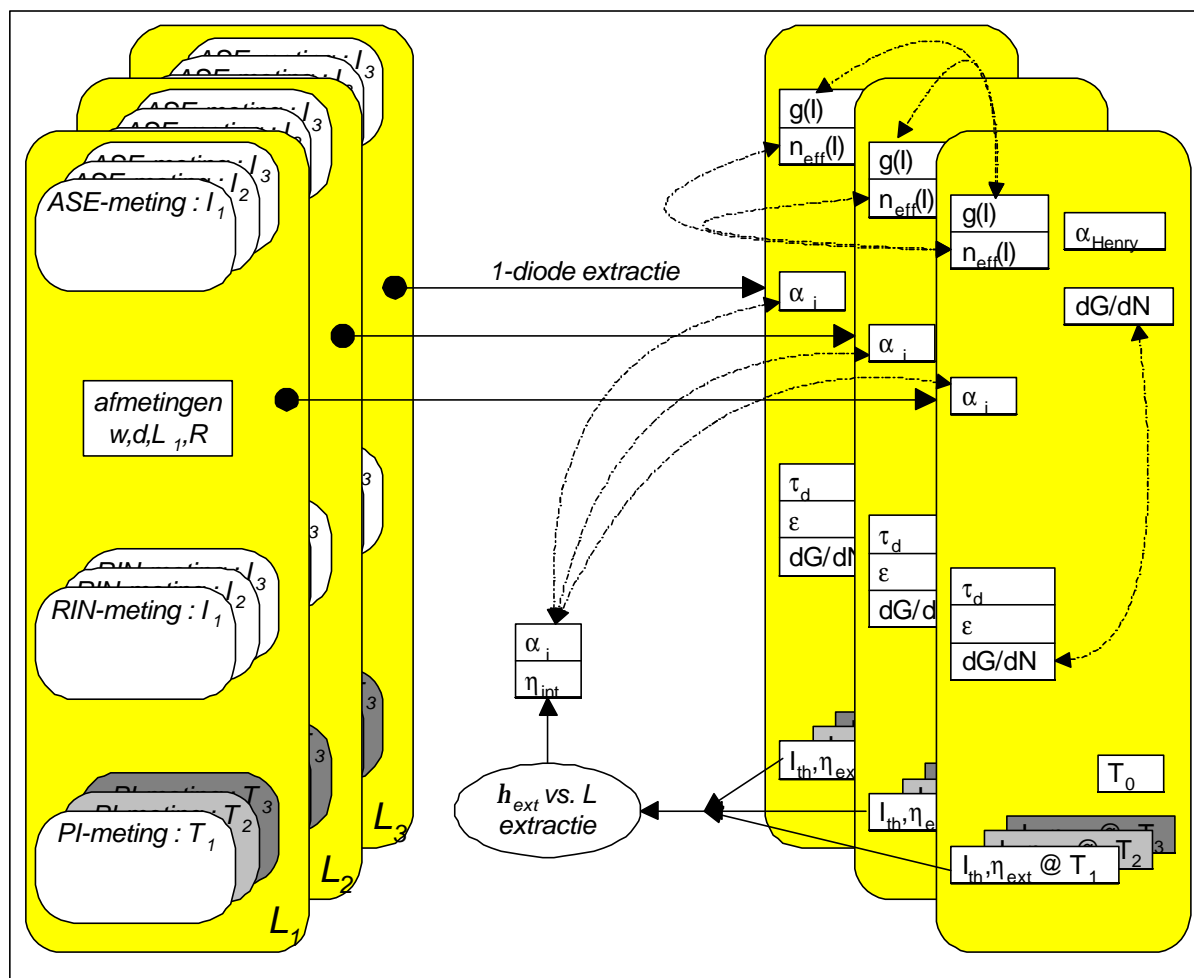
Figuur 5-17 : Karakterisering van een Fabry-Perot-laserdiode

Net zoals bij de DFB-karakterisering, wordt er gebruik gemaakt van het spontane emissie-spectrum en de relatieve intensiteitsruis om de verschillende parameters te bepalen bij

een constante temperatuur. Het enige verschil is dat hierbij geen fit op het spontane emissiespectrum nodig is; de Hakki-Paoli-methode levert immers rechtstreeks de optische versterking op en de brekingsindex kan bepaald worden vanuit de afstand van de Fabry-Perot-modi. De interne optische verliezen van het materiaal worden nog steeds via de “*below bandgap*”-methode van Ketelsen bepaald.

Indien gewenst kan deze volledige extractie overgedaan worden bij een andere temperatuur om de temperatuursafhankelijkheid van de parameters te bekomen. Meestal wordt deze stap niet uitgevoerd en beperkt de temperatuurskarakterisering zich tot het meten van de vermogen-versus-stroom-grafiek bij verschillende temperaturen. Hieruit kan immers de karakteristieke temperatuur van de laserdiode bepaald worden.

Enmaal de karakterisering van de afzonderlijke Fabry-Perot-laserdiodes uitgevoerd is, kan in een volgende stap de informatie gecombineerd worden om de parameterextractie verder te zetten, deze stap is te zien in Figuur 5-18. Een dergelijke multilaserdiode-karakterisering heeft als voordeel dat er een extra parameter kan bepaald worden, met name de interne efficiëntie. Bovendien levert de gebruikte methode (de inverse efficiëntie als functie van de lengte van de laserdiode) ook een waarde op voor het intern optisch verlies van de “gemiddelde” laserdiode. Deze waarde kan vervolgens gebruikt worden om de waarde verkregen uit de “*below bandgap*”-methode te verifiëren.



Figuur 5-18: Gecombineerde karakterisering van Fabry-Perot-laserdiodes bij verschillende lengtes.

Ook de waarden van de laserdiodes afzonderlijk kunnen worden vergeleken: indien het gebruikte materiaal voldoende uniform is, moeten de waarden voor de optische versterking van het materiaal en de brekingsindex overeenkomen. Let wel, gezien deze termen afhankelijk zijn van de ladingsdragersdichtheid, moet de vergelijking wel gemaakt worden op basis daarvan. De ladingsdragersdichtheid varieert namelijk niet alleen met de geïnjecteerde stroom maar ook met het volume van de actieve laag.

Indien blijkt dat de materiaaleigenschappen van de laserdiodes voldoende overeenstemmen, kan de extractieprocedure verder gezet worden. Aan de hand van de differentiële ladingsdragerslevensduur (τ_d) en de drempelstroom kunnen de recombinatieparameters en de ladingsdragersdichtheid bij drempel bepaald worden. Voor elke laserdiode kunnen de uitdrukkingen (5.29) en (5.30) neergeschreven worden.

$$\frac{1}{\tau_d} = A + 2BN_{th} + 3CN_{th}^2 \quad (5.29)$$

$$\frac{h\nu I_{th}}{qwdL} = AN_{th} + BN_{th}^2 + CN_{th}^3 \quad (5.30)$$

Als verder mag aangenomen worden dat de optische versterking van het materiaal lineair afhankelijk is van de ladingsdragers, kan de ladingsdragersdichtheid bij drempel geschreven worden als een lineaire functie van de inverse lengte, gegeven in uitdrukking (5.31).

$$N_{th} = c_0 + c_1 \frac{1}{L} \quad (5.31)$$

De uitdrukkingen (5.29) tot (5.31) kunnen neergeschreven worden voor elke beschikbare lengte. Indien er dus drie lengtes ter beschikking zijn, levert dit een oplosbaar stelsel van zes vergelijkingen en zes onbekenden (A , B , C , c_0 , c_1 en h_i) op; de drempelstroom en de dimensies van de laserdiode zijn gekend.

5.4.2.4 *Extractieprocedure op basis van een aantal DFB-laserdiodes*

De extractieprocedure voor een set DFB-laserdiodes is gelijklopend aan de procedure voor een set Fabry-Perot-laserdiodes, de eerste stap is de afzonderlijke karakterisering van de laserdiodes, zoals te zien in Figuur 5-16.

Indien de DFB-laserdiode echter voorzien is van een antireflectiecoating op één of beide facetten, is het onmogelijk om de “*below bandgap*”-methode te gebruiken en is het met andere woorden onmogelijk om het optisch intern verlies en de optische versterking van het materiaal afzonderlijk te bepalen.

Is de DFB-laserdiode niet voorzien van antireflectiecoatings, kan de methode van Hakki en Paoli toegepast worden op het spontane emissie-spectrum om de modale optische versterking te bepalen. Deze methode is echter alleen geldig in de gebieden van het spontane emissie-spectrum die ver genoeg van de Bragggolflengte liggen, met andere woorden in het gebied waar het Braggrooster geen invloed meer heeft op de emissie. Aan de hand van deze resultaten, kan vervolgens een model gefit worden om een waarde te bepalen voor de optische versterking ter hoogte van de Bragggolflengte, hetgeen de extractie op basis van het fitten van het spontane emissie-spectrum vereenvoudigt.

De combinatie van informatie geëxtraheerd uit de verschillende DFB-laserdiodes met een andere lengte levert ook extra informatie op. Gezien de methode van de inverse efficiëntie versus de lengte enkel geldig is voor laserdiodes van het Fabry-Perot-type, kan deze methode niet worden toegepast bij DFB-laserdiodes. De voorgestelde extractie van de recombinatieparameters daarentegen, blijft wel geldig en kan bijgevolg toegepast worden als de uniformiteit van het actief materiaal voldoende goed is.

Maar ook een combinatie van resultaten bekomen aan de hand metingen op DFB-laserdiodes met identieke lengte doch een verschillende facetcoating kan gebruikt worden. Zo kunnen de waarden voor de optische versterking van het materiaal, bepaald aan de hand van een niet-gecoate DFB-laserdiode, gebruikt worden als waarden voor de verdere extractie bij DFB-laserdiodes met een antireflectiecoating op één of beide facetten. Dit alles natuurlijk in de veronderstelling dat het gebruikte materiaal voldoende uniform is.

5.4.2.5 *Extractieprocedure op basis van een aantal Fabry-Perot en DFB-laserdiodes*

Indien zowel Fabry-Perot- als DFB-laserdiodes met een gelijke structuur ter beschikking zijn, kan ook deze informatie gecombineerd worden. Een duidelijk voordeel van deze methode is dat de extractie op basis van Fabry-Perot-laserdiodes toestaat om een waarde te extraheren voor het optisch intern verlies. Deze waarde kan vervolgens gebruikt worden bij

de extractie op de DFB-laserdiodes, hetgeen de bepaling van de optische versterking van het materiaal toestaat.

5.5 Besluit

Dit hoofdstuk behandelde de parameterextractie op basis van eenvoudige metingen met een grote informatie-inhoud en een complexe extractieprocedure. De extractie op basis van het spontane emissie-spectrum en op basis van de relatieve intensiteitsruis werden behandeld.

Voor het spontane emissie-spectrum werden de gebruikte procedure en de bijhorende problemen uiteengezet aan de hand van numerieke modellen voor het spontane emissie-spectrum van een DFB- en een Fabry-Perot-laserdiode. Telkens werd ook aangegeven hoe de verschillende problemen in het kader van dit proefschrift opgelost werden.

De beschrijving van de parameterextractie op basis van de relatieve intensiteitsruis vertrekt vanuit de bestaande verbanden tussen de verschillende parameters en de meetresultaten. In het kader van dit proefschrift werden de diverse stappen nodig voor de parameterextractie op een gestructureerde manier gegeven, zodanig dat het ontwikkelen van softwaretoepassingen met oog op automatisering mogelijk is.

In het laatste deel van dit hoofdstuk werd uiteengezet hoe de verschillende resultaten voor een laserdiode en voor een set van laserdiodes gecombineerd kunnen worden om tot een meer betrouwbare parameterset te komen. Aan de hand van overzichtelijke figuren werd aangetoond hoe de verschillende gegevens gecombineerd kunnen worden en welke controles er mogelijk zijn om de correctheid van de parameters na te gaan.

-
- [5.1] H. Soda, H. Imai, "Analysis of the spectrum behaviour below the threshold in DFB lasers", JQE, 22-5, 1986, pp. 637-641
 - [5.2] T. Makino, J. Glinski, "Transfert Matrix analysis of the amplified spontaneous emission of DFB semiconductor laser amplifiers", JQE, 24-8, 1988, pp. 1507-1518
 - [5.3] R. Schatz, E. Berglind, L. Gillner, "Parameter extraction from DFB lasers by means of a simple expression for the spontaneous emissions spectrum", Phot. techn. Lett, 6, 1994, pp. 1182-1184
 - [5.4] J.P. Weber, S. Wang, "New method for the calculation of the emission spectrum of DFB and DBR lasers", JQE, 27, 1991, pp. 2256-2266
 - [5.5] G. Morthier, K. Sato, R. Baets, T. Sudoh, Y. Nakano, K. Tada, "Parameter extraction from sub threshold spectra in cleaved gain and index coupled DFB LDs", OFC95, 1995, pp. 309
 - [5.6] T. Makino, J. Glinski, "Transfert Matrix analysis of the amplified spontaneous emission of DFB semiconductor laser amplifiers", JQE, 24-8, 1988, pp. 1507-1518
 - [5.7] J. Guggenmos, "Minimisation of laser diode relative intensity noise (RIN)", SPIE, vol. 1044, pp.260-269, 1989
 - [5.8] L.A. Coldren, S.W. Corzine, "Diode Lasers and Photonic integrated circuits", Ch. 5, section 5, John Wiley & sons, inc, 1995
 - [5.9] R.S. Tucker, "High speed modulation of semiconductor lasers", JLT, 3-6, 1985, pp. 1180-1185
 - [5.10] C. H. Henry, "Theory of the linewidth of semiconductor lasers", JQE, 18-2, 1982, pp. 259-264
 - [5.11] R. Olshansky, P. Hill, V. Lanzisera and W. Powazinik, "Frequency response of 1.3 μm InGaAsP high speed semiconductor lasers", JQE, 23, 1987, pp. 1410-1418

-
- [5.12] R. Nagarajan, et al, "Transport limits in High speed Quantum well lasers : experiment and theory", Phot. techn. Lett, 4-2, 1992, pp. 121-123
- [5.13] L.A. Coldren, S.W. Corzine, "Diode Lasers and Photonic integrated circuits", John Wiley & sons, inc, 1995
- [5.14] R. Nagarajan, M. Ishikawa, J.E. Bowers, "Effects of carrier transport on relative intensity noise and critique of K-factor predictions of modulation response ", Ell. Lett., 28-9, 1992, pp. 846-848
- [5.15] S. Hansmann, H. Walter, H. Hillmer, H. Burkhard, "Static and dynamic properties of InGaAsP-InP DFB lasers, a detailed comparison between experiment and theory", JQE, 30-11, 1994, pp. 2477-2484
- [5.16] G. Morthier, P. Verhoeve, R. Baets, R. Schatz, "Extraction of a large set of laser parameters from different measurements", ISLC96, 1996

HOOFDSTUK 6

De meetopstelling

6.1 Inleiding

Vaak worden meetopstellingen ontwikkeld om specifieke metingen uit te voeren en wordt de laserdiode telkens op een andere opstelling gelegd om de meting in kwestie uit te voeren. Wanneer echter een volledige parameterextractie beoogd wordt, is een dergelijke aanpak niet gewenst: het veranderen van opstelling en het telkens opnieuw aligneren van de laserdiode in de opstelling zijn tijdrovende bezigheden. Indien de verschillende metingen op eenzelfde opstelling kunnen worden uitgevoerd, kan dit een grote tijdswinst betekenen voor het meet- en parameterextractieproces.

In dit hoofdstuk worden een aantal mechanische eisen opgesteld afgeleid uit de metingen zoals die voorgesteld werden in de vorige hoofdstukken. Vervolgens wordt aangetoond hoe die randvoorwaarden omgezet werden in een conceptuele mechanische aanpak, die uiteindelijk toeliet de opstelling te realiseren. Tenslotte wordt de gerealiseerde opstelling aan de hand van een complexe meting geëvalueerd.

6.2 Mechanische eisen

6.2.1 Eisen vanuit de laserdiode

Als eerste randvoorwaarde voor de meetopstelling, is er de laserdiode zelf, die onder veel verpakkingsvormen kan voorkomen. Gezien de meetopstelling bedoeld is voor onderzoekstoepassingen, is het belangrijk om de opstelling zodanig te ontwerpen dat de vormfactor van de laserdiodeverpakking a priori geen beperking vormt. Naast de diverse commerciële verpakkingen, moet het bovendien ook mogelijk zijn om niet afgemonteerde of op submount afgemonteerde laserdiodes uit te meten. Dit laatste veronderstelt dat het mogelijk is om de laserdiode te benaderen met probenaalden om de elektrische stroom te voorzien. Het moet met andere woorden mogelijk zijn om “alle mogelijke” verpakkingen uit te meten met de opstelling.

Naast de vormfactor van de laserdiode is ook de golflengte ervan een sterk bepalende factor voor de opstelling. Alle optische componenten (bijvoorbeeld lenzen, polarisatoren, optische isolatoren, ...) zijn immers golflengtegevoelig en kunnen voor heel wat problemen zorgen of gewoon niet werken wanneer ze bij de verkeerde golflengte gebruikt worden. De meeste commerciële laserdiodes hebben een golflengte die ligt in het bereik van 600 tot 1600 nm en het is dan ook logisch om dit golflengtebereik als designvoorwaarde te nemen voor de opstelling.

De laatste eis vanuit het laserdiodestandpunt, is het feit dat het nodig is om de werkingstemperatuur van de laserdiode te stabiliseren, zodat betrouwbare en herhaalbare metingen op verschillende temperaturen, kunnen uitgevoerd worden. De opstelling moet bijgevolg uitgerust worden met een peltierelement om de temperatuurstabilisatie te verzorgen.

6.2.2 Eisen vanuit de metingen

De verschillende metingen die voorgesteld werden in hoofdstuk 4, kunnen ruwweg in twee categorieën ingedeeld worden : metingen die in de vrije ruimte uitgevoerd worden (met behulp van bulk optische elementen) en metingen die steunen op een koppeling naar vezel (de gebruikte toestellen hebben een optische vezel als ingang). De opstelling zal met andere woorden moeten in staat zijn om beide manieren van meten uit te voeren zonder dat de laserdiode verplaatst moet worden.

De metingen die in de vrije ruimte uitgevoerd worden zijn :

1. meting van het optisch vermogen
1. meting van het nabije veld
1. meting van het verre veld

De metingen gesteund op koppeling naar vezel zijn ondermeer :

1. metingen met de optische spectrumanalyser : optisch spectrum, piekgolflengte, zijmode-onderdrukkingsratio, ...
1. metingen met de elektrische spectrumanalyser : RIN, lijnbreedte, modulatie, distorsie, ...

De metingen waarbij licht in de component dient ingekoppeld te worden :

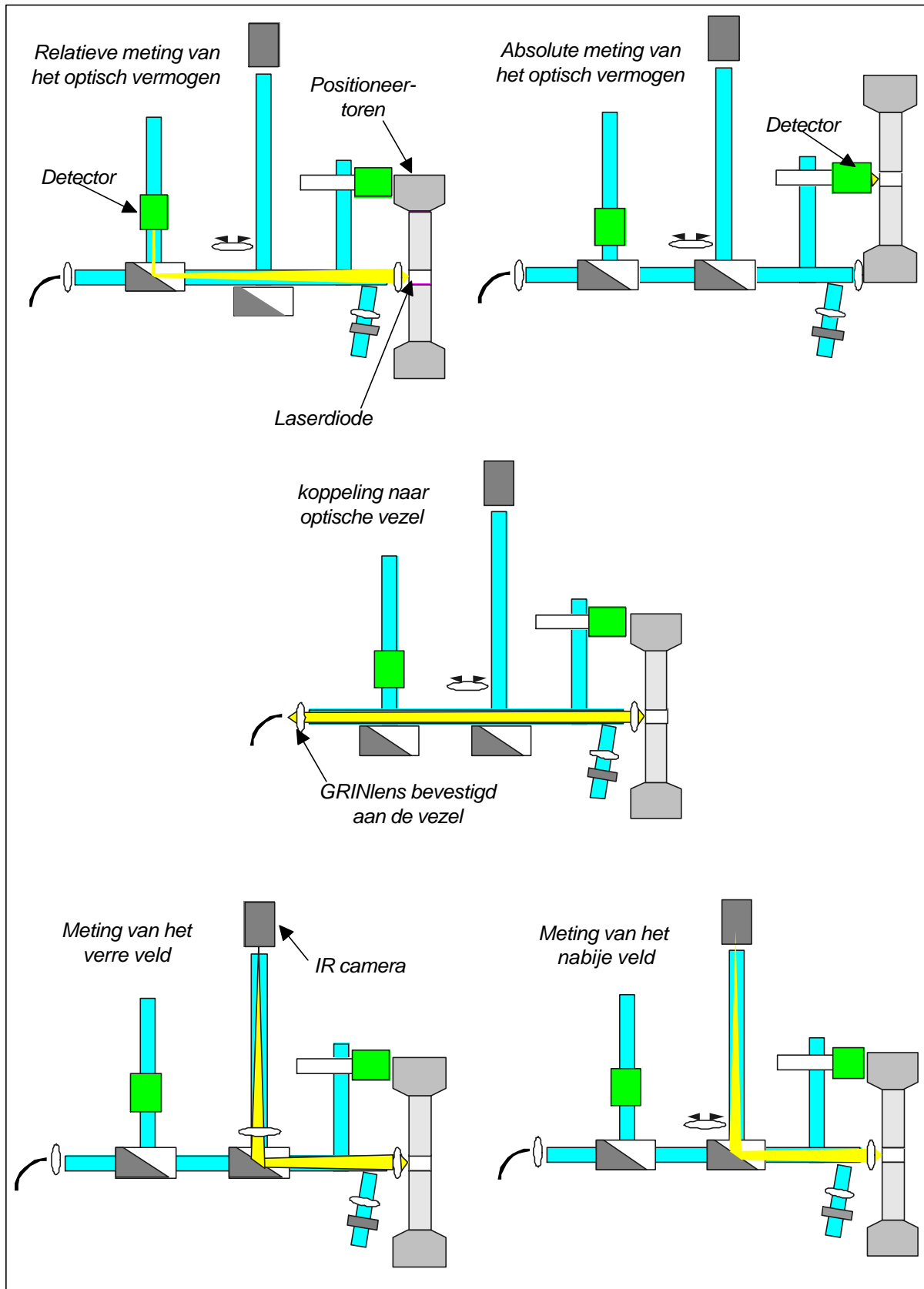
1. bepaling van het transparantiepunt van de golfgeleider
1. optische modulatie beneden drempel

Er zal dus een “selectiemechanisme” moeten voorzien worden dat toestaat om de verschillende opties te selecteren. Verder moet de opstelling zodanig ontworpen worden dat het mogelijk wordt om de laserdiode met hoge precisie te positioneren, zodat efficiënt inkoppelen in vezel mogelijk wordt.

6.3 Mechanische aanpak van de gestelde problemen

6.3.1 Algemene aanpak van de meetopstelling

Om de verschillende aspecten van de meetopstelling te combineren, werd er gekozen voor de “optische bank aanpak”. Hierbij wordt de laserdiode gepositioneerd ten opzichte van een optische bank die eerst de laserbundel gaat collimeren met behulp van een objectief. Vervolgens wordt het gebundelde licht met behulp van uitklapbare spiegels afgebogen zodat de verschillende metingen kunnen geselecteerd worden. Gezien het inkoppelen in optische vezel de meest kritieke mechanische eisen stelt, zal deze “meting” in rechte lijn uitgevoerd worden, waar de andere metingen als aftakkingen zullen voorzien worden (zoals te zien is in Figuur 6-1).



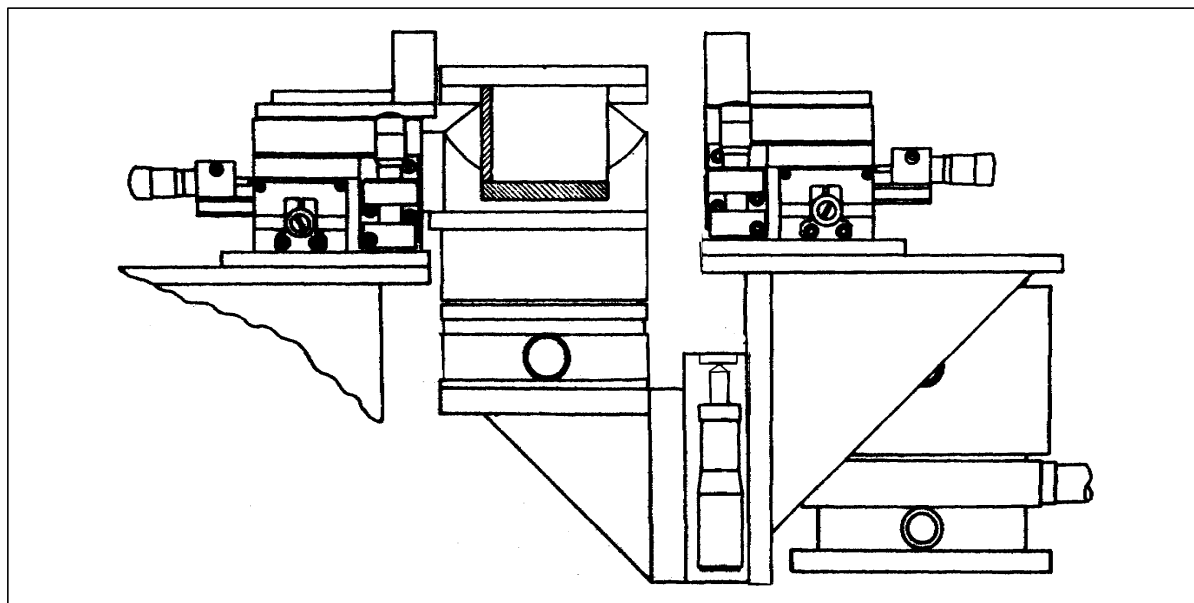
Figuur 6-1: Schematische voorstelling van de meetopstelling met de diverse selecties (bovenaanzicht)

6.3.2 De positioneertoren voor de laserdiode

Zoals reeds aangeven, moet de laserdiode nauwkeurig kunnen gepositioneerd worden om de kritieke koppeling naar optische vezel te kunnen realiseren. De diameter van de monomode vezelkern is typisch $9\ \mu\text{m}$, hetgeen een positioneernauwkeurigheid kleiner dan een micrometer vereist. Bovendien is het ook nodig om grote verplaatsingen van de laser toe te staan zodat verschillende afmetingsverschillen van de diverse verpakkingvormen kunnen worden opgevangen. Zoals in alle ingenieursdisciplines is de combinatie van een hoge nauwkeurigheid (sub micron) en een lange afstand (centimeters) een heel dure zaak. Nochtans zijn beide nodig om de opstelling naar behoren te laten werken.

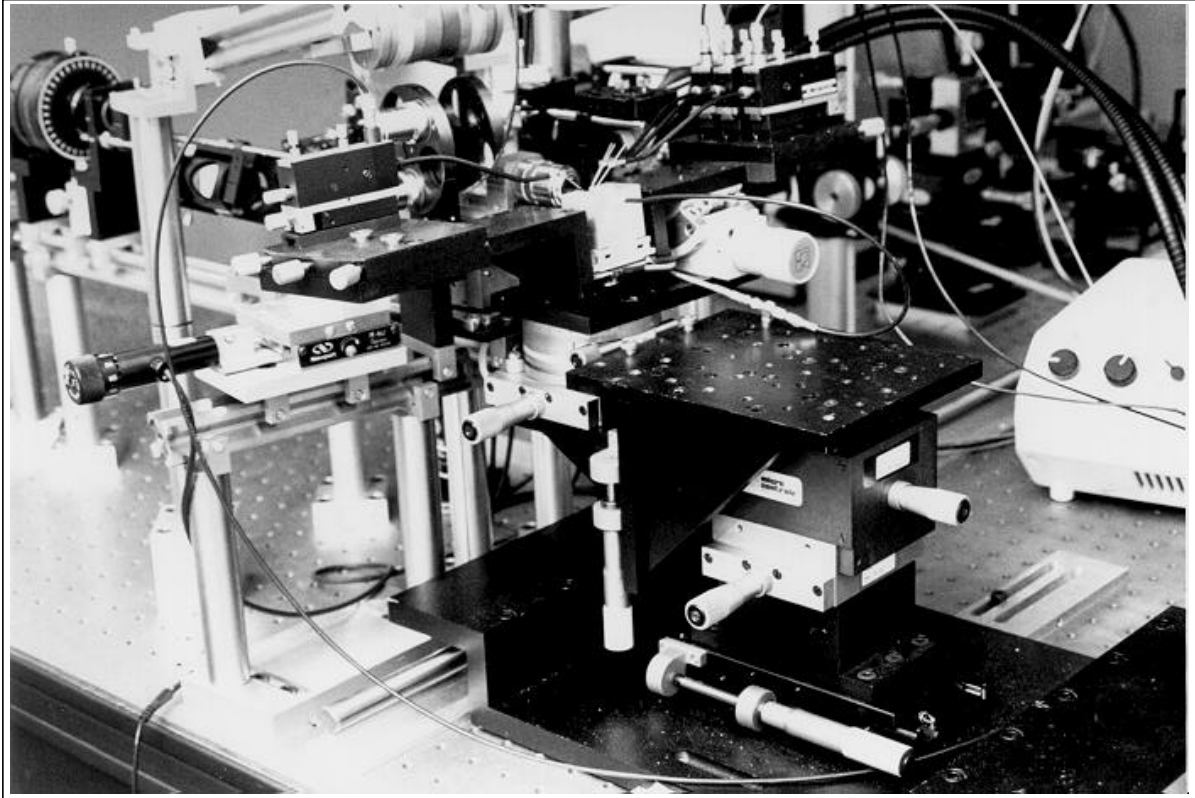
Als “goedkope” oplossing werd gekozen voor een opsplitsing van het probleem: de afstand en de ruwe instelling worden gerealiseerd door middel van de positioneertoren. De fijnafstelling daarentegen wordt niet gerealiseerd door de laserdiode te verplaatsen, maar door het objectief aan het begin van de optische bank te bewegen. Op die manier beweegt het objectief wel ten opzichte van de optische as van de meetopstelling, maar dit is toelaatbaar gezien het slechts om een kleine beweging gaat (een paar micrometer via piezo-aandrijving) ten opzichte van de opstelling die in bulk optische elementen (een paar centimeter) is uitgevoerd.

Om “alle” mogelijke metingen te kunnen realiseren is het ook nodig om de mogelijkheid te voorzien om licht in te koppelen in de laserdiode. Dit is ondermeer nodig voor metingen ter bepaling van het transparantiepoint van de golfgeleider. Bovendien laat deze optie ook toe om andere componenten zoals optische versterkers en zelfs passieve golfgeleiders te karakteriseren met de meetopstelling. De meetoren zal dus volgens het principe van een golfgeleideropstelling moeten ontworpen worden, met als bijkomende eis dat het geheel gevormd door de component en zijn inkoppeling kan verplaatst worden ten opzichte van de “optische bank”. Er moet dus een “werkvlak” voorzien worden, waarop de inkoppelmechanica kan gemonteerd worden, dat drie-assig kan bewegen ten opzichte van de optische bank. De laserdiode moet vervolgens vrij (twee translaties en twee rotaties) kunnen bewegen ten opzichte van dit *werkvlak*.



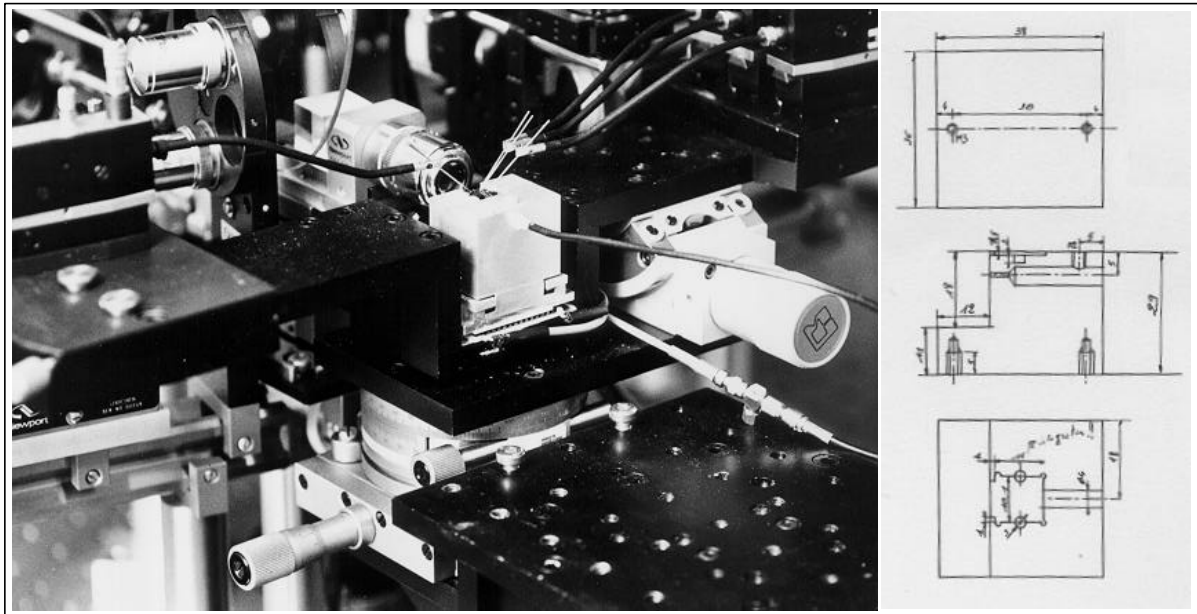
Figuur 6-2 : Schematische voorstelling van de positioneertoren voor de laserdiode (zijaanzicht)

Het eindresultaat van dit ontwerpproces is schematisch weergegeven in Figuur 6-2 en Figuur 6-3 toont de gerealiseerde positioneertoren. De laserdiode heeft vijf vrijheidsgraden ten opzichte van de optische bank (twee rotaties en drie translaties) waarvan twee translaties dubbel uitgevoerd zijn om toe te laten de laserdiode onafhankelijk te bewegen ten opzichte van het *werkvlak*. Het *werkvlak* zelf werd uitgevoerd met een 2.5 cm gatenpatroon zoals gebruikelijk is bij metrische optische tafels.



Figuur 6-3 : Foto van de gerealiseerde meettoren

Om de verschillende verpakkingsvormen van de laserdiodes te kunnen gebruiken op de opstelling, werd de houder voor de laserdiode modulair opgebouwd boven het vaste Peltierelement voor de temperatuursregeling, zoals te zien is in Figuur 6-4. De afmetingen en meer bepaald de positie van de laserdiode worden zorgvuldig gekozen bij de fabricage van het blokje, zodanig dat de laserdiode zich precies in het snijpunt van de twee rotatieassen bevindt. Op die manier is het mogelijk de laser te roteren zonder enige noemenswaardige translatie.



Figuur 6-4 : Detailopname van de positioneertoren, in het midden is de laserhouder te zien met daarop een laserdiode op silicium sub mount, die via probenaalden van stroom voorzien wordt. Rechts is de specificatie van de houder voor de IMC-Silicium-carrier te zien.

6.3.3 De optische bank

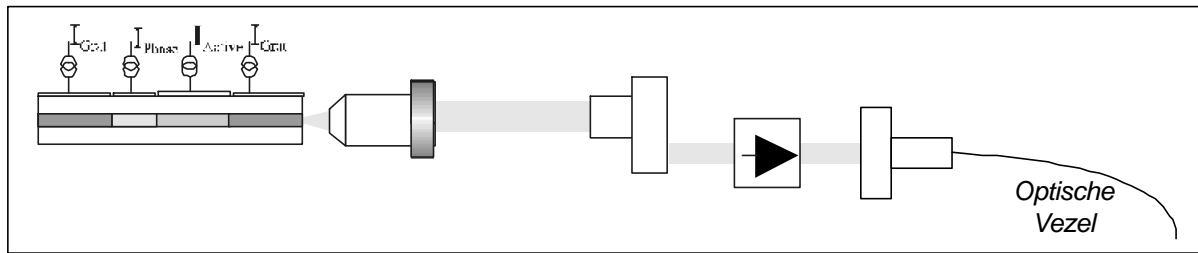
De optische bank vormt de kern van de meetopstelling, ze staat toe om de lichtbundel tussen de verschillende metingen te schakelen. Het selecteren van het gebruikte onderdeel gebeurt door gebruik te maken van uitklapbare spiegeltjes, die de lichtbundel de andere kant opsturen. Zoals aangegeven is in Figuur 6-1, is het inkoppelen in optische vezel, het meest kritische aspect van de opstelling, in rechte lijn uitgevoerd. De minder kritische aspecten zoals het meten van het optisch vermogen, het nabije en het verre veld, zijn uitgevoerd als aftakkingen op de centrale optische as.

6.3.3.1 Het inkoppelen in optische vezel

Om het inkoppelen in optische vezel te vereenvoudigen, wordt er in de opstelling niet rechtstreeks naar een optische vezel gekoppeld, maar wordt het gecollimeerde licht met behulp van een geïntegreerde GRIN lens in de optische vezel gekoppeld. Op die manier wordt niet alleen het proces van de vermogenskoppeling vereenvoudigd, maar wordt de vezelkoppeling ook compatibel met de andere metingen op de optische bank.

Verder is er ook een anamorfe achromatische prismapaar voorzien dat de laserbundel in één richting kan toeklappen. Deze component is vooral nuttig om de vermogenskoppeling te maximaliseren doordat hij de onaangepastheid tussen de ronde vezel en het ellipsvormige veld van de laser teniet doet.

Om een zo groot mogelijke flexibiliteit te garanderen, wordt er extra ruimte gelaten tussen de verschillende componenten op de optische bank zodat het mogelijk wordt om extra componenten toe te voegen in het lichtpad. Dit is ondermeer nodig bij het meten van relatieve intensiteitsruis en spontane emissiespectra waar het gebruik van respectievelijk optische isolatoren en polarisatoren nodig is om goede meetresultaten te bekomen.



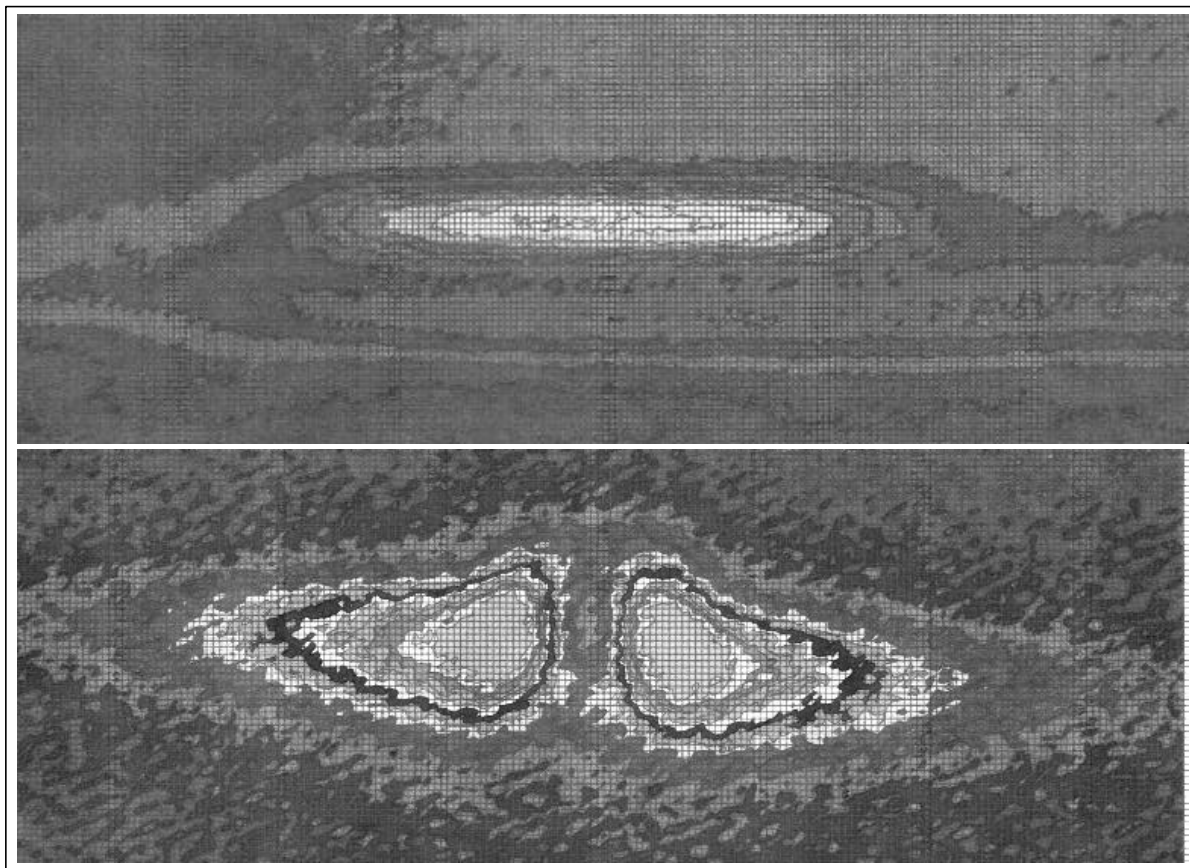
Figuur 6-5 : Schematische voorstelling van de koppeling naar optische vezel, met een optische isolator.

6.3.3.2 Het nabije en verre veld

Om het nabije veld of het licht ter hoogte van het facet van de laserdiode te bekijken volstaat het om het laserlicht ter hoogte van het facet af te beelden op een camera; indien gewenst kan dit beeld vervolgens met behulp van een “framegrabber” gedigitaliseerd worden en door middel van een computer ingelezen worden.

De optische arm heeft bijgevolg ook een aftakking die leidt naar een infraroodcamera. Er dient wel opgemerkt te worden dat het in dit geval niet gaat om een volledige meting van het nabije veld maar om een “inspectie”. Om een volledige meting te realiseren, moet immers ook de faseinformatie van het licht ter hoogte van het facet opgemeten worden.

Ondanks het feit dat met de infraroodcamera enkel de intensiteit van het licht ter hoogte van het facet opgemeten wordt, is deze optie toch nuttig voor de opstelling : enerzijds laat ze toe om het facet van de laserdiodes te inspecteren en op die manier een eventuele facetbeschadiging te “zien”, anderzijds is deze optie van belang voor het “mechanisch comfort” van de opstelling. Immers, er bestaat een vast mechanisch verband tussen de positie van de lichtbundel op de infraroodcamera en de positie van de lichtbundel op het inkoppelvlak van de optische vezel. Hierdoor wordt het mogelijk om het inkoppelproces voor opeenvolgende laserdiodes te vereenvoudigen. Eenmaal een goede koppeling bereikt is voor de eerste laserdiode, kan de positie van de lichtspot op de infraroodcamera bekeken worden. Wanneer een tweede laserdiode ingekoppeld moet worden, kan deze positie op de infraroodcamera gebruikt worden als eerste aligneringsstap. Want als de lichtspot op dezelfde positie op de camera invalt als bij de vorige laserdiode, zal de koppeling naar optische vezel weliswaar niet echt identiek zijn maar toch wel goed overeenkomen. Typisch werd in de praktijk opgemerkt dat op die manier tot 80% van de te behalen inkoppelingsefficiëntie kon behaald worden in een heel korte tijd en met weinig moeite (mikken op een zichtbare locatie op een scherm is eenvoudiger dan mikken op de kern van een optische vezel).



Figuur 6-6 : Opnames van het nabije veld van een laserdiode. Bovenaan het beeld van een normale laserdiode, waar de actieve golfgeleider goed te zien is. Onderaan het beeld van een laserdiode met facetbeschadiging (COD)

Figuur 6-6 toont twee voorbeelden van opnames gemaakt met de infraroodcamera. Het bovenste deel van de figuur toont het facet van een normale laserdiode die ver beneden de drempelstroom aangestuurd wordt om de camera niet over te belasten. Het facet werd extra belicht om de golfgeleider duidelijk te maken op het beeld. Het onderste deel van de figuur toont een identieke laserdiode met facetbeschadiging ook wel “catastrophic optical damage” of “COD” genoemd. Hierbij ontstaan er ter hoogte van het facet recombinatiecentra die een groot optisch verlies veroorzaken. Het effect hiervan is duidelijk te zien op de figuur : er kan geen licht meer ontsnappen uit het centrum van de golfgeleider, in plaats van één lichtspot zijn twee te zien aan de randen van de caviteit. Het vlekkenpatroon dat te zien is over het gehele beeld is wijten aan interferenties tussen de optische verzwakkers. Deze werden in de lichtbundel geplaatst omdat het uitgestraalde vermogen van de (beschadigde) laserdiode nog te groot was voor de camera.

Het verre veld van een laser wordt traditioneel opgemeten door met een detector te cirkelen rond de laserdiode en op die manier het stralingspatroon op te meten. Een dergelijke aanpak is echter onverenigbaar met het concept van de optische arm. Daarom werd dan ook gekozen voor de andere mogelijkheid : gebruik te maken van de eigenschappen van de Fourier-optica. Die leert immers dat in het brandpunt van een lens, de Fouriergetransformeerde van het veld aanwezig is. Als er op de optische arm in het pad naar de camera een tweede lens ingevoegd wordt (cf. Figuur 6-1 onderaan) is de meting van het verre veld gerealiseerd. De extra lens zorgt er namelijk voor dat niet het facet afgebeeld wordt op de camera, maar wel de

Fouriergetransformeerde ervan en zoals gemeenzaam bekend, wordt het verband tussen het verre en het nabije veld beschreven door een Fouriertransformatie.

Deze methode heeft als groot voordeel dat onmiddellijk de volledige tweedimensionale informatie van het verre veld opgemeten wordt. De kalibrering wordt verwezenlijkt door een parallelle bundel te laten schijnen op het ingangsobjectief van de optische as, het verre veld hiervan is immers een puntje. Wanneer de bundel vervolgens onder verschillende hoeken invalt op het objectief, zal het puntje op de camera verschuiven en kan de hoekverdraaiing uitgedrukt worden in pixelverschuivingen op de camera. De grote moeilijkheid van deze methode is dat het vaak nodig is om verzwakkers (attenuatoren) te plaatsen voor de camera om die niet te oversturen. De resulterende interferentiepatronen te wijten aan reflecties aan de verschillende oppervlaktes, maken het uiteindelijke beeld onduidelijker en kunnen aanleiding geven tot foutieve numerieke resultaten.

De praktijkervaring toonde aan dat een dergelijk meetprincipe betrouwbaar werkt doch dat de methode om het verre veld met een rondcirkelende detector op te meten weliswaar niet integreerbaar is en geen onmiddellijke tweedimensionale informatie oplevert maar uiteindelijk toch op zich eenvoudiger te gebruiken is.

6.3.3.3 *Het optische vermogen*

Het meten van het optische vermogen is gezien de opstelling een relatief eenvoudige zaak : het volstaat het gebundelde licht te laten invallen op een gekalibreerde detector om de meting te realiseren.

Voor alle duidelijkheid dient wel opgemerkt te worden dat het dan wel om een “relatieve” meting gaat. Immers de aanwezigheid van het objectief en de spiegel in het optische pad tussen de laserdiode en de detector, zorgen ervoor dat er een (klein) deel van het vermogen verloren gaat. Om die reden werd dan ook de positioneertoren op een rail geplaatst zodat het mogelijk is om de laserdiode rechtstreeks voor een detector te plaatsen en een meting uit te voeren zonder gebruik te maken van de optische arm. (cf. Figuur 6-1 bovenaan)

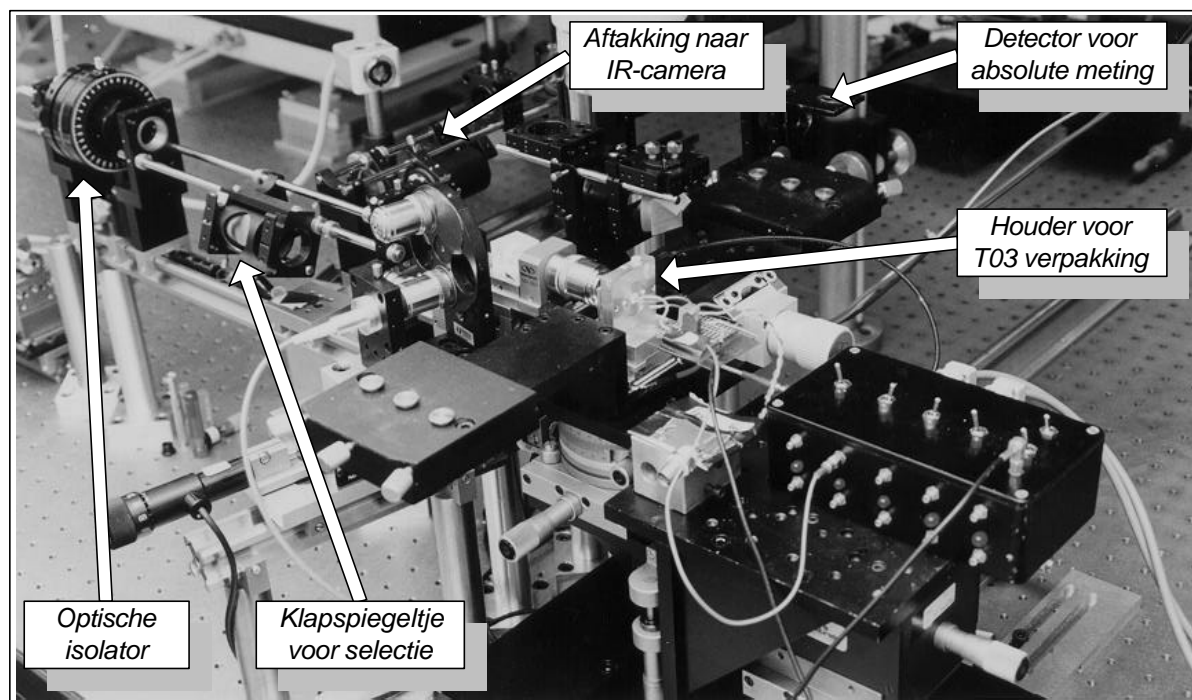
6.4 *Enkele implementatiedetails*

Startende van de mechanische concepten uit de vorige sectie, werd de opstelling eerst volledig in detail uitgewerkt door middel van mechanische specificaties. Hiervoor werden de samenstellingstekeningen voor een aantal voorstellen uitgewerkt zodat een gefundeerde keuze kon gemaakt worden op basis van de mechanische constructie. Vervolgens werden de nodige stukken voor de uiteindelijk gekozen structuur gedetailleerd en gefabriceerd binnen de vakgroep. Figuur 6-7 geeft een overzicht van de gerealiseerde opstelling. De standaard componenten werden aangekocht bij verschillende fabrikanten (o.a. Newport, OZ-optics, Spindler&Hoyer, SKF, ...) en werden vervolgens geïntegreerd met de in huis gemaakte componenten.

De meetoren bestaat uit aangekochte translatie- en rotatietafels, aan elkaar vastgezet door middel van tussenliggende stukken die op de vakgroep gemaakt werden. Voor de rails van de optische bank werd gekozen voor het X-26 systeem van Newport omwille van zijn inherente hoge stevigheid. Het geheel van rails werd op een vaste hoogte gemonteerd door middel van vaste steunen, in tegenstelling tot de gangbare praktijken om de rails op regelbare steunen te

plaatsen. Gezien het grote aantal vrijheidsgraden dat voorzien wordt, is het duidelijk zeer zinvol om alle dingen die niet regelbaar moeten zijn, dan ook vast te monteren.

De klapspiegels van de optische bank werden uitgevoerd met behulp van materiaal van Spindler&Hoyer uit het “microbench 25” gamma. Om de koppeling naar vezel te verbeteren werd een GRIN-lens combinatie van OZ-optics gebruikt, in combinatie met het anamorf achromatisch prisma paar van New Focus.



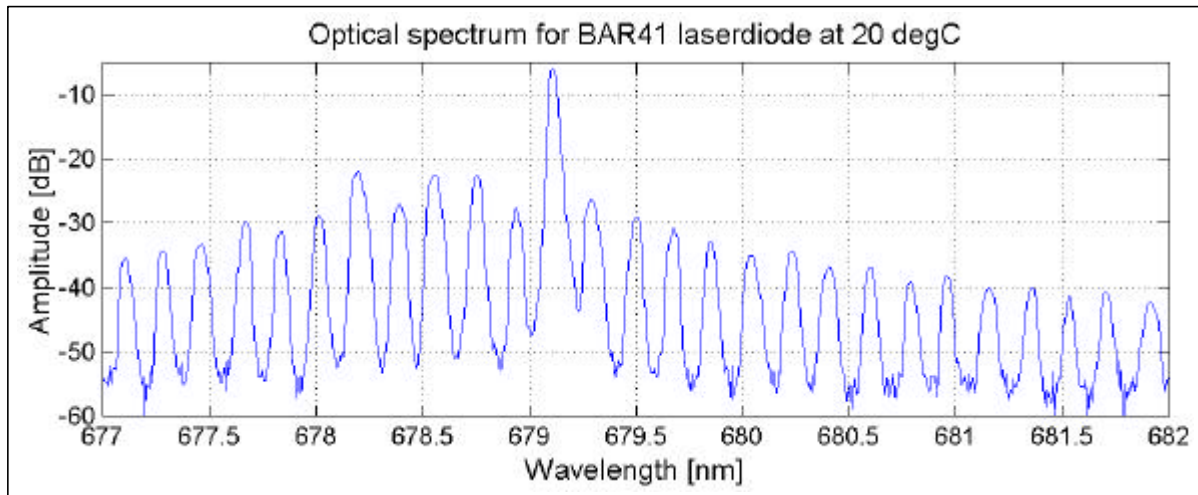
Figuur 6-7 : Overzicht van de gerealiseerde meetopstelling

6.5 Evaluatie van de meetopstelling

6.5.1 Inleiding

De eerste grote opdracht voor de meetopstelling was het uitmeten van halfgeleider-laserdiodes bestemd voor optische opnamesystemen. De laserdiodes (Fabry-Perot-type, InAlGaP halfgeleidermateriaal) waarvan sprake is in deze sectie werden ontwikkeld door Philips Opto-electronic Centre in het kader van een Europees project HIRED. Zoals te zien is in Figuur 6-8 hebben deze laserdiodes een maximale emissiegolflengte tussen 670 en 680 nm. Dit is in het zichtbare gebied en komt overeen met rood licht, vandaar de benaming “rode laserdiodes”.

De keuze van de rode golflengte is interessant voor optische opnamesystemen, waar de golflengte van het gebruikte licht een directe invloed heeft op de datadensiteit. Hoe kleiner de gebruikte de golflengte, hoe minder plaats één bit inneemt en hoe meer data er op dezelfde oppervlakte kunnen geschreven worden.



Figuur 6-8 : Een typisch spectrum van een “rode laserdiode” van het Fabry-Perot-type

Het uitvoeren van deze opdracht was niet alleen nuttig om de gewenste meetresultaten te verkrijgen, het was tegelijkertijd een ideale test voor de gehele meetopstelling. Niet alleen betrof het een conventionele doch complexe karakterisering op niet alledaagse componenten (in telecommunicatietermen), er werd tevens gevraagd om de gevoeligheid van de laserdiodes met betrekking tot optische terugkoppeling, te bepalen, hetgeen niet mogelijk was met het originele ontwerp van de meetopstelling.

Door deze karakterisering werd de opstelling getest op de volgende eigenschappen : stabiliteit (temperatuur, tijd), flexibiliteit (extra componenten in het lichtpad), golflengtebereik (zichtbaar rood licht i.p.v. de klassieke infraroodgebieden uit de telecommunicatie) en de structurele uitbreidbaarheid van de opstelling.

6.5.2 De stabiliteit en temperatuursafhankelijkheid

De term stabiliteit van de meetopstelling is een term die vele aspecten overkoepelt. In deze context wordt de term stabiliteit opgesplitst in twee categorieën : de zuiver mechanische stabiliteit en de thermische stabiliteit.

Het evalueren van de mechanische stabiliteit kan eenvoudig uitgevoerd worden door het in optische vezel gekoppelde lichtvermogen te meten gedurende een bepaalde tijd. Deze meting toonde duidelijk aan dat, eenmaal de opstelling mechanisch tot rust gekomen was, de koppeling niet meer veranderde, hetgeen metingen van lange duur mogelijk maakt. Zo werden er voor het bepalen van de reflectiegevoeligheid metingen uitgevoerd die in het totaal twee weken in beslag namen (relatieve intensiteitsruis als functie van de sterkte en de fase van de reflectie en als functie van de instelstroom). Hierbij was het niet nodig om tussendoor de koppeling naar optische vezel bij te regelen.

De initiële rustperiode voor de opstelling is een normaal fenomeen, want zoals bij elke mechanische opstelling, is het ook nodig bij deze opstelling om de aanwezige mechanische spanningen te laten “relaxeren” (typisch 24 uur bij deze opstelling). Dergelijke initiële spanningen zijn onvermijdelijk en ontstaan typisch door het vastdraaien van schroeven, het klemmen van verbindingen tussen de componenten, ...

Het evalueren van de thermische stabiliteit kan op dezelfde manier gebeuren, maar dan bij een veranderende temperatuur. Hierbij dient opgemerkt te worden dat er twee mogelijke

scenario's zijn: een verandering van de omgevingstemperatuur en een verandering van de gestabiliseerde temperatuur van de laserhouder.

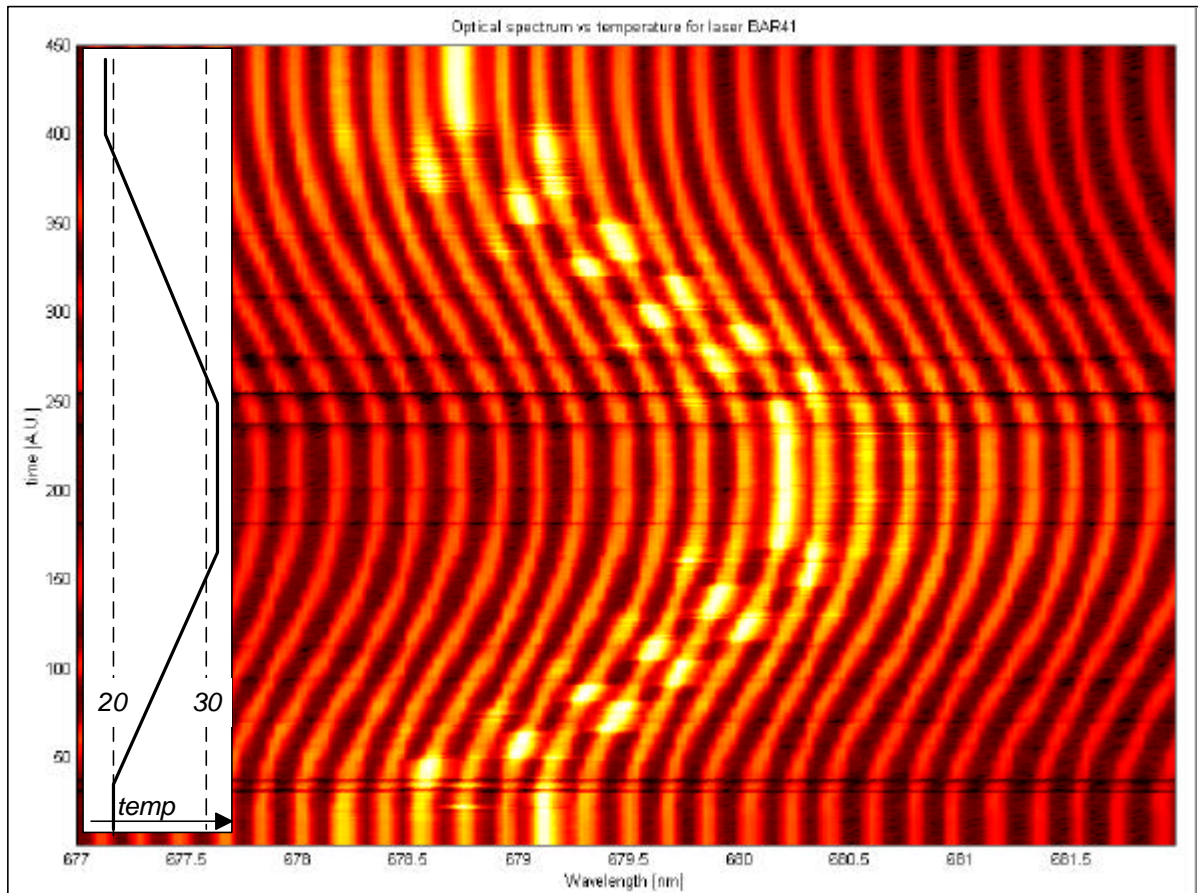
Gezien de optische bank en de meettoeren, waarop de laserdiode gepositioneerd is, een complex geheel vormen is het niet mogelijk om te garanderen dat de alignering temperatuursonafhankelijk is. De gebruikte materialen (aluminium en staal) werden vooral gekozen op basis van hun stevigheid en verwerkbaarheid maar niet op basis van de temperatuurseigenschappen. Hierdoor zijn de optische bank en de meettoeren onderhevig aan uitzetting bij een stijgende temperatuur. Deze uitzetting is in absolute termen weliswaar klein maar in verhouding tot het actief gebied van de laserdiode zeker niet verwaarloosbaar. Bovendien zorgt de constructie van de opstelling voor een versterkend effect van die verplaatsingen, hetgeen ervoor zorgt dat het inkoppelverlies niet verwaarloosbaar toeneemt bij een veranderende temperatuur.

Als de omgevingstemperatuur verandert zetten de optische bank en de meettoeren op een verschillende manier uit (te wijten aan de verschillende constructies) en gaat de alignering verloren. Deze eigenschap vormt echter geen noemenswaardig probleem voor de meetopstelling gezien de meetruimte thermisch gestabiliseerd is.

Een veranderende temperatuur van de laserhouder vormt een groter probleem, dat niet te vermijden is. In de praktijk is het probleem iets minder groot dan het lijkt: de meeste metingen als functie van temperatuur zijn discontinu. Er wordt een temperatuur ingesteld en eenmaal die voldoende stabiel is, wordt de alignering bijgesteld zodat de meting uitgevoerd kan worden. Deze procedure impliceert wel dat het niet mogelijk is om metingen als functie van de temperatuur volledig automatisch te laten verlopen, er is steeds menselijke interventie nodig om de alignering te realiseren.

Indien er toch een meting bij veranderende temperatuur moet gebeuren, moet de alignering voortdurend bijgesteld worden tijdens de meting. Om deze mogelijkheid te testen, werd het optisch spectrum van een laserdiode automatisch opgemeten met een vast tijdsinterval. Eenmaal de meting gestart, werd de temperatuur van de laserhouder veranderd en de alignering manueel bijgesteld. Gezien het veranderen van de temperatuur een traag fenomeen is, was het mogelijk om de uitzetting voldoende te compenseren zodat de inkoppeling redelijk constant bleef, hetgeen de meting mogelijk maakte. Figuur 6-9 toont het resultaat van die meting. Het is goed te zien hoe de modes van het spectrum verschuiven onder invloed van de veranderende temperatuur. De horizontale zwarte strepen zijn te wijten aan een tijdelijk gebrekkige compensatie, hetgeen een spectrum met lager gemiddeld vermogen oplevert.

Tegelijkertijd met de modes, verandert ook de lasergolflengte (de mode met maximaal vermogen, witte kleur) onder invloed van de temperatuur. Bij deze laserdiode vertoont die lasermode een niet alledaags effect: hij springt eerst twee modes vooruit (naar langere golflengte bij stijgende temperatuur) en springt dan even later (bij een nog iets hogere temperatuur) één mode terug. In tegenstelling tot het gebruikelijke patroon om telkens één mode te verspringen. Dit fenomeen werd opgemerkt bij meerdere laserdiodes die ter beschikking gesteld werden. Het geeft aan dat er in deze laserdiodes een aantal concurrerende processen aan het werk moeten zijn i.p.v. de klassieke processen. Het bleek echter niet mogelijk om hiervoor een sluitende verklaring te vinden.



Figuur 6-9 : Optisch spectrum van een Fabry-Perot-laserdiode als functie van de temperatuur. De verticale as stelt het tijdsverloop voor (in arbitraire eenheden) terwijl de temperatuur gevarieerd werd van 20 graden Celsius naar 31.5 graden en terug naar 19.5 graden Celsius, zoals aangegeven wordt d.m.v. de schaal in de witte rechthoek.

6.5.3 Reflectiegevoeligheid

Zoals vermeld werden er in het kader van dit proefschrift metingen van de reflectiegevoeligheid uitgevoerd op halfgeleiderlaserdiodes (Fabry-Perot-type, InAlGaP halfgeleidermateriaal) met een lichtemissie bij 675 nm. Alvorens in te gaan op de meetaspecten en de bekomen resultaten, wordt kort het belang van dergelijke metingen uitgelegd voor de toepassing in optische opnamesystemen.

6.5.3.1 Waarom reflectiegevoeligheid meten

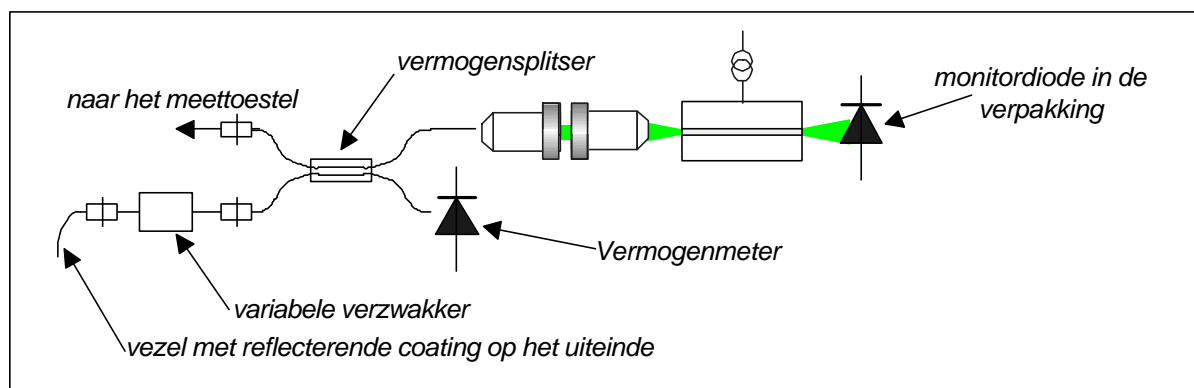
De reflectiegevoeligheid van de laserdiodes is een belangrijke factor : in systemen voor optische opname speelt de prijs van het totale systeem een grote rol, het is immers een volumemarkt, waar elk prijsvoordeel een duidelijk effect heeft op het commercieel succes van het systeem. Het is dan ook belangrijk om er zeker van te zijn dat de laserdiode kan gebruikt worden zonder de aanwezigheid van een optische isolator. Dit zijn immers dure componenten die ver de prijs van een optisch recording systeem overtreffen.

6.5.3.2 Het concept van de meetopstelling

Om de reflectiegevoeligheid van een laserdiode te meten, moet een deel van het uitgestraalde licht teruggekoppeld worden in de laserdiode en tegelijkertijd moet een eigenschap (bijvoorbeeld de relatieve intensiteitsruis of RIN) van de laserdiode opgemeten worden. Het is met andere woorden nodig om efficiënt te koppelen naar optische vezel en tegelijkertijd op een gecontroleerde manier een reflectie te veroorzaken die terug in de lasercaviteit gekoppeld wordt.

Wanneer een reflectiemeetopstelling gebouwd wordt, zijn er altijd twee mogelijkheden: een eerste is de opstelling te bouwen met behulp van vezelcomponenten, een tweede is de opstelling te bouwen in de vrije ruimte met behulp van bulk optische componenten.

De eerste optie (m.b.v. vezelcomponenten, zie Figuur 6-10) heeft het grote voordeel dat de opstelling eenvoudig te realiseren is, eenmaal het licht in een monomode vezel aanwezig is, worden alle componenten d.m.v. connectoren met elkaar verbonden. Bovendien heeft deze optie ook het voordeel dat ze een inherent gekalibreerde opstelling oplevert, doordat er een monomode verband bestaat tussen de reflectie en de lasercaviteit. Als licht overgaat van een monomode geleider naar een andere monomode geleider is het koppelingsverlies reciprook, met andere woorden als het koppelingsverlies van de laserdiode naar de optische vezel gekend is, is ook de koppeling van de optische vezel naar de laserdiode gekend. Dit koppelingsverlies is eenvoudig op te meten als de verhouding tussen het uitgestraalde vermogen en het vermogen dat in de optische vezel aanwezig is. Het grote nadeel van deze methode is dat de afstand waarop de reflectie gegenereerd wordt groot is. Bovendien vereist deze aanpak ook dat de nodige componenten (splitters, verzwakkers, spiegels, ...) voor de gebruikte golflengte in monomode uitvoering ter beschikking zijn.



Figuur 6-10: Het schema van een meetopstelling voor reflectiegevoeligheid, opgebouwd met vezelcomponenten.

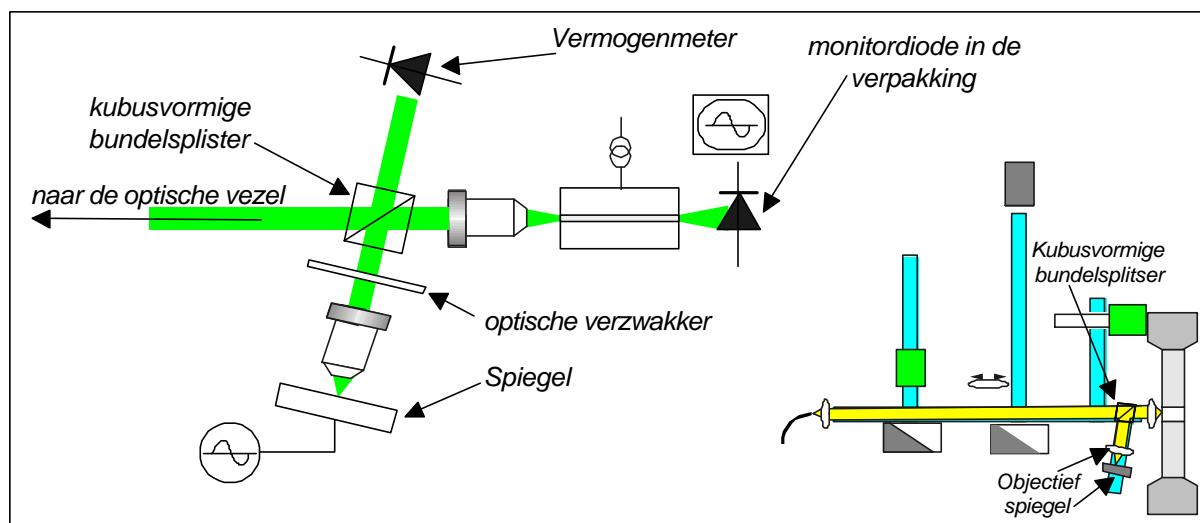
Gezien de vezelcomponenten niet ter beschikking waren voor 675 nm en gezien de meetopstelling de werkelijke situatie zo dicht mogelijk moest benaderen, met andere woorden een kleine caviteit (enkele centimeter), werd er voor de vrije ruimte optie gekozen, niettegenstaande het grote nadeel dat enkel een schatting kan gemaakt worden van het maximaal optische vermogen dat in de laserdiode gekoppeld wordt in plaats van een rigoureuze kalibrering.

6.5.3.3 De implementatie van de meetopstelling

Een meetopstelling voor reflectiegevoeligheid realiseren in bulk optische componenten houdt in dat de reflectie moet gerealiseerd worden voordat het licht in optische vezel gekoppeld wordt. Dit laatste is nog steeds nodig gezien de meetapparatuur een monomode optische vezel als ingang heeft.

De reeds bestaande opstelling werd uitgebreid met een extra aftakking door middel van een bundelsplitser op de optische bank. Deze aftakking werd zo dicht mogelijk bij het objectief geplaatst zodat de totale afstand tussen de laserdiode en de spiegel waar de eigenlijke reflectie plaatsvindt zo klein mogelijk was (slechts 10 cm). Figuur 6-11 toont een schematisch detail van deze extra aftakking, die onder een schuine hoek geplaatst werd, zodat de eindvlakken van de kubusvormige bundelsplitser geen ongecontroleerde reflecties konden genereren.

Om de opstelling minder kritisch te maken, werd het licht van de laserdiode gefocuseerd op de spiegel, zodanig dat de hoek waaronder de bundel op de spiegel invalt geen grote rol speelt. Om te controleren of de gereflecteerde bundel wel degelijk in de laserdiode gekoppeld werd, werd de reflectie-afstand gemoduleerd door de spiegel mechanisch te verplaatsen door middel van een piezo-aandrijving. Eenmaal er goede koppeling van de gereflecteerde bundel naar de laserdiode is, is het modulatiesignaal te zien in het uitgangsvermogen van de laserdiode. Een maat voor het gereflecteerde vermogen is ter beschikking via het “restlicht” dat niet naar de laserdiode afgebogen wordt.

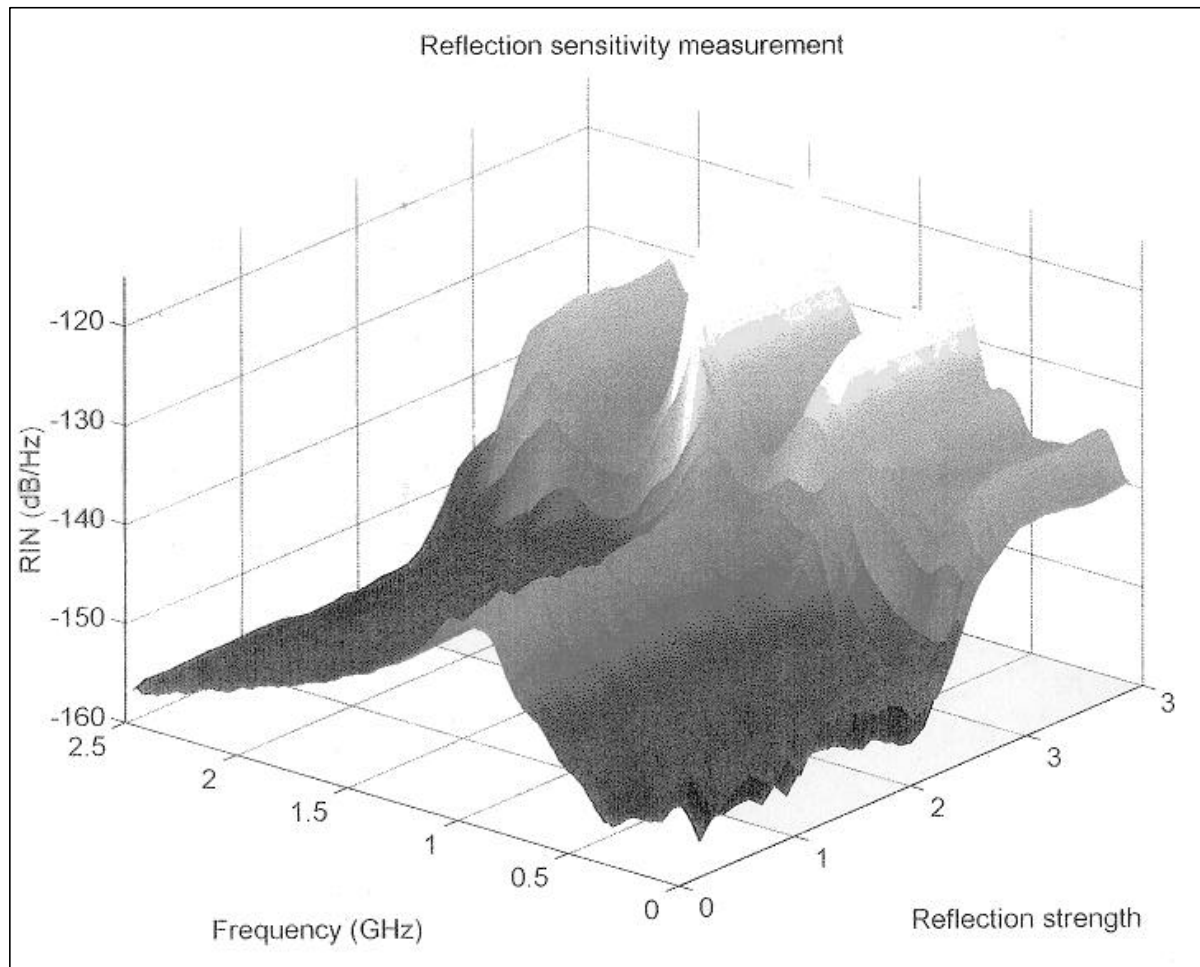


Figuur 6-11: De schematische voorstelling (bovenaanzicht) van de geïmplementeerde meetopstelling voor reflectiegevoeligheid. Rechts onder in bovenaanzicht de locatie van deze uitbreiding ten opzichte van de meetopstelling.

6.5.3.4 De metingen

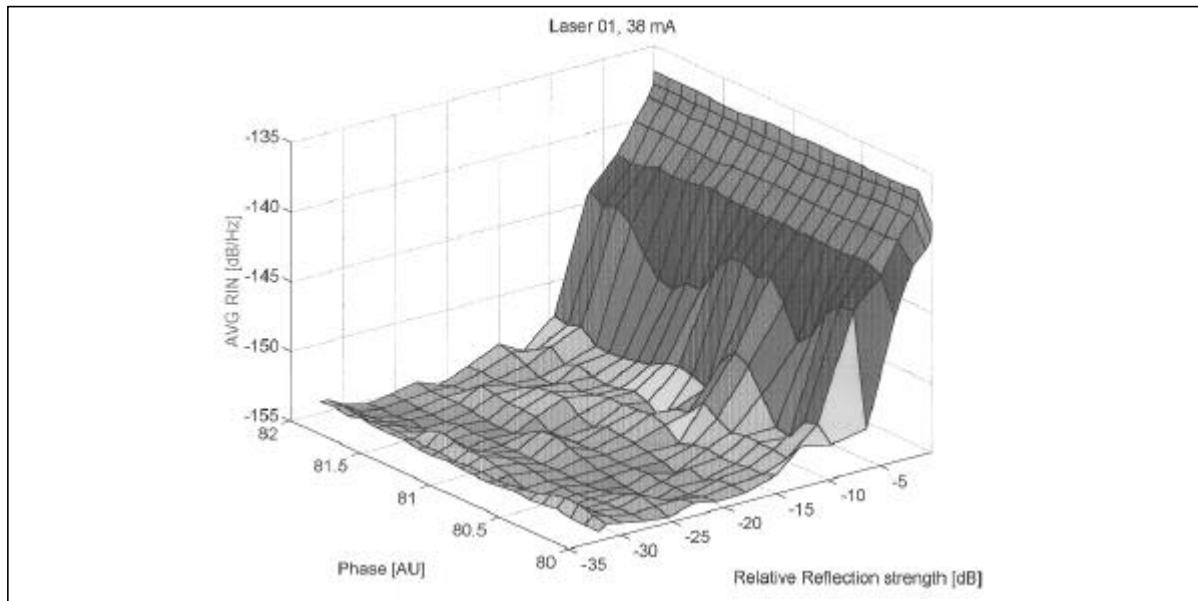
Naast het realiseren van de meetopstelling, werd er ook een hoeveelheid software ontwikkeld om de metingen te kunnen realiseren. Niet alleen de sterkte van de reflectie is van belang maar ook de fase ervan, gecombineerd met de instelstroom van de laserdiode levert dit een driedimensionale meetruimte op. Als laserparameter werd de relatieve intensiteitsruis (als functie van frequentie) opgemeten.

De ontwikkelde meetsoftware stond toe om de langdurige metingen automatisch uit te voeren en om de gegenereerde gegevens te verwerken tot handelbare proporties en interpreteerbare resultaten. Figuur 6-12 toont duidelijk hoe het RIN-spectrum verandert onder invloed van een externe reflectie. In het begin (lage sterkte), ondervindt de laserdiode nauwelijks last, bij sterker wordende reflecties wordt het effect van de externe caviteit duidelijk als extra pieken op het RIN-spectrum. De spectrale afstand van die pieken komt overeen met de vertraging in de externe caviteit. Indien de reflectiesterkte nog verder toeneemt, verandert het RIN-spectrum volledig en blijft er weinig over van de originele laserwerking, de laser bevindt zich in een toestand van coherentieverlies (“*coherence collapse*”).



Figuur 6-12 : Effect van een stijgende reflectiesterkte op het RIN-spectrum.

Figuur 6-13 toont aan hoe de laag frequente relatieve intensiteitsruis verandert onder invloed van de fase van de reflectie. Er is duidelijk te zien dat de relatieve intensiteitsruis bij lage reflectiesterkte geen hinder ondervindt van de reflectie en dat ook de fase op dit ogenblik slechts een kleine rol speelt. Wanneer de reflectiesterkte toeneemt (-15 tot -5 dB), blijkt dat niet alleen de relatieve intensiteitsruis stijgt maar dat ook de fase van het gereflecteerde licht een duidelijke rol speelt. Eenmaal de reflectie zodanig sterk is dat de laserdiode zich in een toestand van coherentieverlies bevindt, heeft de fase van het gereflecteerde licht geen enkel belang. Dit is immers eenvoudig te begrijpen doordat het gereflecteerde licht geen coherent verband meer heeft met het uitgestuurde licht.



Figuur 6-13: Het effect van de faze en de sterkte van de reflectie op de laag-frequente RIN (150MHz).

6.6 Verdere ontwikkelingen van de meetopstelling

Ook na de opbouw van het origineel ontwerp en de modificaties tijdens de evaluatie aan de hand van de metingen op de “rode laserdiodes” is er nog verder ontwikkeld aan de meetopstelling.

Ondertussen is de mogelijkheid gerealiseerd om door middel van hoogfrequente probes de laserdiode van gemoduleerde stroom te voorzien. Het aantal beschikbare laserhouders is nog steeds aan het uitbreiden en omvat ondertussen reeds de meest courante types van submounts zoals: Kyocera, Siemens, Alcatel, IMC-Silicium carrier. Maar ook volledig afgesloten verpakkingen zoals de T03 en de T05 (vooral populair voor CD-laserdiodes) zijn reeds gebruikt op de opstelling.

De opstelling is ook reeds met succes ingezet om alignatietoleranties (laserdiode naar optische vezel) op te meten, en zelfs om volledig passieve polymeergolfgeleiders uit te meten. De alignatietoleranties kunnen gemeten worden als het objectief aan de ingang van de optische bank vervangen wordt door een vezelhouder, die vervolgens door middel van een sturing van de piezo's kleine afwijkingen maakt ten opzichte van de optimale koppeling om de vermogenskoppeling te meten.

Het opmeten van het verre veld van de polymeergolfgeleiders gebeurde in het kader van het proefschrift van David Israel [6.1]. De golfgeleiders die enkele centimeter lang waren werden op de laserhouder gemonteerd en vervolgens werd licht ingekoppeld. Na een calibrering van de opstelling met behulp van een HeNe-laser was het mogelijk om nauwkeurige metingen uit te voeren voor zowel coherente (Nd:YLF-laser) als niet coherente lichtbronnen (witte lamp).

6.7 Besluit

In dit hoofdstuk werd aangetoond hoe aan de hand van een degelijk mechanisch ontwerp een meetopstelling gerealiseerd werd. De concreet uitgewerkte oplossingen voor de diverse meetmogelijkheden van de opstelling werden geïllustreerd door een korte beschrijving te geven van de implementatie. Vervolgens werden enkele voorbeelden gegeven van meetresultaten die bekomen werden gedurende een evaluatie van de meetopstelling aan de hand van een karakterisering van laserdiodes voor optische opnamesystemen. Deze evaluatie toonde aan dat de opstelling haar oorspronkelijke doelstellingen wat betreft multifunctionaliteit en uitbreidbaarheid realiseert.

-
- [6.1] “Studie van optische interconnectienetwerken op basis van multimode polymeergolfgeleiders”, D. Israel, Universiteit Gent, vakgroep informatietechnologie, doctoraatsthesis, 1996-1997

HOOFDSTUK 7

Implementatie van de meet- en extractiesoftware

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de vertaling behandeld van de in Hoofdstuk 3 beschreven principes naar concrete implementaties en realisaties. Het is noch mogelijk noch wenselijk om alle implementatieaspecten en alle geïmplementeerde toepassingen te vermelden in dit proefschrift. Niettemin is het toch relevant om de belangrijkste aspecten te belichten, de ontwikkelde implementatiemethodes en de belangrijkste toepassingen kort te bespreken.

In een eerste deel (sectie 7.2) worden de algemene keuzen verantwoord, zoals de programmeertaal en de daaruit volgende aspecten van de implementatie die moesten opgelost worden tijdens de realisatie.

In een tweede deel (sectie 7.3) wordt er dan aandacht besteed aan de ontwikkelde funderingen van de meettoepassingen zoals de functionele instrumentdriver, de ODIF-bestands-interface, de praktische benadering voor de LabVIEW-C++ koppeling en de documenterings-toepassingen.

In het derde deel van dit hoofdstuk (sectie 7.4) worden tenslotte de toepassingen besproken. Deze kunnen conceptueel opgesplitst worden in drie fundamentele gevallen: de standaardtoepassing, de “engine”-toepassing en de extractietoepassing. Telkens worden de belangrijkste implementatieaspecten ervan kort besproken aan de hand van een voorbeeld.

Tenslotte wordt in het laatste deel (sectie 7.5) een overzicht gegeven van de gerealiseerde toepassingen.

7.2 Algemene aspecten van de implementatie

7.2.1 Keuze van de programmeertalen

De analyse van het probleem in hoofdstuk 3 werd volledig onafhankelijk van een programmeertaal uitgevoerd, bijgevolg is de keuze vrij en loont het de moeite om de keuze van de taal even van dichterbij te bekijken. In tegenstelling tot hetgeen vaak verondersteld wordt, is het niet omdat een probleem geanalyseerd werd in termen van objecten dat er per definitie een objectgeoriënteerde taal moet gebruikt worden. Een dergelijke keuze is vaak ingegeven door een historische achtergrond en meestal niet geargumenteed. Het is dan ook correcter om aan de hand van de randvoorwaarden van het totale probleem een gefundeerde keuze te maken zodat de

gekozen programmeertaal niet alleen het probleem implementeert, maar dat ze ook de totaaloplossing ondersteunt en versterkt.

De software die in de context van dit proefschrift ontwikkeld werd heeft een aantal verschillende aspecten die reeds uitvoerig behandeld werden. In het kort zijn er vier belangrijke componenten : er is een sterke interactie met meettoestellen, er is de nood aan een grafische front-end, er moet een mechanisme zijn dat toestaat om de in hoofdstuk 3 voorgestelde objecten afzonderlijk te implementeren (zonder dat telkens alle code gecompileerd moet worden of zelfs beschikbaar moet zijn) en tegelijkertijd in staat is om de complexiteit van het framework te verbergen voor de eindgebruiker zodat hij in staat is de objecten te gebruiken zonder een gedetailleerde kennis ervan.

De term “objectgeoriënteerd” wordt vaak aanzien als een equivalent voor de programmeertaal C++. Deze taal is zeker in staat objecten te implementeren en bovendien zijn er ook vanuit verschillende fabrikanten softwarebibliotheken ter beschikking voor de implementatie van de grafische front end en de interfaces naar meetinstrumenten.

Naast de klassieke softwarewereld is er ook de wereld van meet- en automatiseringssoftware, die de laatste jaren vooral gekenmerkt werd door het volop doorbreken van de grafische programmeertalen. Bij dergelijke talen wordt een programma geïmplementeerd door het grafisch verbinden van iconen (die functies of subprogramma's voorstellen). Deze verbindingen definiëren de dataflow (het programma), hetgeen de (grafische) compiler toestaat om uitvoerbare code aan te maken. De meest bekende voorbeelden van dergelijke talen zijn HP-VEE (van Hewlett Packard) en LabVIEW (van National Instruments).

Voor de toepassingen in dit proefschrift zijn deze talen zeker een goed alternatief : er zijn reeds vele softwarebibliotheken voor diverse meetinstrumenten ter beschikking en naast de metingen kunnen de talen natuurlijk ook gebruikt worden om andere dingen te implementeren. Bovendien hebben de bijhorende programmeeromgevingen per definitie een grafische editor voor grafische gebruikersinterfaces aan boord. Als het mogelijk zou zijn om via een mechanisme nieuwe iconen (grafische functies) met de voorgestelde objecten te associëren en deze vervolgens met de grafische editor te bewerken en te verbinden, zal er geen wezenlijk verschil bestaan tussen de objecten en de originele grafische functies. Deze benadering heeft als groot voordeel (vergeleken bij de C++ aanpak) dat er geen tijd hoeft geïnvesteerd te worden in het schrijven van de nodige software om de grafische bewerkingen te realiseren. Een nadeel van de huidige generatie grafische programmeertalen is echter dat ze geen mechanismen bevatten die het objectgeoriënteerd programmeren ondersteunen. Bijgevolg zal een combinatie van een grafische en een klassieke programmeertaal de beste keuze zijn, onder het motto : “gebruik het beste gereedschap voor elke taak”.

HP-VEE en LabVIEW zijn beide grafische programmeertalen, ontwikkeld met het oog op metingen. Beide beschikken ze over een uitstekende editor voor de grafische gebruikersinterface en de grafische programmering. Ze bevatten tevens allebei een uitgebreide bibliotheek met analysefuncties. De gedetailleerde vergelijking tussen LabVIEW en HP-VEE bij de aanvang van dit werk toonde aan dat de bij HP-VEE geleverde instrumentdrivers van iets betere kwaliteit waren, maar dat ze jammer genoeg niet ter beschikking waren voor de optische meetinstrumenten (dit zowel voor toestellen van Hewlett Packard als toestellen van andere fabrikanten). LabVIEW bood bij de start van dit werk ook geen instrumentdrivers voor optische instrumenten (ondertussen zijn er reeds een aantal verkrijgbaar), maar het bood wel een betere programmeeromgeving die de ontwikkeling van eigen instrumentdrivers beter ondersteunde. LabVIEW beschikt ook over mechanismen die een rechtstreekse koppeling mogelijk maken van

grafische elementen aan code geschreven in C. Algemeen kan worden gesteld dat HP-VEE uiterst geschikt is als programmeertaal voor metingen waarbij de instrumentdrivers ontwikkeld door Hewlett Packard gebruikt kunnen worden, terwijl LabVIEW meer aspecten van een algemene programmeertaal vertoont.

Uiteindelijk werd gekozen voor de combinatie van de programmeertalen LabVIEW en C++. LabVIEW wordt bij de diverse implementaties vooral gebruikt voor de instrument-interactie, de grafische front end van de toepassingen en als grafische objectmanipulator voor de componenten van het parameterextractieframework. C++ daarentegen wordt vooral gebruikt als algemene taal om objecten en complexe algoritmes te implementeren.

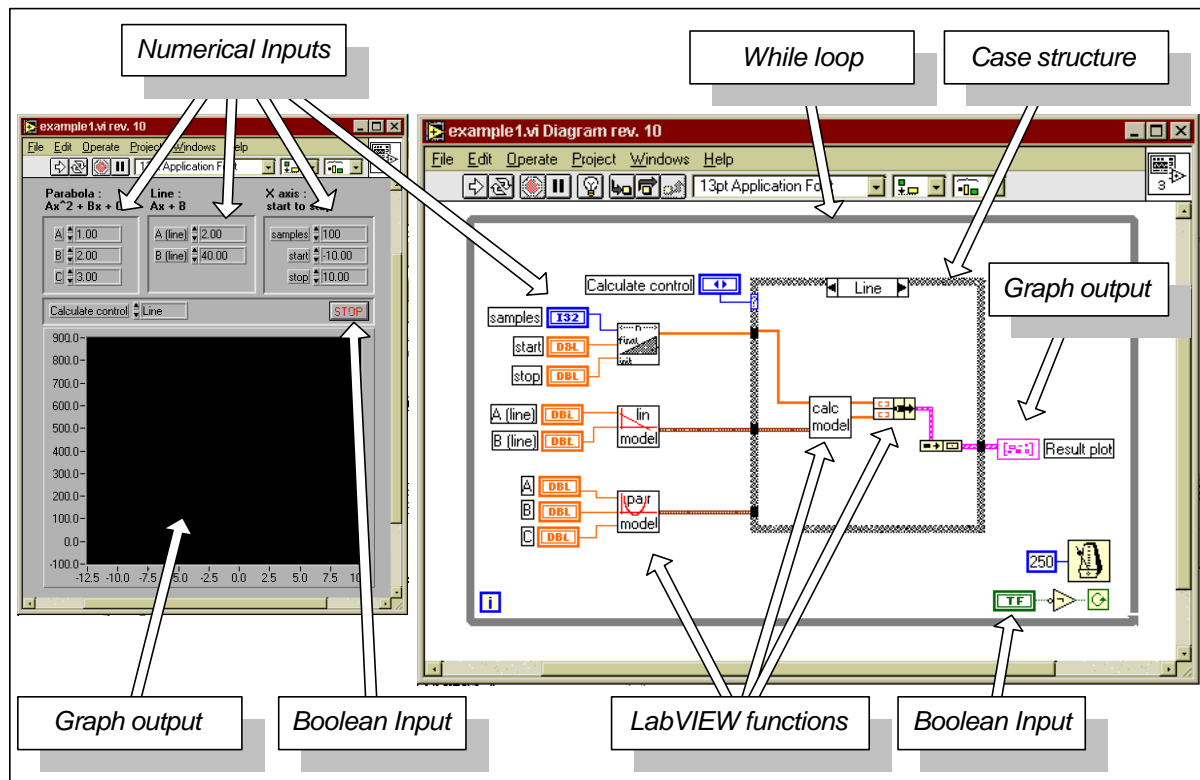
7.2.2 Een korte introductie van LabVIEW

Alvorens de combinatie van LabVIEW en C++ in meer detail te bekijken, een korte inleiding tot de begrippen en principes van LabVIEW. Zoals vermeld is LabVIEW een grafische programmeertaal, waarbij de programmering wordt gerealiseerd door grafische componenten te verbinden in een schema in plaats van lijnen tekstuele code in te geven. Figuur 7-1 geeft een voorbeeld van een programma dat in LabVIEW werd geïmplementeerd. Links op de figuur (het venster met de grijze achtergrond) is het frontpaneel of de grafische gebruikersinterface van het programma te zien, met daarop de verschillende input- en output-elementen aangeduid. Rechts op de figuur is het diagram te zien, de eigenlijke broncode, die door de compiler omgezet wordt in uitvoerbare code (zonder een tussenstap via een tekstuele programmeertaal zoals bijvoorbeeld in het geval van CASE-tools).

Elk element op het frontpaneel heeft een terminal op het diagram, bij de start van het programma zal de waarde die door de gebruiker ingegeven werd ter beschikking komen aan die terminal en over de “draden” (*wires*) propageren naar de functies.

De functies worden weergegeven door iconen die vaak een grafische indicatie van de functie tonen, bij conventie worden de ingangen van een functie aan de linkerkant geplaatst en de uitgangen aan de rechterkant. De uitvoeringsvolgorde van de verschillende functies wordt bepaald door de grafische compiler : wanneer alle ingangen ter beschikking zijn kan de functie uitgevoerd worden. Dit impliceert dat twee functies die geen dataflow-verband hebben in parallel kunnen uitgevoerd worden.

Voor elk stukje grafische code kunnen ingangen, uitgangen en een icoon gespecificeerd worden, is het met andere woorden mogelijk om via de grafische implementatie een nieuwe grafische functie (VI of “*Virtual Instrument*” in het LabVIEW-jargon) aan te maken. Deze functies worden gecompileerd op schijf bewaard (broncode, frontpaneel en gecompileerde code) en kunnen in andere stukken code gebruikt worden. Het is belangrijk op te merken dat op die manier de eigen ontwikkelde functies volledig geïntegreerd kunnen worden in het reeds beschikbare set functies. Verder dient ook opgemerkt te worden dat LabVIEW geen enkele eis stelt aan de manier waarop de verschillende functies georganiseerd zijn op de harde schijf, behalve een “logische” directorystructuur is er geen mogelijkheid tot het bijhouden van samenhangende functies.



Figuur 7-1 : Een voorbeeld van een grafische implementatie in LabVIEW. Links het frontpaneel (de grafische gebruikersinterface), rechts het diagram of de implementatie van de code.

7.2.3 De symbiose van LabVIEW en C++

Niettegenstaande het feit dat LabVIEW een heel open structuur heeft met oog op “C”, is het combineren van LabVIEW met een objectgeoriënteerde aanpak in C++ geen triviale zaak. Het was nodig om in het kader van dit proefschrift de link tussen LabVIEW en de objecten in C++ op een algemene manier uit te werken alvorens de voorgestelde objecten op een gestructureerde manier “ingebouwd” konden worden in de LabVIEW omgeving. Deze link viel uiteen in twee aspecten: een eerste aspect was de eigenlijke associatie tussen de iconen in LabVIEW en de objecten in C++, een tweede aspect was ervoor zorgen dat de overgang tussen de LabVIEW-ruimte en de C++-ruimte op een transparante manier kon gebeuren.

De combinatie van beide aspecten zorgt er voor dat het mogelijk is om objecten volledig te integreren in de grafische editeeromgeving van LabVIEW. De programmeur-gebruiker (d.i. de programmeur van verdere toepassingen die op dat moment gebruiker is van de objecten) zal met andere woorden geen wezenlijk verschil merken tussen de LabVIEW primitieven, de grafisch geïmplementeerde functies of de iconen die geassocieerde objecten verbergen (objecten die in C++ geïmplementeerd werden). Bijgevolg kan hij dan ook de objecten gebruiken zonder een gedetailleerde kennis van de onderliggende code of implementatiedetails ervan.

7.2.3.1 De associatie van iconen in LabVIEW en objecten in C++

Om de associatie tussen objecten en iconen volledig uit te werken, moet eerst het gedrag van een icoon binnen de LabVIEW omgeving bekeken worden. De informatie over de C-

link (CIN, Code Interface Node) bij LabVIEW geeft aan dat een icoon overeenkomt met een aantal functies die opgeroepen en uitgevoerd worden door de LabVIEW omgeving telkens een bepaalde gebeurtenis (“*event*”) optreedt [7.1] [7.2]. Naast een aantal functies die het gedrag van de icoon bepalen, werd ook elk CIN-icoon van een geheugenpointer (*DataStorage*) voorzien door de ontwikkelaars van LabVIEW. De CIN-icoonen kunnen op twee manieren gebruikt worden: “*re-entrant*” en “*non-re-entrant*”. De eerste manier is de meest interessante voor de objectassociatie in termen van het parameterextractieframework, bij *re-entrant* gebruik krijgt elk CIN-icoon een eigen geheugenpointer. Met andere woorden elke instantie van de icoon komt overeen met een instantie van het geassocieerde object. Bij *non-re-entrant* gebruik wordt eenzelfde geheugenpointer gedeeld door alle CIN-icoonen, hetgeen interessant kan zijn als bijvoorbeeld een object gebruikt wordt om persistentie te voorzien. Deze overeenkomst (mogelijk tot geheugen en gedrag) maakt het dan ook mogelijk om de associatie tussen objecten en iconen op een algemene manier aan te pakken.

```

class CIN_Icon
{
public :
    CIN_Icon() {CINload(); CINInit();}

    ~CIN_Icon() {CINDispose(); CINUnload();}

    UponSave() {CINSave();}

    UponAbort() {CINAbort();}

    UponCompile(){CINDispose(); CINInit();}

    UponRun() {CINRun();}

private :
    void * GetDSStorage(void) {return(DataStorage);}
    void SetDSStorage(void * p) {DataStorage = p;}

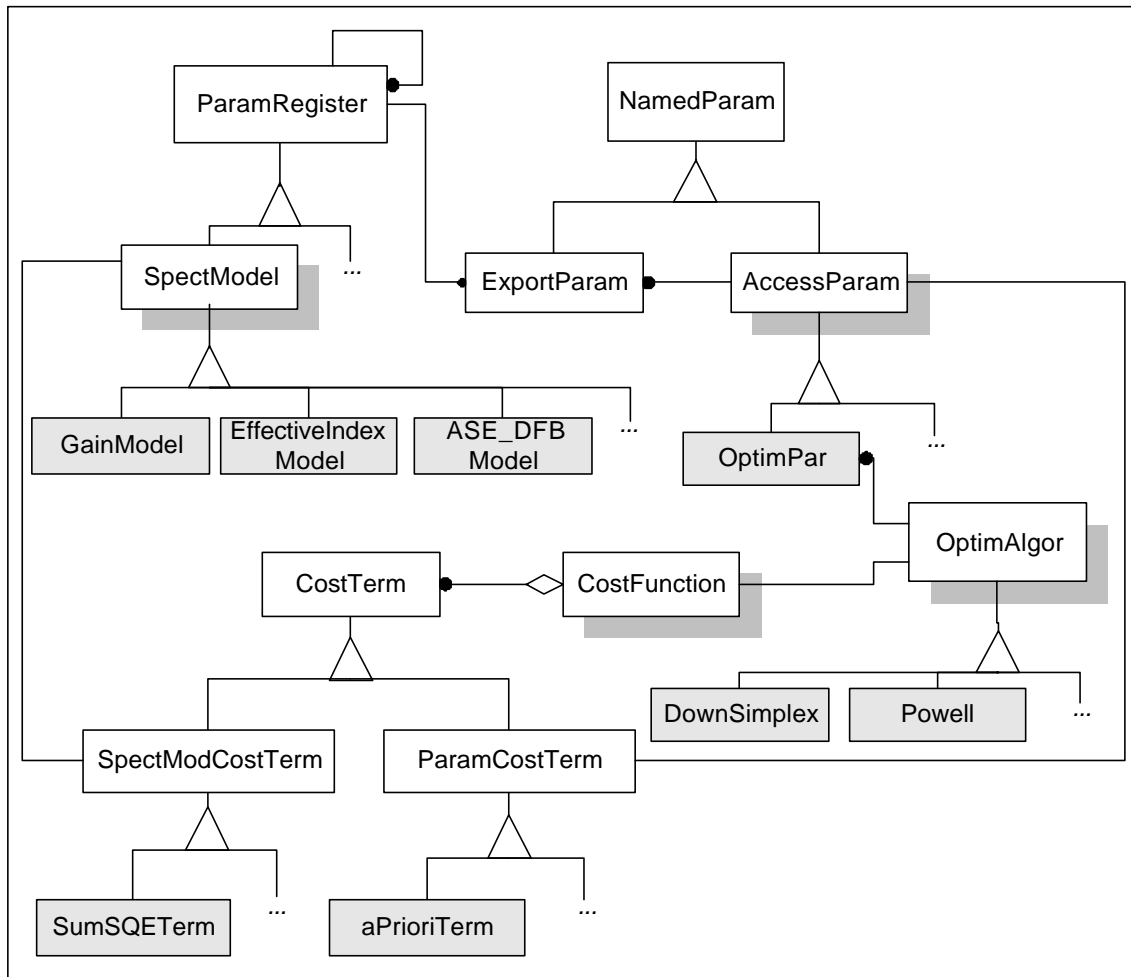
    void * DataStorage;
};

```

Figuur 7-2 : Het gedrag van een LabVIEW icoon in C++ notatie

In het kader van dit proefschrift werd de aangehaalde informatie vanuit een algemeen object standpunt bekeken. Want, net zoals een object, heeft het icoon een typische levenscyclus waarbij het aangemaakt wordt met een bepaalde hoeveelheid geheugen, vervolgens een aantal taken vervult en tenslotte verwijderd wordt. Het is dan ook mogelijk om het gedrag van een icoon te noteren aan de hand van typische C++ objectfuncties (constructors, methodes en destructors) zoals aangegeven in Figuur 7-2. Voor het framework zijn vooral de constructor, de destructor en de UponRun methode van belang. Typisch zal een geassocieerd object aangemaakt worden met de icoon (dus tijdens de uitvoering van de constructor routines CINload en CINInit), zullen methodes op het object toegepast worden tijdens het uitvoeren van de grafische code (de CINRun functie in de UponRun-methode) en zullen de geassocieerde objecten vernietigd worden wanneer de icoon uit het geheugen gaat bij het aanroepen van de destructor (de CINDispose en de CINUnload functie).

Niet alle objecten uit het in hoofdstuk 3 voorgestelde model kregen een LabVIEW equivalent. Het objectmodel bestaat immers uit twee soorten objecten: de objecten die overeenkomen met een realiteit (“echte objecten”) en de objecten die er zijn om de interactie en de abstractie van de “echte objecten” te garanderen.



Figuur 7-3 : Het volledige objectmodel met, in het grijs aangeduid, de objecten die een equivalent kregen in de LabVIEW-omgeving. De objecten waarvan een abstracte methode een equivalent in LabVIEW gekregen heeft, zijn voorzien van een schaduw.

Met de term “echte objecten” worden de objecten bedoeld waarvan de gebruiker actief gebruik kan maken. Zo zal hij bijvoorbeeld specifieke lasersmodellen, kostentermen en optimaliseringsalgoritmes moeten combineren om gebruik te maken van het framework. De andere objecten zijn voor de gebruiker verborgen, voorbeelden hiervan zijn het *SpectModel*- en het *ExportParam*-object. Figuur 7-3 geeft een overzicht van de modellen die een LabVIEW equivalent kregen.

Om met de “echte objecten” te kunnen werken heeft de gebruiker wel nog een aantal methodes nodig, zo zal hij bijvoorbeeld graag zijn gespecificeerd lasersmodel kunnen uitrekenen. Vanuit C++ oogpunt is dit het uitvoeren van de “calc”-methode die via de *SpectModel*-klasse gedefinieerd is. Om deze detailkennis te verbergen voor de eindgebruiker werden dan ook iconen voorzien die in de CINRun-functie de gepaste methode oproepen.

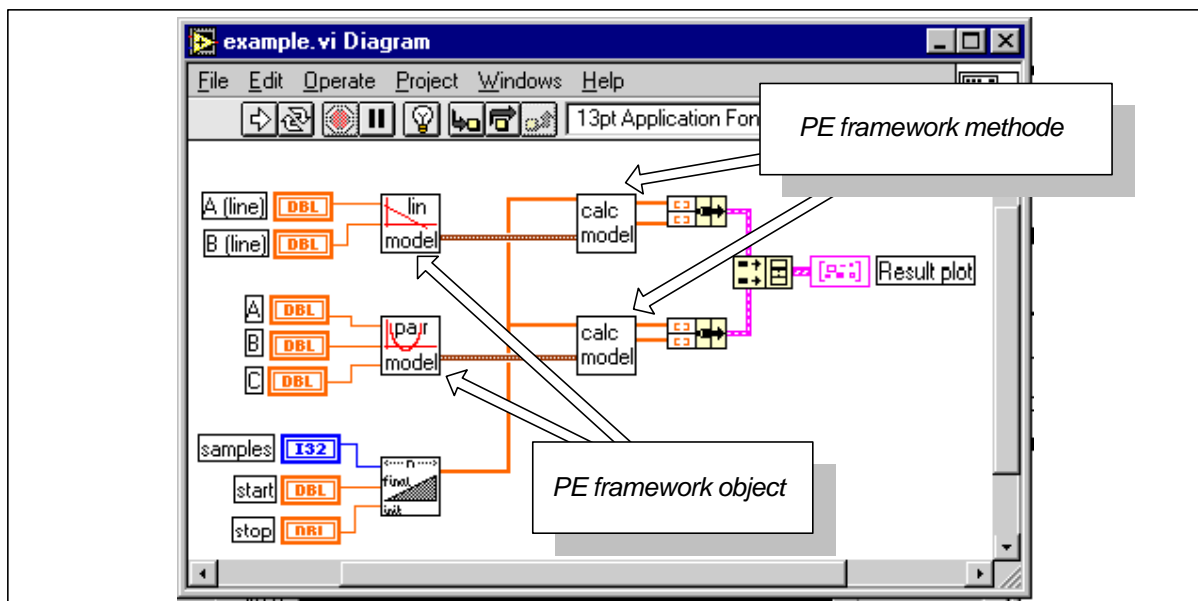
Om te definiëren hoe de objecten gecombineerd worden, worden hun LabVIEW equivalenten met elkaar verbonden door middel van “draden” in de LabVIEW grafische editor.

Doordat de LabVIEW omgeving sterke typering kent, kunnen deze “draden” als een speciaal type (voorbeeld “*SpectModel*”) gedefinieerd worden zodat de toepassingsprogrammeur impliciet geholpen wordt bij het voorkomen van implementatiefouten. Wanneer hij zou proberen om twee objecten te verbinden die niet met elkaar in verband staan, zal de LabVIEW omgeving de verbinding weigeren wegens niet overeenkomende types, hetgeen het programma onuitvoerbaar maakt.

Figuur 7-4 toont hoe het eindresultaat van deze associatie eruit ziet. Met het voorgestelde stukje LabVIEW-code worden een lineair en een parabolisch model gedefinieerd en wordt een array gegenereerd met behulp van een standaard LabVIEW-functie. Die array bevat de punten waarin de modellen met behulp van de “*calc-model*”-functie uitgerekend worden alvorens ze gecombineerd worden en samen voorgesteld worden op een XY-grafiek.

Bij de uitvoering van het programma heeft de gebruiker de indruk dat hij een model aanmaakt dat door de draad getransporteerd wordt naar de calc-icoon en dat het daar uitgerekend wordt. In realiteit wordt een modelobject aangemaakt in C++ en wordt de pointer naar dit object door de draad in LabVIEW getransporteerd, in de calc-icoon wordt deze dan terug omgezet naar een pointer in C++ alvorens de calc-methode van het door de pointer aangewezen object opgeroepen wordt.

Figuur 7-4 toont duidelijk aan hoe sterk de frameworkobjecten geïntegreerd zijn: zonder voorafgaande kennis is het niet mogelijk om uit te maken welke iconen gerealiseerd werden met grafische LabVIEW-code en welke iconen gerealiseerd werden aan de hand van objecten of methodes geïmplementeerd in C++.

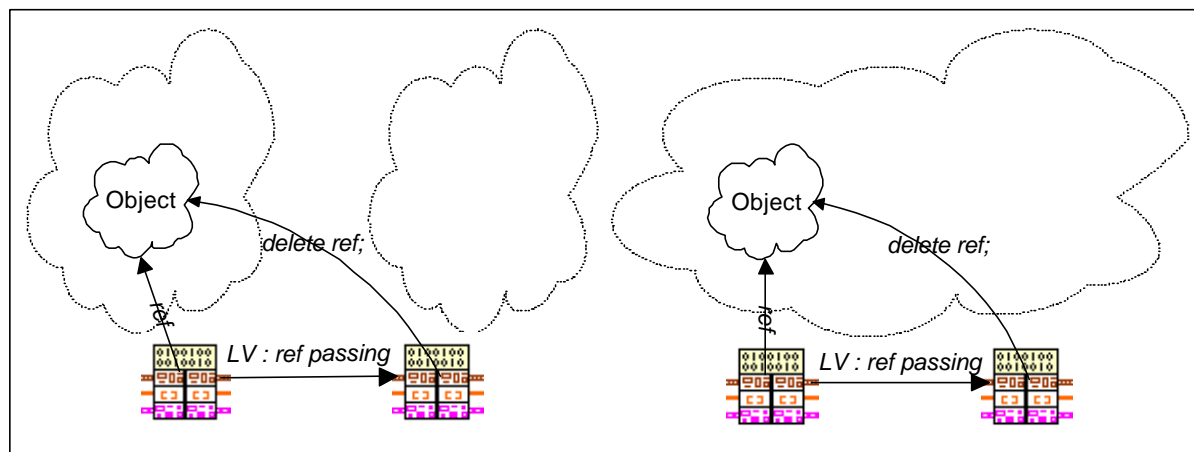


Figuur 7-4 : Een voorbeeld van de integratie van de parameterextractieframeworkobjecten in een stukje LabVIEW-code. De aangeduide iconen verbergen objecten en methodes, de andere iconen behoren tot de standaard LabVIEW-componenten.

Vooraleer de voorgestelde methode praktisch realiseerbaar was, moest nog een detail i.v.m. het geheugengebruik opgelost worden. Zoals te zien is in Figuur 7-2 bevat elk icoon een eigen geheugenpointer, die naargelang de instellingen van het icoon in LabVIEW slechts één keer bestaat of aanwezig is voor elke instantie van het icoon. Hetgeen niet kan afgeleid worden uit de figuur (of uit de documentatie van National Instruments) is dat de implementatie van

LabVIEW ervoor zorgt dat elk icoon geheugen allocceert vanuit een eigen “*heap*”, hetgeen een vlotte combinatie tussen verschillende objecten en hun methodes in de weg staat. Het heeft immers tot gevolg dat geheugen niet vrij ge(de)alloceerd kan worden, iets wat de eigenlijke combinatie van objecten onmogelijk maakt. Wanneer dit toch geprobeerd wordt, genereert het LabVIEW-programma een onrecupereerbare foutmelding en wordt het programma stopgezet.

Als algemeen bruikbare oplossing werd in het kader van dit proefschrift voorgesteld om de geheugenoperatoren (“*new*” en “*delete*”) te herdefiniëren zodat elk icoon zijn geheugen allocceert op de gemeenschappelijke LabVIEW-*heap*. (zie Figuur 7-5)



Figuur 7-5: Overzicht van de geheugenbehandeling in LabVIEW voor CIN-icoon. Links de standaard situatie in LabVIEW, het vrijgeven van het geheugen veroorzaakt een onrecupereerbare fout en stopt het programma. Rechts de situatie die in dit proefschrift gerealiseerd werd.

7.2.3.2 De interactie tussen LabVIEW C/C++

Doordat er gekozen werd voor een hybride implementatie, moet er op verschillende plaatsen informatie van de ene omgeving naar de andere overgebracht worden. Daarbij komt nog de moeilijkheid dat de geheugenallocatie in de LabVIEW omgeving impliciet gebeurt, door de omgeving zelf, waar de geheugenallocatie in de C/C++ omgeving meestal expliciet moet uitgevoerd worden. En bovendien is het niet toegelaten om zomaar geheugen dat oorspronkelijk door de LabVIEW omgeving gealloceerd werd vrij te geven of te heralloceren. De LabVIEW-omgeving moet daarvan via strikte procedures op de hoogte gebracht worden. Elke afwijking van de geijkte procedure geeft aanleiding tot een onrecupereerbare fout die het programma afbreekt.

Om die redenen werden dan ook een aantal interface-objecten gerealiseerd die ervoor zorgen dat de informatieoverdracht en de geheugenallocatie op een transparante manier gebeuren [7.3]. Hierdoor wordt niet alleen het programmeren van de eigenlijke toepassingen eenvoudiger, maar wordt de ontwikkelde software tegelijkertijd minder afhankelijk van externe factoren. Zo is er in het geval van fundamentele wijziging door de fabrikant (National Instruments) enkel een aanpassing van de interface-objecten nodig. Dit in tegenstelling tot de situatie waar de interface-objecten niet gebruikt zijn, waar alle reeds geïmplementeerde componenten en de applicaties moeten aangepast worden. Een voorbeeld van een dergelijke fundamentele verandering is bijvoorbeeld de verandering van de voorstelling van de geheugenstructuur voor een Boolese array in LabVIEW 5.0. In de vorige versies werden de verschillende

Boolese elementen opeengepakt als bits om een minimale geheugenruimte in te nemen. In de versie 5.0 werd dit verandert naar een array van *unsigned characters* (U8), dus telkens één byte per Booles element.

Figuur 7-6 geeft een voorbeeld van het gebruik van een interface-object. In de rechterbovenhoek is een deel van de code voor een CINRun functie te zien. Zoals de functiesignatuur aangeeft wordt een LabVIEW-string doorgegeven met behulp van een *handle* (LStrHandle = LabVIEW String Handle). In het executieblok wordt eerst een LVString-interface-object aangemaakt vertrekkende van de informatie die via de functie-interface doorgegeven werd. Vervolgens wordt met behulp van de “*left shift*”-operator een stukje tekst toegevoegd aan de LabVIEW string. Het geëxpandeerde stukje code in de linkerbenedenhoek geeft een idee van de code achter die operator. Het toont hoe aan de hand van een aantal pointermanipulaties en een aantal specifieke LabVIEW-CIN-functies de nieuwe tekst toegevoegd wordt aan de oorspronkelijke LabVIEW-string.

```
extern "C" CIN MgErr CINRun(LStrHandle Text,
                            LVErrorCluster * Err,)
{
    LVError Error(Err);
    LVString text(Text);
    text << "Hello World from inside CIN";
    if (text.length() > 10)
    {
        ...
    }
}

LVString & LVString::operator<<(char *s)
{
    ....
    int Size = (*L)->cnt + strlen(s);
    char *Str= (char * ) &((*L)->str[0]);
    char *buf = new char[Size + 1];
    for (int i=0;i<Size;i++) buf[i] = Str[i];
    buf[Size] = '\0';
    NumericArrayResize(uB,1L,(UHandle *) iHdlptr,Size)
    LStrLen(** iHdlptr) = Size;
    MoveBlock((void *) buf,LStrBuf(** iHdlptr),Size);
    ...
}
```

Figuur 7-6 : Voorbeeldje van het eenvoudige eindresultaat als gevolg van het gebruik van de LabVIEW-interface-objecten. (het kader linksonder toont een deel van de code waaruit de operator bestaat.)

7.2.4 LabVIEW programmering volgens de objectgeoriënteerde methode

De hybride implementatieaanpak vereiste ook de ontwikkeling van een aantal methodes om de objectgeoriënteerde aanpak te kunnen implementeren. LabVIEW is immers een programmeeromgeving die zelf geen concrete ondersteuning biedt voor de objectgeoriënteerde implementatie. Startende vanuit de sterk vereenvoudigde optiek dat een object kan gezien worden als een geheugenstructuur met een aantal interfacefuncties eromheen, zijn in het kader van dit proefschrift een aantal verschillende mogelijkheden om objecten in LabVIEW te implementeren ontwikkeld en geëvalueerd [7.4.]. Het in LabVIEW geïmplementeerde object zal ondermeer bestaan uit een aantal grafische functies (VIs), die op een logische manier samenhangen maar verder ogenschijnlijk geen verband met elkaar vertonen.

Naast de eigenlijke objectimplementaties, was ook de erfeniseigenschap vereist om de voorgestelde structuren te implementeren. Deze werd voorzien door terug te vallen op de basisimplementatiemethode : een functietabel, in LabVIEW geïmplementeerd door gebruik te maken van de mogelijkheid om stukken code dynamisch en geparametriseerd op te roepen. In plaats van de icoon voor de grafische subroutine in het diagram te plaatsen, wordt aan de hand van de “objectreferentie” tijdens het uitvoeren van de code de specifieke naam van de functie bepaald, die vervolgens dynamisch uitgevoerd wordt.

7.3 De basiscomponenten

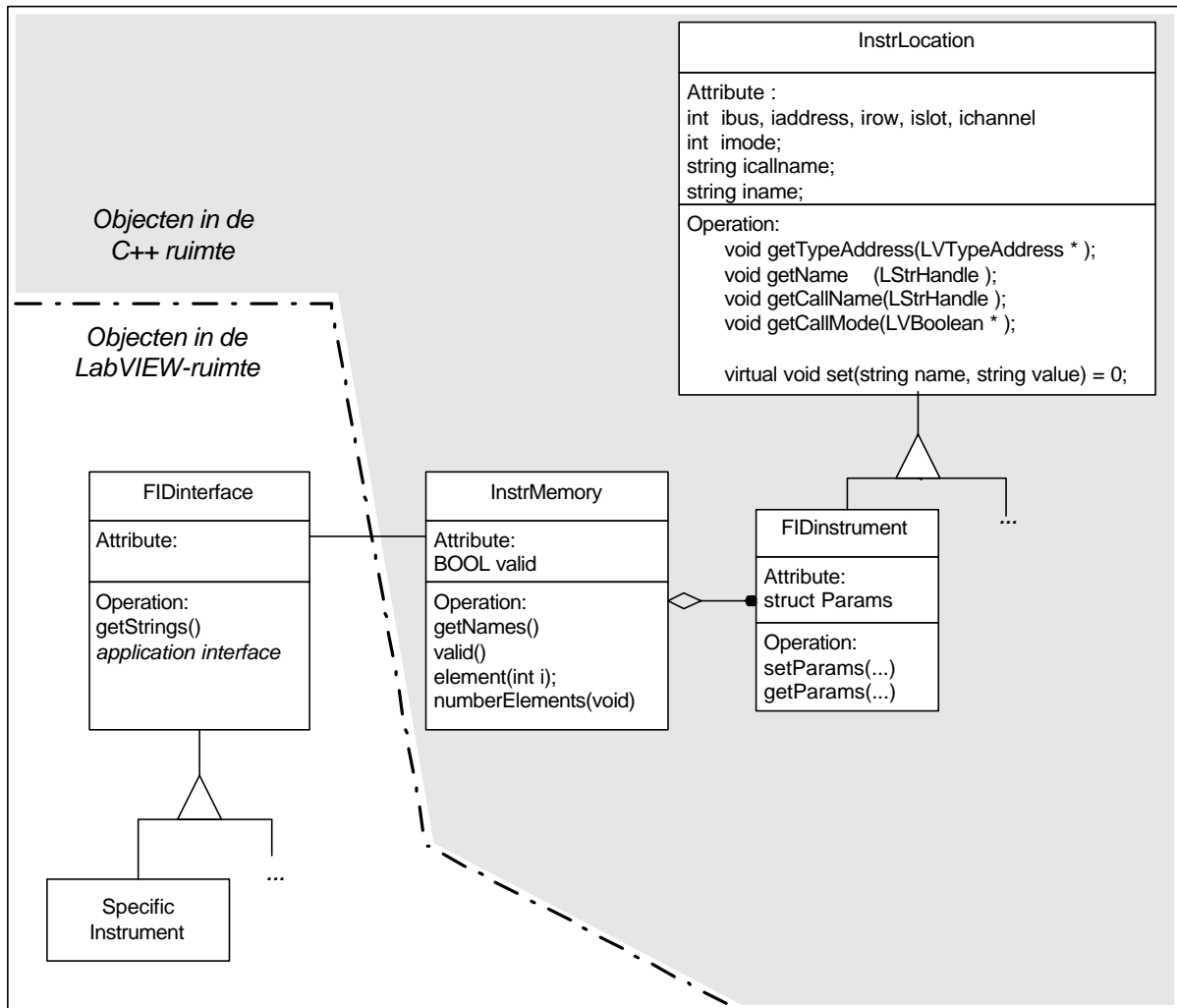
7.3.1 De functionele instrumentdriver

Zoals aangegeven in hoofdstuk 3 bestaat de functionele instrumentdriver uit een aantal basisobjecten die elk een eigen taak hebben. De implementatie van de functionele instrumentdriver zal dan ook de verschillende objecten en hun onderlinge relaties moeten behouden, waarbij het nodig is dat ten minste de interface-objecten (*FIDinterface* en *Specific Instrument*) in LabVIEW geïmplementeerd worden. Het is immers de bedoeling om de meettoepassingen in de grafische programmeertaal LabVIEW te implementeren. Anderzijds heeft een volledig grafische implementatie grote nadelen doordat een ruime functionaliteit gewenst is. Zo is het wegens de beperkingen van LabVIEW weliswaar niet onmogelijk maar uiterst onpraktisch om de geheugenstructuren van de functionele instrumentdriver automatisch te initiëren bij het opstarten, of bij het onderbreken van een toepassing. Vooral dit laatste aspect is van belang wanneer de toepassing in een ontwikkelomgeving gebruikt wordt.

Om die reden werd er dan ook verkozen om de implementatie van de specifieke geheugenobjecten (*InstrMemory*, *FIDinstrument* en *InstrLocation*) uit te voeren in C++ code. Deze methode stond ook toe om gebruik te maken van reeds beschikbare softwarecomponenten uit de STL-bibliotheek (*Standard Template Library*), hetgeen de implementatie van het geheel efficiënter deed verlopen.

Figuur 7-7 geeft een overzicht van de geïmplementeerde objecten met hun belangrijkste methodes. De erfenisrelatie tussen het *FIDinterface*-object en het *Specific Instrument*-object die in C++ via virtuele functies zou geïmplementeerd worden, werd gerealiseerd door het dynamisch oproepen van de functies in het *Specific Instrument*-object. De eigenlijke implementatie van die interface-objecten (*FIDinterface* en *Specific Instrument*) bestaat uit een aantal functies die logisch gezien samenhangen en op die manier het object vormen. Zoals vermeld ondersteunt LabVIEW immers niet rechtstreeks objecten en is een goede directory-structuur de enige manier om de functies te organiseren.

Voor de volledigheid moet opgemerkt te worden dat de code voor de implementaties van de objecten *InstrMemory* en *InstrLocation*, samen met de eigenlijke code die voor de link tussen de LabVIEW en de C++ ruimte zorgt, identiek is voor alle functionele instrumentdrivers, hetgeen codehergebruik mogelijk maakt. Enkel de interface objecten (*FIDinterface* en *Specific instrument*) en de attributen van het *FIDinstrument* object zijn verschillend voor elk type functioneel instrument.



Figuur 7-7: Plaats van de implementatie en de belangrijkste methodes voor de objecten van de functionele instrumentdriver

7.3.2 De ODIF bestandsinterface

In hoofdstuk 3 is er een hiërarchische informatiestructuur voorgesteld om de data-stockering en de communicatie tussen de verschillende toepassingen op een vlotte manier te laten verlopen. Het is dan ook nodig om een goede interface te voorzien om de toegang tot de informatie in die bestanden op een eenvoudige manier te laten verlopen.

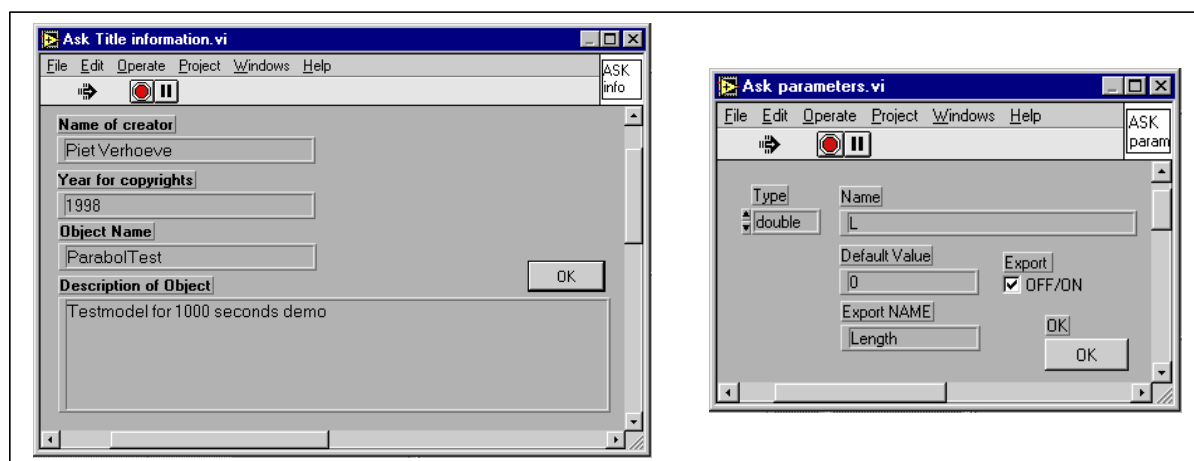
Om de flexibiliteit van het dataformaat te ondersteunen, werd bij de ontwikkeling van de interfacesoftware de nodige abstractie gehanteerd: de basiselementen van ODIF (*EntryLine*, *Table*, *SettingBlock*, ...) werden omgezet in objecten die de gebruiker via de interface kan opvragen, manipuleren (inhoud veranderen, informatie toevoegen of verwijderen) en opnieuw kan wegschrijven naar een bestand op de harde schijf. Op die manier wordt de toch wel complexe structuur van de bestanden verborgen gehouden voor de gebruiker en kan deze op een eenvoudige manier via referenties (namen) toegang krijgen tot de informatie. Dit, in tegenstelling tot klassieke bestandsinterfaces waar het altijd nodig is om de gedetailleerde inhoud van een bestand te kennen. Het geheel werd geïmplementeerd door Ing. G. Diet in het kader van zijn eindwerk [7.5].

Naast de eenvoudige toegang staat een dergelijke aanpak ook toe om foutcontrole uit te voeren tijdens het creëren van een bestand. Gezien de hiërarchische structuur van het bestand formeel vastgelegd is bij de definitie ervan, kunnen deze regels ingebouwd worden in de toegangssoftware en op die manier de minder ervaren gebruikers beletten fouten te maken bij het aanmaken van bestanden.

7.3.3 De C++ objecten in LabVIEW

Zoals reeds aangegeven in sectie 7.2.3 worden enkel de “echte” objecten (de objecten waar de eindgebruiker rechtstreeks mee werkt) en de algemene methodes van de abstracte objecten voorzien van een equivalent in LabVIEW. Het aanmaken van de LabVIEW-icoonen voor de abstracte methodes, is een eenmalige handeling. Het aanmaken van LabVIEW-icoonen voor de lasermodeobjecten daarentegen is een handeling die meermaals voorkomt, met name iedere keer een model toegevoegd wordt aan de bibliotheek. Doordat het aanmaken een vastgelegde procedure is en doordat de nodige code (op de eigenlijke berekeningen na) identiek is, is het mogelijk om het aanmaken van deze lasermodeobjecten (ten dele) te automatiseren door codegeneratoren te voorzien.

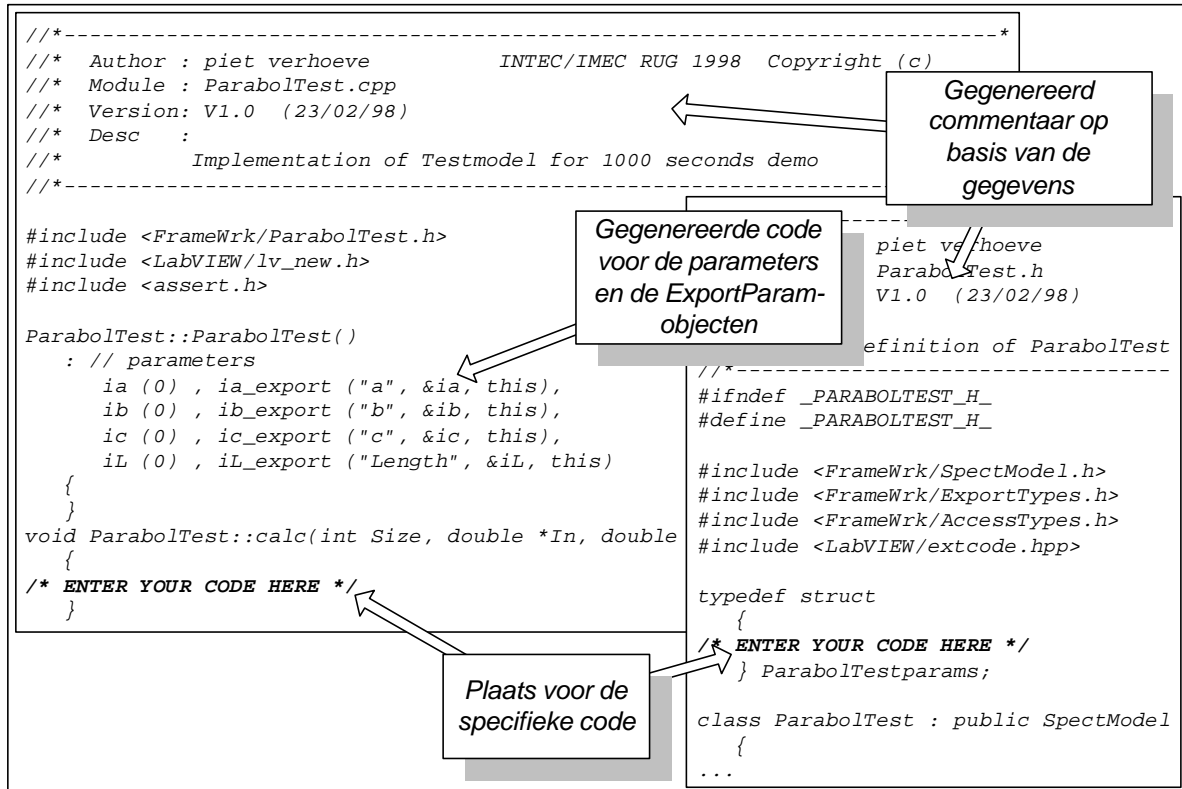
Er werden dan ook codegeneratoren ontwikkeld (in LabVIEW geïmplementeerd), die aan de hand van de minimaal vereiste gegevens, de nodige C++ code aanmaken. De gebruiker moet via een aantal dialoogvensters (zie Figuur 7-8) enkel de gegevens van het lasermode (naam, beschrijving, ...) en de gegevens van de parameters ervan (naam en type) specificeren. De codegenerator maakt vervolgens de standaardcode aan, deze bestaat uit een header- en een implementatiebestand voor het object (zie Figuur 7-9) en het CIN-bestand voor de LabVIEW-integratie. De gebruiker moet dan enkel nog de eigenlijke code voor de berekeningen implementeren op de aangeduide plaats. Merk op hoe de implementatie van het framework de constructie met het *ParamRegister*-object en de *ExportParam*-objecten reduceert tot het neerschrijven van een *initialiser* in de objectconstructor.



Figuur 7-8 : Voorbeeld van de belangrijkste dialoogvensters van de in LabVIEW geïmplementeerde codegenerator. Links worden de basisgegevens over het model verzameld, rechts is het venster te zien waar de gebruiker de eigenschappen van elke parameter kan specificeren.

Door de huidige structuur van LabVIEW, is een dergelijke benadering nog niet mogelijk binnen de LabVIEW-omgeving, maar eenmaal de fabrikant de mogelijkheid tot

automatische codegeneratie zou openstellen voor de gebruikers van de programmeeromgeving, is ook de LabVIEW-code eenvoudig te generen. Als tussenoplossing kan de gebruiker van het framework nu reeds een stukje voorbeeldcode kopiëren en zelf de parameters aanpassen voor het lasermodel.



Figuur 7-9 : Een voorbeeld van de gegenereerde code. Links is het implementatiebestand (.cpp) van het nieuwe lasermodelobject te zien, rechts is het bijhorende headerbestand (.h) te zien.

7.3.4 Documentatie van de toepassingen

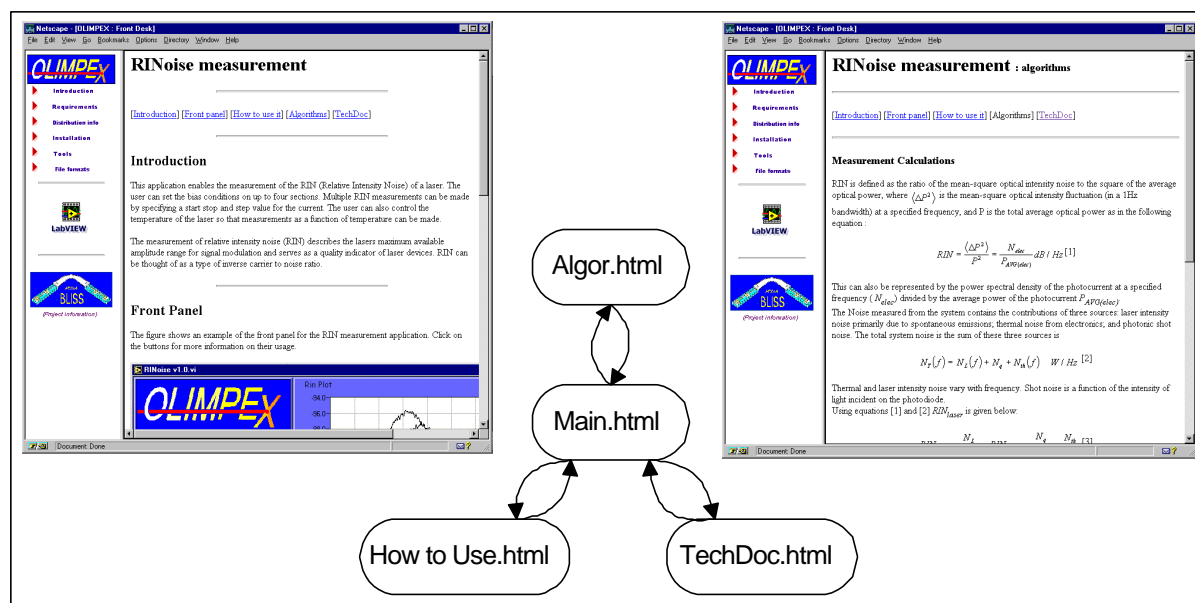
Zoals bij elke ontwikkeling, is documentatie ook hier onontbeerlijk. Niettegenstaande er reeds vele discussies en publikaties geweest zijn omtrent documentatie, is het toch nuttig om het aspect van documentatie binnen dit proefschrift iets dichterbij te bekijken. De meeste aanpakken voor documentatie zijn immers gebaseerd op een grote discipline van de programmeur en zijn meestal toegespitst op een bepaalde omgeving of taal. Zo is er de methode van literated programming [7.6], die gebruik maakt van speciale commando's om de documentatie samen met de code te kunnen implementeren. Vervolgens kunnen er speciale toepassingen gebruikt worden om aan de hand van die bestanden de eigelijke documentatie te genereren, voorbeelden hiervan zijn Web [7.7], Cweb [7.8] en Noweb [7.9]. Niettegenstaande deze methodes zeker hun verdiensten hebben, eisen ze een sterke discipline van de programmeur en zijn ze niet bruikbaar in combinatie met grafische programmeertalen zoals LabVIEW.

De voorgestelde hybride aanpak waarbij de implementatie verstrengeld is in twee programmeertalen eist bijgevolg dat de documentatie in staat is om de beide programmeertalen op een eenvormige manier te documenteren. Bovendien moet de documentatie zo eenvoudig

mogelijk aan te maken en te onderhouden zijn (idealerweise semi-automatisch), zodat de drempel tot het documenteren zo laag mogelijk gehouden wordt.

Documentatie kan algemeen gezien worden op drie niveaus, met name : de eindgebruiker, de expertgebruiker en de programmeurgebruiker, elk niveau met zijn specifieke noden. De eindgebruiker is degene die de toepassingen gebruikt, hij is vooral geïnteresseerd in de “gebruikershandleiding”. De expertgebruiker kan gezien worden als een eindgebruiker die graag weet wat hij doet, met andere woorden naast de gebruikershandleiding moet er ook informatie toegevoegd worden over de gebruikte modellen en de wiskundige aspecten van de toepassing. De laatste categorie, de programmeurgebruiker, gaat nog een stap verder : hij wenst een volledig overzicht van de gebruikte implementatiemethodes en zou in staat moeten zijn om, aan de hand van de documentatie, veranderingen aan te brengen in de geïmplementeerde code zonder al te grote moeilijkheden. Gezien de grote verschillen tussen de niveaus één en twee versus niveau drie, werd ervoor gekozen om de eerste twee niveaus van de documentatie te combineren en het derde niveau onafhankelijk ervan te implementeren.

Om de documentatie tegelijkertijd zo toegankelijk mogelijk en toch zo eenvoudig mogelijk onderhoudbaar te maken, werd voor een HTML-aanpak gekozen. Op die manier kan elke component van de documentatie aangepast, toegevoegd of verwijderd worden, zonder dat dit drastische gevolgen heeft; de toegankelijke versie is altijd de meest recente. Om de documentatiedrempel zo laag mogelijk te houden, werden er tools ontwikkeld die de verschillende HTML-bestanden automatisch aanmaken, zodat enkel de informatie moet toegevoegd worden.

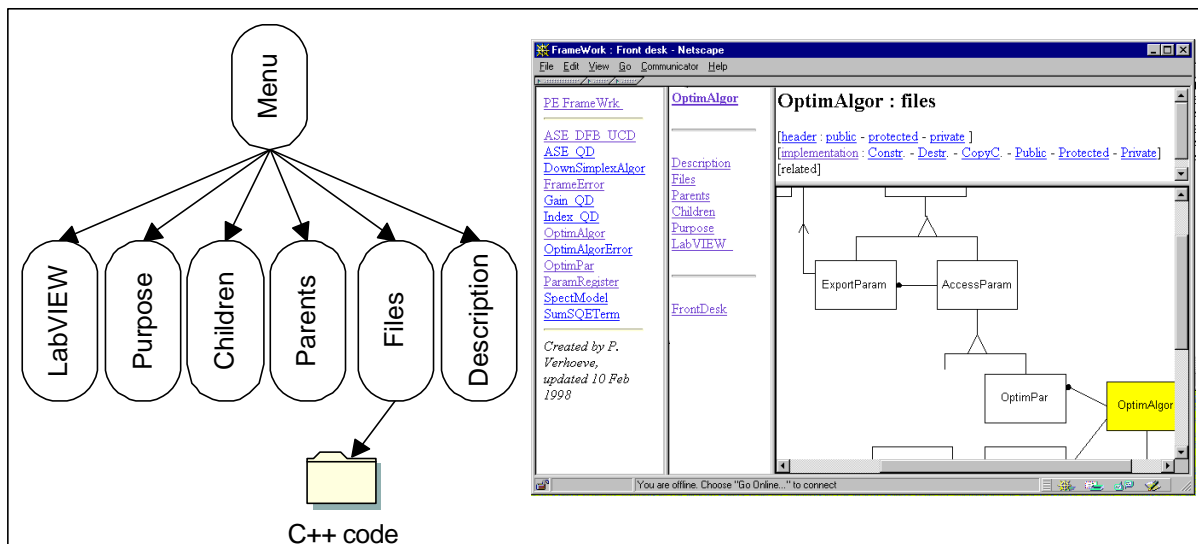


Figuur 7-10 : In het midden, het principe van de documentatie voor elke toepassing, links en rechts een voorbeeld van het eindresultaat, zoals het te zien is in Appendix D

Voor de eerste twee niveaus is de documentatie per toepassing opgesplitst en is er voor elke toepassing een combinatie van vier bestanden voorzien zoals aangetoond wordt in Figuur 7-10. Het toegangsbestand (*main.html*) bevat een algemene introductie, een beschrijving van het frontpaneel, de daaraan verbonden bestanden beschrijven de procedures om de toepassing te gebruiken (*How to Use.html*), de wiskundige achtergrond van de toepassing

(*Algor.html*), een voorbeeld van een typisch outputbestand en enkele details omtrent mogelijke foutboodschappen van de toepassing (*TechDoc.html*).

Het derde documentatieniveau, voor de programmeurgebruiker, kreeg een iets andere aanpak. Opnieuw wordt elke component, object of toepassing afzonderlijk gedocumenteerd, maar deze keer omvat de documentatie meer bestanden en zelfs een link naar de eigenlijke code. Dit laatste is nuttig om de drempel naar documentatie te verlagen : in bepaalde gevallen (eenvoudige functies, zoals object interfaces) is de uiterst eenvoudige code immers voldoende als documentatie. Wanneer het om grafische code gaat kan men niet zomaar een link leggen naar de eigenlijke code en worden de pagina's dan ook voorzien van grafische kopieën van de code. Figuur 7-11 toont een voorbeeld van de niveau 3 documentatie voor een C++ object uit het parameterextractieframework. Links op de figuur is de structuur van de html-bestanden weergegeven die de informatie bevatten : een beschrijving van het object, de objecten waarvan het afgeleid is (“*parents*”) en zijn afgeleide objecten (“*children*”). Verder ook een beschrijving van de voornaamste functies van het object met betrekking tot de LabVIEW-interactie (“*LabVIEW*”) en een link naar de geïmplementeerde code (“*files*”). Meer gedetailleerde voorbeelden zijn te vinden in appendix D



Figuur 7-11 : Een voorbeeld van de U3 documentatie voor een C++ object uit het framework. Links is de structuur van de html-bestanden weergegeven, rechts is een voorbeeld gegeven van hoe een browser de informatie toont.

7.4 De basistoepassingen

7.4.1 De standaardtoepassing

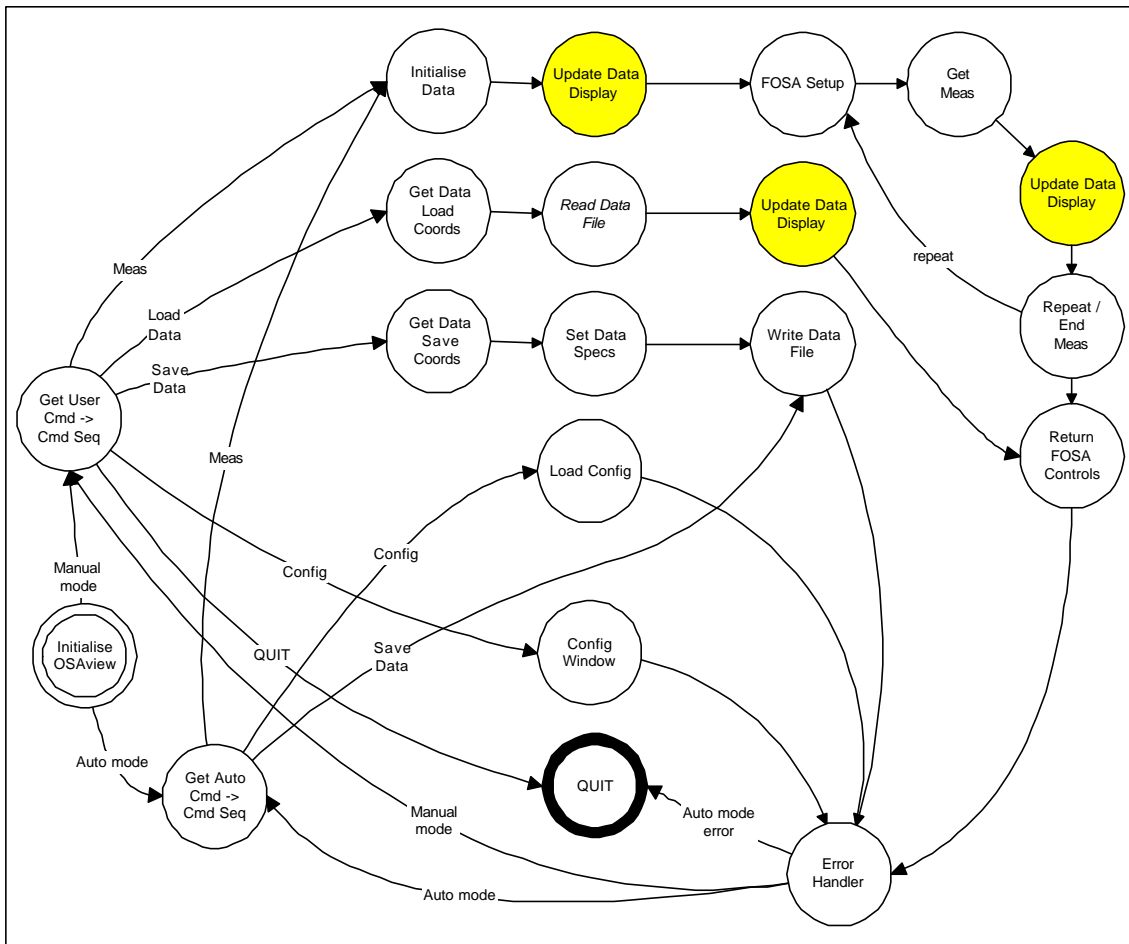
Onder de term standaardtoepassing, worden de meeste specifieke meettoepassingen gecatalogeerd. Dit zijn alleenstaande meettoepassingen met een specifieke taak, die inherent weinig of geen hergebruik van componenten toestaan. Enkele voorbeelden van dergelijke toepassingen zijn OSAview, ESAview, ... respectievelijk de optische spectrumanalyser en de elektrische spectrumanalyser implementaties op PC. Om een dergelijke toepassing te implementeren is de methode die gebruik maakt van een eindige toestandsmachine de beste aanpak. Dergelijke mechanismen zijn reeds geruime tijd bekend zowel in de hardware- als in de softwarewereld [7.10], [7.11], maar werden voor de complexe toepassingen in dit proefschrift uitgebreid met scenario's.

In tegenstelling tot de meest voorkomende implementaties van eindige toestandsmachines, wordt bij de hier ontwikkelde methode niet na elke staat beslist welke de volgende staat is, maar wordt het scenario gebruikt om de opeenvolgende toestanden te definiëren. De scenario's vormen als het ware het programma voor een geavanceerde meetcomputer (de toestandsmachine).

Om de meettoepassing doorzichtiger en beter onderhoudbaar te maken, wordt ervoor gezorgd dat de interactie met de gebruiker in één enkele staat geïmplementeerd wordt (de staat aangegeven door het cirkeltje met de tekst "Get User Cmd -> Cmd Seq" in Figuur 7-12). Eenmaal de gebruiker een taak van de meettoepassing wil uitvoeren zal deze staat de opeenvolging van de nodige staten bepalen aan de hand van de instellingen op het frontpaneel. Vervolgens worden de verschillende staten doorlopen en wordt de gevraagde taak uitgevoerd (de scenario's zijn aangegeven door de pijltjes in Figuur 7-12). Naast het samenbrengen van de beslissingslogica en de interactie met de gebruiker werden ook de displaymogelijkheden (presenteren van resultaten) en foutafhandeling in een afzonderlijke staat ondergebracht.

De methode zorgt ervoor dat de eindige toestandsmachine conceptueel eenvoudiger wordt omdat de taken voor elke staat beter gedefinieerd zijn, hetgeen voordelen heeft bij de implementatie, het debuggen en het uitbreiden van de toepassing. Doordat de afzonderlijke staten eenvoudiger (kleinere taken) worden en doordat de scenario-aanpak het hergebruiken van staten eenvoudig maakt, kan ook de hoeveelheid te implementeren code gereduceerd worden (bijvoorbeeld de "update Data-display"-toestand)

Doordat enkel het scenario bepaalt welke sequentie van staten er uitgevoerd wordt bij een bepaalde input van de gebruiker, kan de eindige toestandsmachine en bijgevolg de meettoepassing anders geconfigureerd worden *nadat* de software geïmplementeerd werd. Dit is ondermeer van belang als de toepassing van op afstand of als *plug-in* gebruikt wordt; in dat geval is het immers nodig dat alle toestanden waar input van de gebruiker verwacht wordt overgeslagen worden. Maar het is tevens een krachtig mechanisme om de meettoepassing te wapenen tegen veranderende eisen van de gebruiker. Zo is het in een onderzoeksomgeving meestal de gewoonte om het meten en het bewaren van de resultaten als twee afzonderlijke taken te zien, waar een automatische productieomgeving bijvoorbeeld zou eisen dat na de meting het resultaat onmiddellijk bewaard wordt.



Figuur 7-12 : Overzicht van de eindige toestandsmachine gebruikt bij de implementatie van “OSAVIEW”. In de cirkels worden de verschillende staten (taken) weergegeven, de pijltjes duiden de mogelijke scenario's aan. De drie grijze staten zijn identiek en werden slechts één keer geïmplementeerd.

7.4.2 De “engine”-toepassing

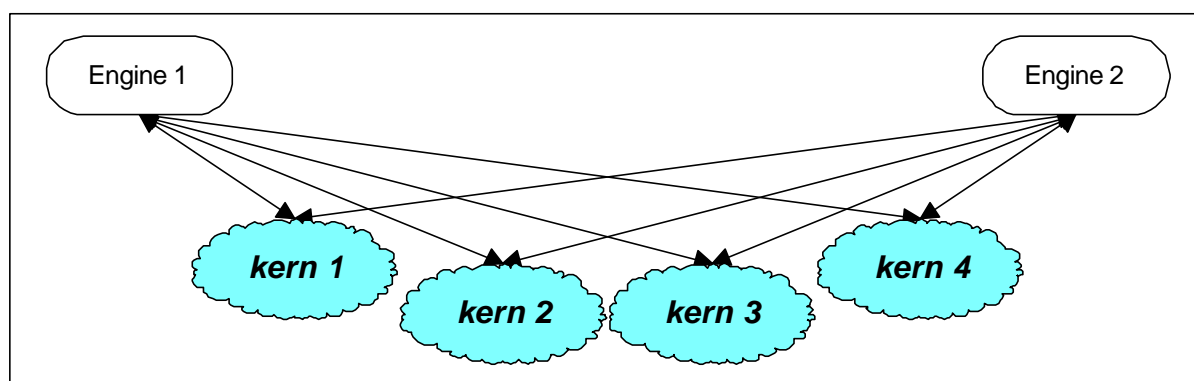
Onder de term “engine”-toepassing worden de toepassingen gecatalogeerd die meer algemeen bruikbare eigenschappen bezitten. Zo zijn er bij de karakterisering van opto-elektronische componenten vaak metingen nodig als functie van een aantal stromen (meersectie laserdiodes), als functie van een golflengte (golflengte afhankelijke filters), als functie van een temperatuur, ...

Het zou dan ook inefficiënt zijn om die algemene stukken van de software, zoals het aansturen van de stromen, telkens opnieuw te moeten implementeren om de diverse toepassingen te realiseren bijvoorbeeld : metingen van lijnbreedte als functie van stroom, golflengte als functie van stroom, geëmitteerd vermogen als functie van stroom, ...

Anderzijds zou het ook een verkwisting zijn om de code voor de geavanceerde metingen (bijvoorbeeld de lijnbreedte van een laserdiode) meerdere malen te implementeren omdat de meting moet uitgevoerd worden als functie van verschillende parameters, bijvoorbeeld : lijnbreedte als functie van één stroom, lijnbreedte bij een gespecificeerde stroom, ...

Er is dus een mechanisme nodig dat enerzijds toestaat om parametervariaties te hergebruiken (vermogen als functie van stromen, lijnbreedte als functie van stromen, ...) en dat

anderzijds toestaat om de eigenlijke metingen te gebruiken onder verschillende condities (lijnbreedte als functie van stromen, lijnbreedte bij gespecificeerde stromen, ...). In dit werk wordt hiervoor het concept van de “engine”-toepassing ingevoerd: het aansturen van de veranderlijke parameters (bijvoorbeeld de stromen) vormt een “engine”, als het ware een motor die de specifieke metingen (lijnbreedte, vermogen, ...) aanstuurt. De eigenlijke metingen vormen dan “kernen” die door de verschillende engines kunnen gebruikt worden. Hierdoor is het niet langer nodig om de verschillende combinaties van metingen en de te variëren parameters te implementeren, maar slechts het variëren van de parameters en de verschillende metingen. Dit reduceert het aantal toepassingen en vergroot tegelijkertijd de meetmogelijkheden van het geheel, zoals te zien is in Figuur 7-13 waar slechts zes (2+4) toepassingen nodig zijn. Zonder het engine-concept zouden het er acht (2*4) zijn, een relevant verschil dat groter wordt naarmate het aantal engines en kernen toeneemt.

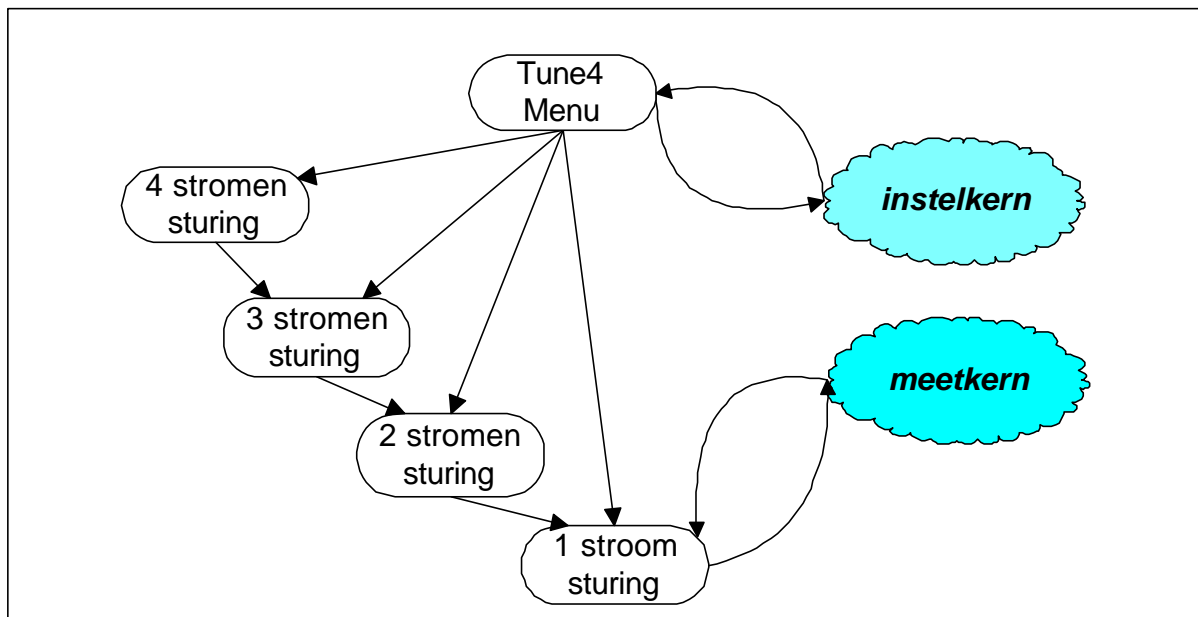


Figuur 7-13 : Verschillende “engines” delen dezelfde meetkernen.

Een dergelijk engine-concept kan gerealiseerd worden door de methodes uit het objectgeoriënteerd programmeren toe te passen. Hierbij worden de engines (het algemene stuk software) en de verschillende meetmodules als objecten gezien. Gezien de algemene software geen kennis heeft van de specifieke meting, zal de meetmodule bestaan uit twee stukken: een meetkern die de eigenlijke meting doet en een instelkern, die de gebruiker toestaat om de nodige instellingen uit te voeren. Binnen het kader van dit proefschrift werd een toepassing om een meersectielaserdiode te meten als functie van vier stromen ontwikkeld volgens dit principe. Figuur 7-14 geeft een overzicht van het principe, de witte blokjes op de figuur vormen samen het engine-object, de twee grijze blokjes vormen het meetmodule-object. De pijltjes geven aan hoe de verschillende stukken code gebruikt worden, het menu (centraal bovenaan de figuur) maakt gebruik van de instelkern om de specifieke instellingen voor de geselecteerde meting (bijvoorbeeld lijnbreedte) uit te voeren. Vervolgens wordt de code die overeenkomt met de juiste parameter variatie (bijvoorbeeld 2 stromen sturing) gebruikt om de parameters aan te sturen. Dit stuk code gebruikt op zijn beurt een ander stuk code met een kleiner aantal parameters en uiteindelijk wordt de code van de meetkern gebruikt om de meting uit te voeren.

Naast het voordeel van hergebruik van de enginesoftware en de meetsoftware, kunnen standaardtoepassingen hergebruikt worden. Het meetkernprincipe kan immers ook gebruikt worden om volledige toepassingen te gebruiken. In het kader van dit werk werden de verschillende opties geïmplementeerd: er werden twee engines gerealiseerd (Tune4 en TuneCo), een aantal specifieke meetkernen (golflengte, vermogen, SMSR, ...) en er werden

metingen uitgevoerd waarbij de combinatie van een *engine* (Tune4) en een standaardtoepassing (OSAview) gebruikt werd.



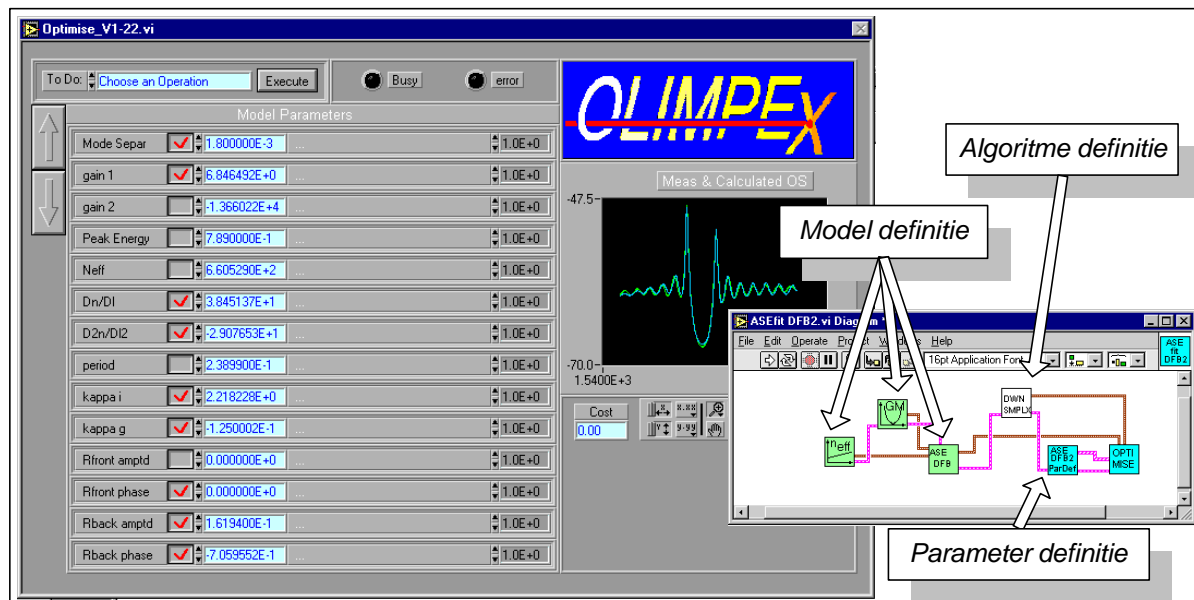
Figuur 7-14 : Implementatieconcept van de Tune4 meettoepassing, de algemene componenten zijn in het wit weergegeven, de specifieke in het grijs.

7.4.3 De extractietoepassing

De term extractietoepassing moet in de kader van dit proefschrift geïnterpreteerd worden als een toepassing die parameterextractie implementeert aan de hand van het in hoofdstuk 3 vooropgestelde objectmodel. Met andere woorden een parameterextractietoepassing die gebruik maakt van de combinatie van LabVIEW en C++.

Het zou weinig elegant zijn om een softwareframework te ontwerpen dat het parameterextractieprobleem in voldoende abstracte termen modelleert zodat modellen, kostenfuncties en optimaliseringsalgoritmes kunnen uitgewisseld worden zonder dat de ene impact heeft op de andere, en dan een specifieke grafische gebruikersinterface (GUI) implementeren voor elk geval. Er is dan ook de nodige aandacht besteed om een grafische gebruikersinterface te implementeren in een probleemafhankelijke manier zodat de specificatie van het model, de parameters en het algoritme als het ware parameters vormen voor de grafische gebruikersinterface; een voorbeeld hiervan wordt gegeven in Figuur 7-15. Links op de figuur is de grafische gebruikersinterface van de parameterextractietoepassing te zien zoals die door de eindgebruikers gebruikt wordt. In het voorbeeld is een model voor het spontane emissie-spectrum gespecificeerd. Rechts op de figuur wordt weergegeven hoe de GUI-toepassing gebruikt werd door de programmeurgebruiker die deze parameterextractietoepassing realiseerde. Op het diagram is te zien hoe (van links naar rechts) het model, het optimaliseringsalgoritme en de parameters gedefinieerd worden vooraleer ze doorgegeven worden aan de "OPTIMISE"-icoon (uiterst rechts) die de grafische gebruikersinterface-toepassing voorstelt.

Door deze aanpak kan de programmeurgebruiker zonder veel detailkennis, nieuwe parameterextractietoepassingen aanmaken steunende op de beschikbare componenten; hij kan op een korte tijd een toepassing realiseren die alle aspecten voor het fitten van modellen bevat (inclusief een gestructureerd resultatenbestand volgens de ODIF standaard).



Figuur 7-15 : Links de grafische gebruikersinterface, rechtsonder de wijze waarop de grafische gebruikersinterface gebruikt wordt via model-, algoritme- en parameterspecificatie

7.5 Het eindresultaat : OLIMPEX

7.5.1 Inleiding

De verschillende softwareprincipes die voor dit werk ontwikkeld werden en die in de vorige secties beschreven zijn, zijn uiteraard ook in de praktijk uitgewerkt. Bij de uitwerking van de verschillende toepassingen lag de klemtoon niet zozeer op een zo volledig mogelijke implementatie van de instrumenten en toepassingen, maar werd er vooral op gelet om de bruikbaarheid van de vooropgestelde principes aan te tonen in enkele concrete gevallen.

In deze sectie wordt een kort overzicht gegeven van de verschillende realisaties, voor een meer gedetailleerd overzicht wordt er verwezen naar de appendices B en D. Voor alle duidelijkheid dient opgemerkt te worden dat het aantal componenten en toepassingen nog steeds aan het uitbreiden is en dat de hier gegeven lijsten niet volledig zijn.

7.5.2 Wat is OLIMPEX ?

Zoals het oorspronkelijk de bedoeling was, zijn de verschillende toepassingen volgens een gelijkvormige filosofie ontwikkeld en vormen ze een geïntegreerd geheel. Het lag dan ook voor de hand om de toepassingen onder een gemeenschappelijke naam te groeperen en te verspreiden. De toepassingen werden onder de naam OLIMPEX ter beschikking gesteld aan een aantal partners uit het Europese project BLISS. Het acroniem OLIMPEX staat voor **O**pto-**E**lectronic **I**ntegrated **M**easurement and **P**arameter **E**Xtraction.

Met de naam OLIMPEX worden de verschillende componenten en toepassingen aangeduid die volgens de hier voorgestelde principes gerealiseerd werden. Als belangrijkste componenten zijn dat : abstracte communicatie met meetinstrumenten (volgens het principe van de functionele instrumentdriver), bestandsinterface gesteund op de ODIF-syntax en duidelijk omschreven compatibiliteitsregels voor de bestandsuitwisseling met andere toepassingen.

Tijdens de introductie van OLIMPEX in het BLISS-project, werden twee informatie-pakketjes verspreid. Bij de introductie werd onder de verschillende BLISS-partners een brochure verspreid die de grafische gebruikersinterface voor elke toepassing toont en een woordje uitleg geeft over het doel van de toepassing. Ter illustratie is deze brochure overgenomen als appendix B. Bij de release van de toepassingen, werd een CD-ROM ter beschikking gesteld die meer details bevat. Naast een beschrijving van de toepassingen is er ook een gebruikershandleiding en enkele details i.v.m. de gebruikte berekeningsmethodes. Deze CD-ROM is overgenomen in appendix D, die verder ook nog een voorbeeld bevat van de documentatiestructuur voor de programmeurgebruiker en informatie i.v.m. de ODIF-interface (inclusief de eigenlijke software zoals die ter beschikking is op het internet).

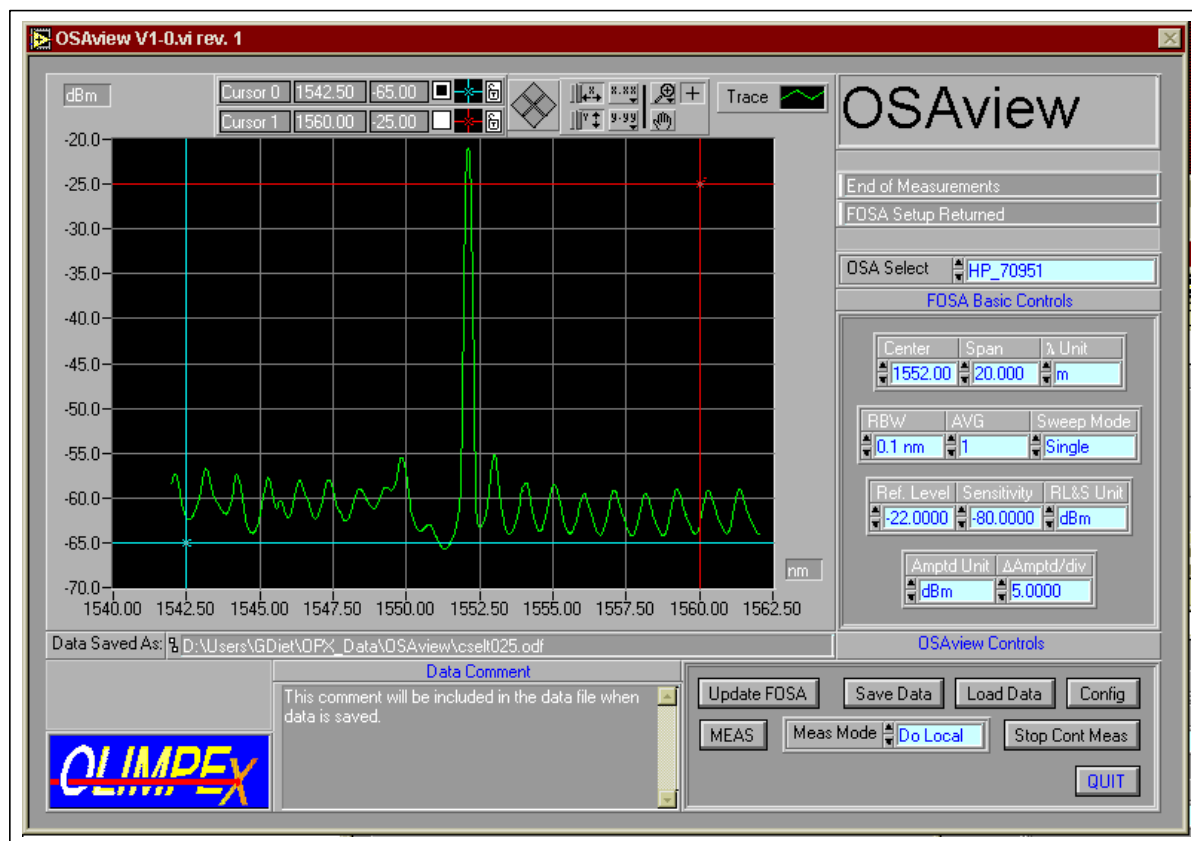
7.5.3 De gerealiseerde componenten en toepassingen

Aan de basis van de verschillende OLIMPEX-toepassingen, ligt de implementatie van de basiscomponenten zoals de ODIF-interface, het framework in C++ en de functionele instrumentdrivers. Momenteel omvat de lijst van de functionele instrumentdrivers de belangrijkste instrumenten voor opto-elektronische metingen zoals stroombronnen, optische vermogenmeters, optische spectrumanalyzers, elektrische spectrumanalyser, afstembare lasers, temperatuurcontrollers, ... De functionele instrumentdriver-lijst is nog steeds aan het uitbreiden, dit zowel wat betreft het soort toestellen als het aantal verschillende merken dat in combinatie met een bepaalde functionele instrumentdriver kan gebruikt worden.

De eerste standaardtoepassing die gerealiseerd werd kreeg de naam OSView en realiseert de functionaliteit van een optische spectrumanalyser op de computer (zie. Figuur 7-16). De eindgebruiker krijgt de basiscontrole over het toestel; hij kan instellingen en metingen uitvoeren, de resultaten van dichterbij bekijken door de cursors op de grafiek te gebruiken of een detail bekijken door in te zoomen. Natuurlijk is het ook mogelijk om de resultaten, samen met de instellingen, te bewaren in een bestand en dat later opnieuw in te lezen.

Deze applicatie werd gebruikt om het principe van het afstandsmeten te illustreren (vandaar de optie "Meas Mode : do local", rechtsonder op de figuur). Via het internet werd vanuit Brussel een meting uitgevoerd op een laserdiode die zich op de opstelling in Gent bevond. Zoals uitgelegd bij de principiële bespreking in hoofdstuk 3, sectie 3.3, werden hiervoor twee identieke OSView-toepassingen gebruikt. De versie in Brussel maakte een bestand aan met de instellingen dat via het internet doorgegeven werd aan de versie in Gent, die vervolgens in automatische mode de meting uitvoerde.

Tijdens het schrijven van dit proefschrift is ook het elektrische equivalent ESView gerealiseerd [7.12] . Zoals de naam doet vermoeden implementeert deze toepassing de functionaliteit van een elektrische spectrumanalyser op de computer.



Figuur 7-16 : De grafische gebruikersinterface van de standaardtoepassing OSAview, die de functionaliteit van een optische spectrumanalyser biedt op de computer

De tweede standaardtoepassing werd geïmplementeerd door Ir. G. Sarlet en kreeg de naam FPgain. De toepassing is bedoeld om de interne optische verliezen van golfgeleiders op te meten en te analyseren. Het is interessant om op te merken dat het meten op verschillende manieren kan gebeuren al naargelang de toepassing voor passieve of actieve componenten gebruikt wordt. Bij passieve componenten moet er een transmissiemeting uitgevoerd worden waarbij licht in de golfgeleider gekoppeld wordt en transmissieverlies opgemeten wordt. Actieve componenten genereren zelf licht waardoor de meting kan uitgevoerd worden door middel van een optische spectrumanalyser, waarvoor de FPgain-toepassing gebruik maakt van de OSAview-toepassing als *plug-in* module.

Om het principe van de *engine*-toepassing te illustreren werd de toepassing Tune4 gerealiseerd. Deze toepassing heeft als hoofddoel om “iets” te meten als functie van één tot vier stromen. Als eigenlijke meting werden initieel twee kernen uitgewerkt : één voor de golflengte-karakterisering van afstembare laserdiodes en één kern met OSAview als *plug-in* module. Recent is ook een tweede *engine*-toepassing gerealiseerd, met name TuneCo, als duale versie van Tune4. In tegenstelling tot Tune4, waar de stromen gescand worden tussen twee opgegeven waarden, vertrekt TuneCo van een opgegeven lijst met discrete punten in een vier dimensionele stroomruimte, en verricht het een meting in elk gespecificeerd punt.

De eerste extractietoepassing die gerealiseerd werd, betrof het fitten van een spontane emissie-spectrum aan een numeriek model (zoals voorgesteld in hoofdstuk 5). Een voorbeeld van deze toepassing is te zien in Figuur 7-15 bij de bespreking van de extractietoepassing. Aan

de hand van de gerealiseerde codegeneratoren, werden ondertussen andere modellen volgens hetzelfde principe gerealiseerd.

7.6 Besluit

Dit hoofdstuk beschreef de diverse implementatie-aspecten en resultaten van de meet- en extractiesoftware. Er werd aangetoond waarom gekozen werd voor een hybride implementatie (C++ en LabVIEW) en hoe deze keuze bijdroeg tot eindresultaat. Om deze hybride implementatie te kunnen realiseren werd eerst de symbiose tussen beide programmeertalen in het kader van dit proefschrift uitgewerkt. Hiervoor werd een principe ontwikkeld om objecten (in C++) te associëren met iconen (grafische functies in LabVIEW) en werd de interactie tussen beide programmeertalen op een objectgeoriënteerde manier uitgewerkt.

Het tweede deel van dit hoofdstuk toonde aan hoe de basiscomponenten voor de eigenlijke toepassingen op een algemene manier werden uitgewerkt in het kader van dit proefschrift. Zo levert de ODIF-interface een naamgebaseerde toegang tot de informatie in de bestanden en is het mogelijk om implementaties ten dele te automatiseren doordat een algemene implementatiemethode bestaat voor de functionele instrumentdrivers en de lasersmodellen in C++. Voor die modellen werd een prototype van een codegenerator geïmplementeerd. Als laatste aspect van de funderingen werd ook de nodige aandacht besteed aan een algemene benadering voor de documentatie van het geheel.

Het derde deel van het hoofdstuk behandelde de principes achter de implementatie van de drie basistoepassingen: standaard, *engine* en extractie. De ontwikkelde implementatieprincipes en hun voornaamste voordelen werden kort geschetst aan de hand van een concreet voorbeeld.

In het laatste deel van het hoofdstuk werd een overzicht gegeven van de toepassingen die volgens de beschreven principes gerealiseerd werden in het kader van dit werk. De verzameling van werkende tools voor metingen en parameterextractie bij opto-elektronische componenten kreeg de naam OLIMPEX en is momenteel nog steeds aan het uitbreiden. Enkele van de hier besproken toepassingen worden momenteel gebruikt en geëvalueerd door een aantal instituten in Europa, Canada en de VS.

-
- [7.1] “LabVIEW Code Interface Reference manual”, Chapter 3 : CIN advanced topics, National Instruments Corporation
 - [7.2] “Hands on course, LabVIEW Code Interface Node”, National Instruments Corporation
 - [7.3] P. Verhoeve, “Stretching the limits of LabVIEW : the symbiosis of Object Oriented C++ programming and G”, LabVIEW Technical Resource, Vol.6-1, 1998
 - [7.4] P. Verhoeve, “The route to G++, object oriented programming techniques in LabVIEW”, LabVIEW Technical Resource, Vol. 6-2, 1998
 - [7.5] G. Diet “PI-karakterisering van halfgeleiderlasersdiodes met LabVIEW”, Eindwerk, Katholieke Hogeschool St.-Lieven, 1995-1996
 - [7.6] D.E. Knuth, “Literate Programming”, Stanford University, Calif., 1992
 - [7.7] D.E. Knuth, “The Web system of structured documentation”, tech. Report 980, Computer Science Dept., Stanford, Univ., Calif., 1983.
 - [7.8] H. Thimbleby, “Experiences of Literate programming using CWEB (a variant of Knuth’s Web)”, Computer Journal, pp. 201-211, 1986

- [7.9] N. Ramsay, "Literate programming simplified", IEEE software, pp. 97-105, 1994
- [7.10] Gary W. Johnson, "LabVIEW graphical programming, Practical applications in instrumentation and control", second edition, McGraw-Hill, 1997
- [7.11] L. Butler, "Queued State Machines", LabVIEW Technical Resource, Vol4-4, 1996
- [7.12] W. De Decker, J. Van Dingenen, "Implementatie van meetalgoritmes voor geavanceerde laserdiodes met behulp van LabVIEW", aftudeerwerk, Katholieke Hoge-school St.-Lieven, 1997-1998

HOOFDSTUK 8

Evaluatie van de meet- en extractietools

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de in de vorige hoofdstukken (3, 4 en 5) beschreven en ontwikkelde (hoofdstuk 7) procedures en toepassingen geëvalueerd aan de hand van een aantal voorbeelden. Het eerste deel van dit hoofdstuk behandelt de gecombineerde extractieprocedure uit hoofdstuk 5, toegepast op een concrete set Fabry-Perot- en DFB-laserdiodes. Het tweede deel van dit hoofdstuk behandelt de spontane emissie-spectrum gebaseerde extractie voor de DBR-laserdiode in meer detail.

Gezien de grote hoeveelheid numerieke resultaten, zal in dit hoofdstuk enkel een overzicht gegeven worden van de belangrijkste resultaten. Zo ligt de klemtoon bij de Fabry-Perot-laserdiodes vooral op de parameterextractie gebaseerd op het relatieve intensiteitsruis-spectrum, bij de DFB- en DBR-laserdiodes ligt de nadruk op de parameterextractie op basis van het spontane emissie-spectrum.

8.2 Extractie op een set FP en DFB laserdiodes

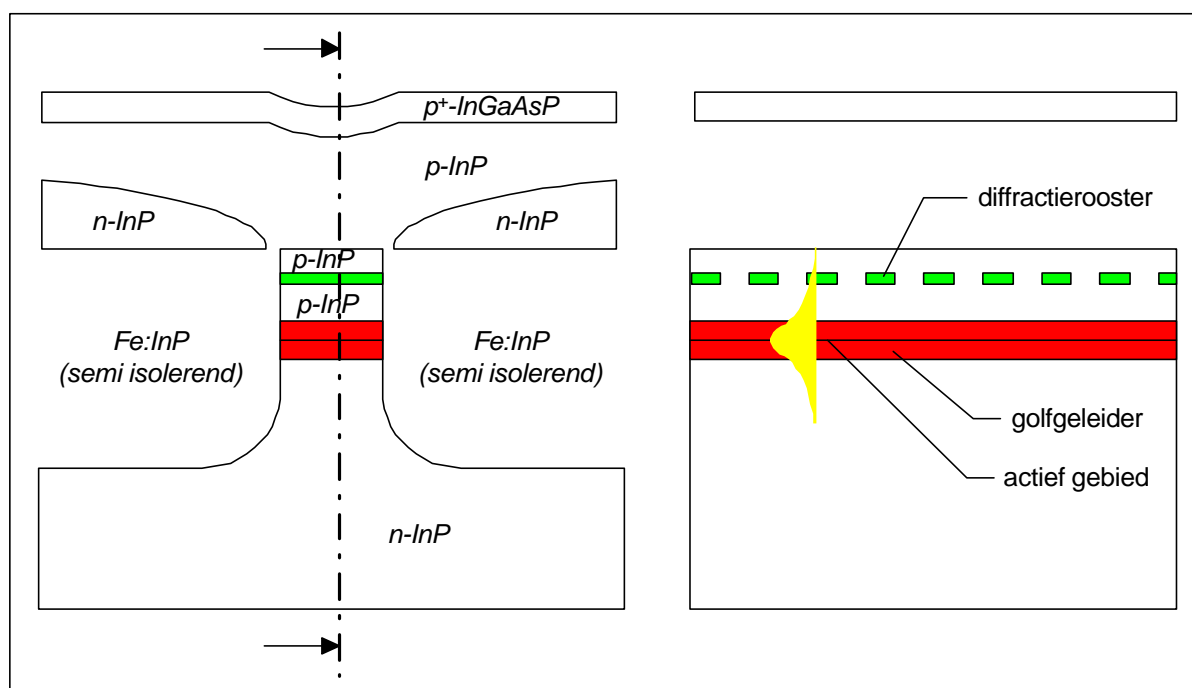
8.2.1 Beschrijving van de set laserdiodes

In het kader van het Europese project BLISS (“*Broadband Lightwave Sources and Systems*”) werden, met het oog op de evaluatie van de procedures en toepassingen voorgesteld in dit werk, negen laserdiodes ter beschikking gesteld door het in Stockholm gelegen Industrial Microelectronics Center (IMC, PO-Box 1084, S-164 25 Kista, Zweden).

Naam	Type	lengte geg/gem [μm]	Facet coating
IMC1	Fabry-Perot	160/153	-/-
IMC2	Fabry-Perot	200/190	-/-
IMC3	Fabry-Perot	300/279	-/-
IMC4	DFB	140/145	AR/-
IMC5	DFB	200/190	AR/-
IMC6	DFB	240/229	AR/-
IMC7	DFB	150/170	AR/AR
IMC8	DFB	200/188	AR/AR
IMC9	DFB	240/230	AR/AR

Tabel 8-1 : Overzicht van de ter beschikking gestelde laserdiodes.

Zoals vooropgesteld in hoofdstuk 5, zijn alle laserdiodes uit hetzelfde halfgeleidermateriaal gemaakt en hebben ze dus, op een eventuele niet-uniformiteit van de fabricage na, een identieke structuur als actieve laag. De negen laserdiodes zijn opgesplitst in drie categorieën: Fabry-Perot-laserdiodes, DFB-laserdiodes met één gecoat facet en DFB-laserdiodes met twee gecoate facetten. Elke categorie bestaat uit drie laserdiodes, elk met een verschillende lengte. Een overzicht van de laserdiodes wordt gegeven in Tabel 8-1. In de kolom met de lengte van de laserdiodes staan twee getallen: de opgegeven lengte en de lengte bepaald door meting met behulp van een optische microscoop. De specificatie “-” in de kolom van de facet coating betekent dat het facet geen coating kreeg en dus “gewoon” gekleefd gebleven is, de twee specificaties slaan respectievelijk op het voorste en het achterste facet van de laserdiode.

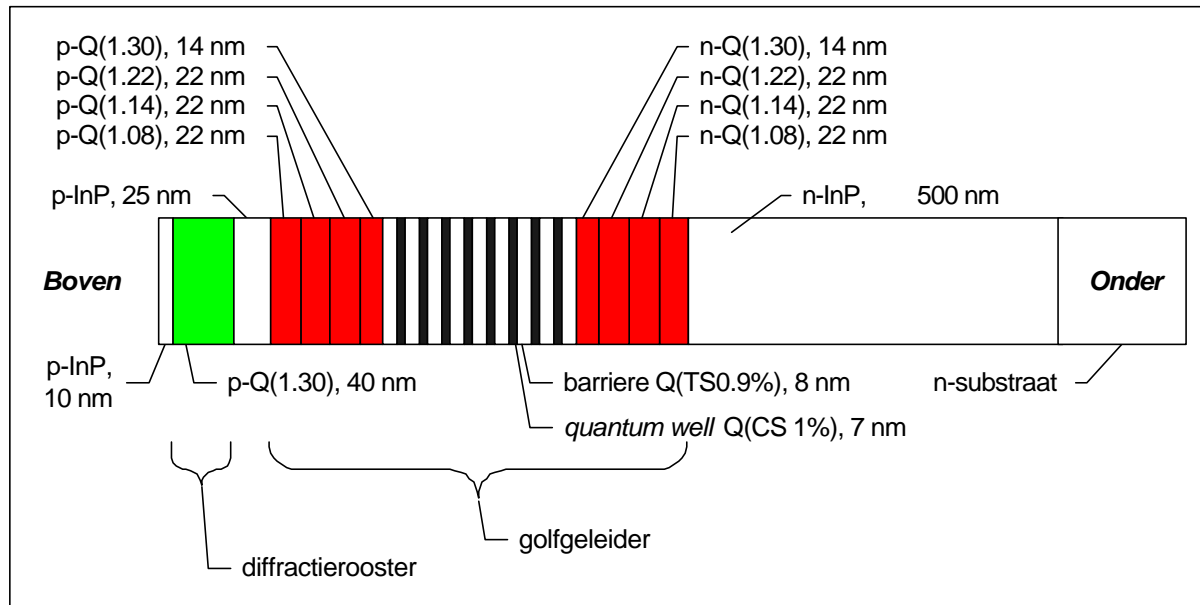


Figuur 8-1 : Links een dwarsdoorsnede en rechts een langsdoorsnede doorheen de gebruikte DFB-laserdiodes. Bij de Fabry-Perot-laserdiode is de laag voor het diffractierooster niet periodisch.

Op Figuur 8-1 zijn twee doorsneden doorheen de DFB-laserdiode voorgesteld. De periodische structuur van het diffractierooster is duidelijk te zien in de langsdoorsnede (rechts op de figuur). Bij de gebruikte Fabry-Perot-laserdiodes is deze laag wel aanwezig maar niet periodisch. De dwarsdoorsnede (links op de figuur) toont het semi-isolerende materiaal (SI-InP) dat aangebracht werd om de stroomspreiding tegen te gaan. De fabrikant schat de breedte van de mesa op 1.5 μm .

Figuur 8-2 toont de lagenstructuur van de componenten in meer detail; de diktes van de verschillende lagen zijn in verhouding weergegeven (enkel de substraatdikte werd niet correct weergegeven). De actieve laag bestaat uit een aantal “strain compensated quantum wells”, acht in het totaal, elk 7 nm dik en gescheiden door een 8 nm dikke scheidingslaag, hetgeen zorgt voor een totale actieve dikte van 56 nm. De fotoluminescentiegolflengte van het materiaal bedroeg 1580 nm.

De laserdiodes werden afgeleverd op een “*Si-carrier*”, dit wil zeggen dat de laserdiode gekleefd is op een stukje silicium en de contacten van de laserdiode verbonden zijn d.m.v. “bond-draden” waardoor het niet nodig is om de laserdiode rechtstreeks aan te proben. Door die montage was echter enkel de voorzijde van de laserdiode toegankelijk, hierdoor zijn alle metingen die in dit hoofdstuk besproken worden uitgevoerd aan de voorzijde van de laserdiode.

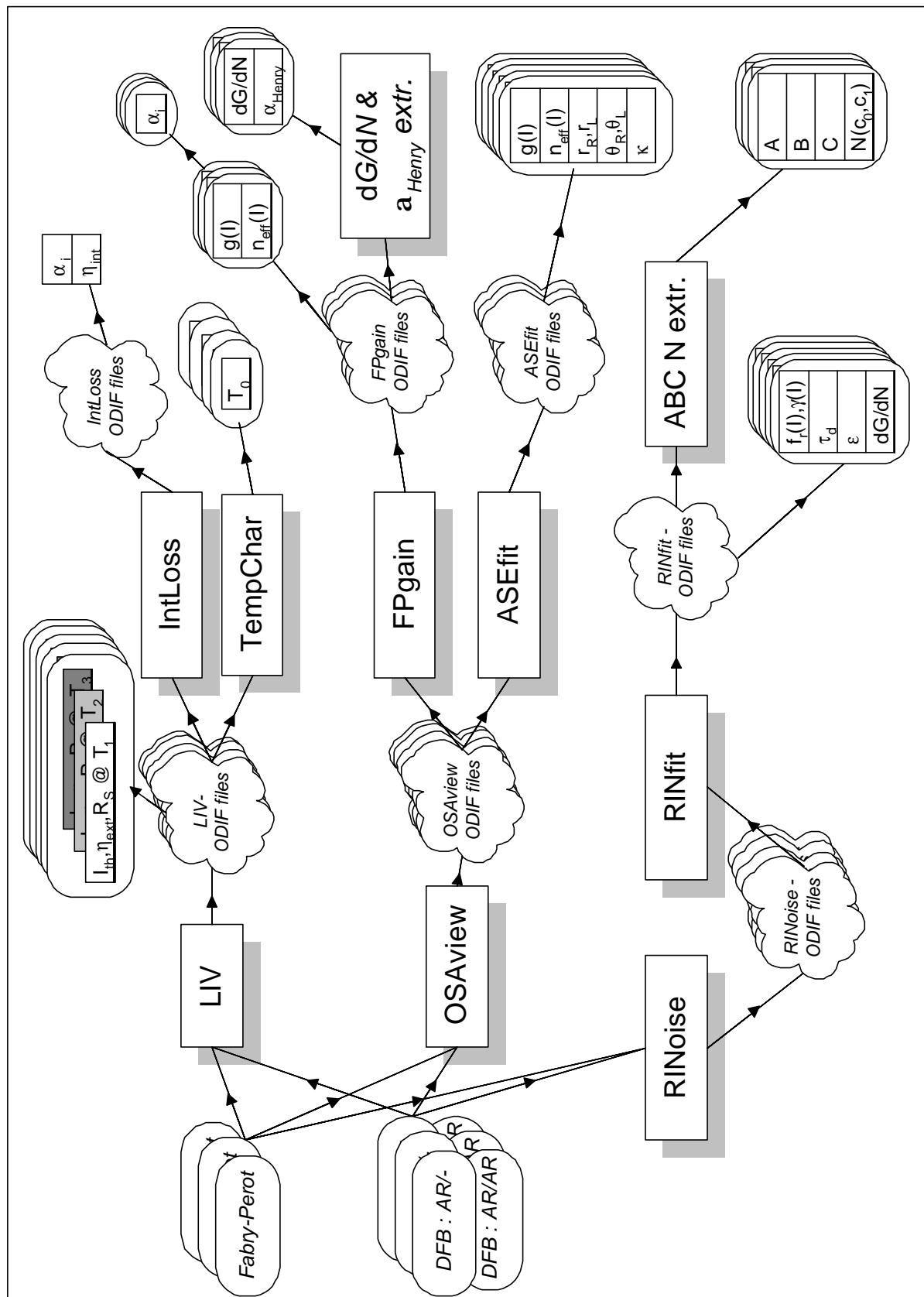


Figuur 8-2 : Detail i.v.m. de lagenstructuur van de gebruikte laserdiodes.

8.2.2 De gebruikte meetprocedure

Als aanpak voor de karakterisering van de verschillende laserdiodes wordt de methode gebruikt die in hoofdstuk 5 besproken werd. Hierbij worden eerst de laserdiodes afzonderlijk gekarakteriseerd en worden de bekomen resultaten voor de verschillende laserdiodes van hetzelfde type (Fabry-Perot, DFB-AR/-, DFB-AR/AR) vergeleken. Als deze vergelijking aangeeft dat de materiaaleigenschappen van de laserdiodes voldoende uniform zijn, kan overgegaan worden naar de volgende stap in de procedure: het combineren van gegevens bekomen op laserdiodes met een verschillende lengte. Slechts als deze stap mogelijk is, kan de laatste stap uitgevoerd worden: het combineren van de informatie van alle laserdiodes.

Figuur 8-3 geeft een overzicht van de totale procedure. Hierbij zijn de laserdiodes en hun respectievelijke resultaten weergegeven in “rechthoeken met afgeronde hoeken”. De gebruikte meettoepassingen zijn weergegeven door “rechthoeken voorzien van een schaduw” en de intermediaire bestanden met resultaten zijn weergegeven door “wolkjes”. De resultaten die niet voorkomen binnen een “rechthoek met afgeronde hoekjes” zijn resultaten die bekomen worden voor een set laserdiodes i.p.v. een afzonderlijke laserdiode (bijvoorbeeld het optisch verlies (α_i) uit de “*IntLoss*”-toepassing)



Figuur 8-3 : Overzicht van de gebruikte meetprocedure. Vanuit de laserdiodes die onderaan zijn voorgesteld worden de verschillende meet- en extractietoepassingen gebruikt om de laserparameters te bepalen.

Startende vanuit de laserdiodes (links op de figuur) worden de eerste metingen uitgevoerd op alle laserdiodes. Zowel voor de Fabry-Perot-laserdiodes als voor de twee soorten DFB-laserdiodes, wordt het spontane emissie-spectrum bij verschillende stromen beneden drempel opgemeten met behulp van de optische-spectrumanalyser-meettoepassing “*OSAview*”. Met de meettoepassing “*LIV*” worden de vermogen-versus-stroomeigenschappen van de laserdiode opgemeten. Deze meting wordt herhaald voor een aantal verschillende temperaturen van de laserhouder. De laatste eersterangsmeting is het opmeten van het relatieve intensiteitsruisspectrum bij een aantal stromen groter dan de drempelstroom met de toepassing “*RINoise*”. Deze meting (en de meting van het optisch spectrum) gebeuren enkel bij een constante temperatuur van 20 graden Celsius.

De resultaten van elke meettoepassing worden bewaard in een bestand dat voldoet aan de in hoofdstuk 3 beschreven ODIF-syntax. De eerste parameters die deze procedure oplevert zijn de drempelstroom (I_{th}), de externe efficiëntie (h_i) en de serieweerstand (R_S) voor de gemeten laserdiodes. Gezien de eenvoud van de extractie werden deze parameterextracties immers ingebouwd in de “*LIV*”-toepassing.

Bovenaan de figuur is te zien hoe vanuit de “*LIV*”-ODIF-bestanden met behulp van de toepassing “*TempChar*” de karakteristieke temperatuur kan bepaald worden door het fitten van de gemeten drempelstroomwaarden aan de in hoofdstuk 4 voorgestelde uitdrukking. In het geval van de Fabry-Perot-laserdiodes, kan aan de hand van de “*LIV*”-meetresultaten met behulp van de “*IntLoss*”-toepassing het intern optisch verlies en de interne efficiëntie van de “gemiddelde” Fabry-Perot-laserdiode bepaald worden (via de inverse efficiëntie versus de lengte van de laserdiode).

Het midden van de figuur toont hoe de metingen van het spontane emissie-spectrum gebruikt worden voor verdere extractie. In het geval van de Fabry-Perot-laserdiodes, wordt de “*FPgain*”-toepassing gebruikt, die m.b.v. de Hakki-Paoli-methode de interne verliezen en de groepsindex bepaalt van de laserdiode in de gemeten instelpunten. Vanuit deze stroomafhankelijkheid van de optische versterking en de brekingsindex van het materiaal kan dan de lijnbreedteverbredingsfactor (α_{Henry}) bepaald worden. In het geval van de DFB-laserdiodes, wordt de “*ASEfit*”-toepassing gebruikt om het gemeten spontane emissie-spectrum te fitten aan het in hoofdstuk 5 voorgestelde numerieke model, om de laserparameters te extraheren.

Het onderste deel van de figuur slaat op de extractie op basis van het relatieve intensiteitsruisspectrum, een methode die voor alle laserdiodes (Fabry-Perot en DFB) kan worden toegepast. Eenmaal het RIN-spectrum in een aantal instelpunten gemeten is, worden m.b.v. de “*RINfit*”-toepassing de verschillende spectra voor elke laserdiode gefit. De “*RINfit*”-toepassing bepaalt vervolgens ook de fysische laserparameters die uit de geëxtraheerde resonantiefrequenties en dempingen kunnen bepaald worden volgens de in hoofdstuk 5 beschreven procedure. Indien de materiaaleigenschappen van de verschillende laserdiodes voldoende uniform blijken kan vervolgens de “*ABCN-extract*”-toepassing gebruikt worden om de recombinatieparameters te bepalen voor elke categorie laserdiodes.

8.2.3 Evaluatie van de gebruikte toepassingen

De gecombineerde parameterextractie-oefening was de ideale test voor de geïmplementeerde toepassingen. Het gebruik van de toepassingen toonde aan dat ze aan hun doel beantwoorden, maar dat er ruimte was voor verbetering, zoals bij alle initiële implementaties. Het merendeel van die verbeteringen zijn echter niet van fundamentele aard en kunnen onder de

noemer “schoonheidsfoutjes” geplaatst worden. Omdat het niet de bedoeling is van dit proefschrift om een volledig en zeer gedetailleerd beeld te geven van alle aspecten die voortkwamen uit de evaluatie, wordt in deze sectie enkel een korte samenvatting gegeven van de algemene tendensen in de evaluatieresultaten.

Het meest frappante, doch vooraf verwachte resultaat van de evaluatie, is dat er een duidelijke nood is aan een gestructureerde datamanipulator. De goedwerkende meettoepassingen zijn immers in staat om op een efficiënte manier grote hoeveelheden meetresultaten te genereren. In de huidige vorm van de toepassingen wordt de selectie van de verschillende bestanden en het wegschrijven van de geëxtraheerde resultaten nog teveel overgelaten aan de gebruiker van de toepassing. Hierdoor neemt het verwerken van de vele meetresultaten een lange tijd in beslag. Een efficiënte datamanipulator zou een verdere automatisering toestaan en de totale tijdsduur van de extractie beperken.

Gedurende de testfase van de meettoepassingen werd dan ook reeds een eerste versie van een dergelijke datamanipulator ontwikkeld voor enkele specifieke gevallen. Het loont echter de moeite om deze in een later stadium verder uit te werken, zodanig dat een vlotte integratie van de verschillende meettoepassingen met een echte database voor de eigenlijke resultaten mogelijk wordt.

Ook het voorgestelde parameterextractiemodel aan de hand van de LabVIEW-C++-integratie presteerde naar behoren. Door gebruik te maken van de ontwikkelde codegeneratoren en de generieke softwarecomponenten, was het mogelijk om tijdens de parameterextractie-oefening extra modellen te implementeren en die te gebruiken in combinatie met de generieke grafische gebruikersinterface-toepassing. Deze uitbreiding toonde echter wel aan dat de oorspronkelijke beperking met betrekking tot de eenheden van de parameters en de optische spectra een te strenge eis is voor de generieke optimaliseringstoepassing.

Voor de verdere toekomst van deze geïntegreerde aanpak is het dan ook aan te raden om de mogelijkheid te voorzien tot een automatische eenheidsconversie voor de ingelezen parameters. Idealiter, bevat het in C++ geïmplementeerde model zelf ook een beschrijving van de gebruikte eenheden zodat een volledig transparante aanpassing mogelijk wordt. Als uitbreiding op de grafische gebruikerstoepassing voor de parameterextractie zou het type van de te optimaliseren data moeten geparametriseerd worden ten opzichte van de toepassing, zodat ook niet spectrale data kunnen gefit worden aan modellen met behulp van de toepassing.

8.2.4 De resultaten voor de Fabry-Perot-laserdiodes

Eerst worden de resultaten voor de drie Fabry-Perot-laserdiodes afzonderlijk gegeven en vervolgens worden ze gecombineerd en geëvalueerd. Bij de berekening van de hierna vermelde resultaten voor de Fabry-Perot-laserdiodes, werden volgende veronderstellingen gemaakt :

- Als lengte (L) van de component wordt de gemeten lengte genomen
- De reflectiecoëfficiënt (R) aan beide facetten bedraagt 30%
- De breedte (w) van de component is $1.5 \mu\text{m}$ zoals gegeven door de fabrikant
- De dikte van het actief gebied (d) is $0.056 \mu\text{m}$ (8 *quantum wells* van 7 nm elk)
- De vulfactor (G) werd verondersteld 0.2 te zijn
- Tenzij anders vermeld, werden de metingen uitgevoerd bij 20°C

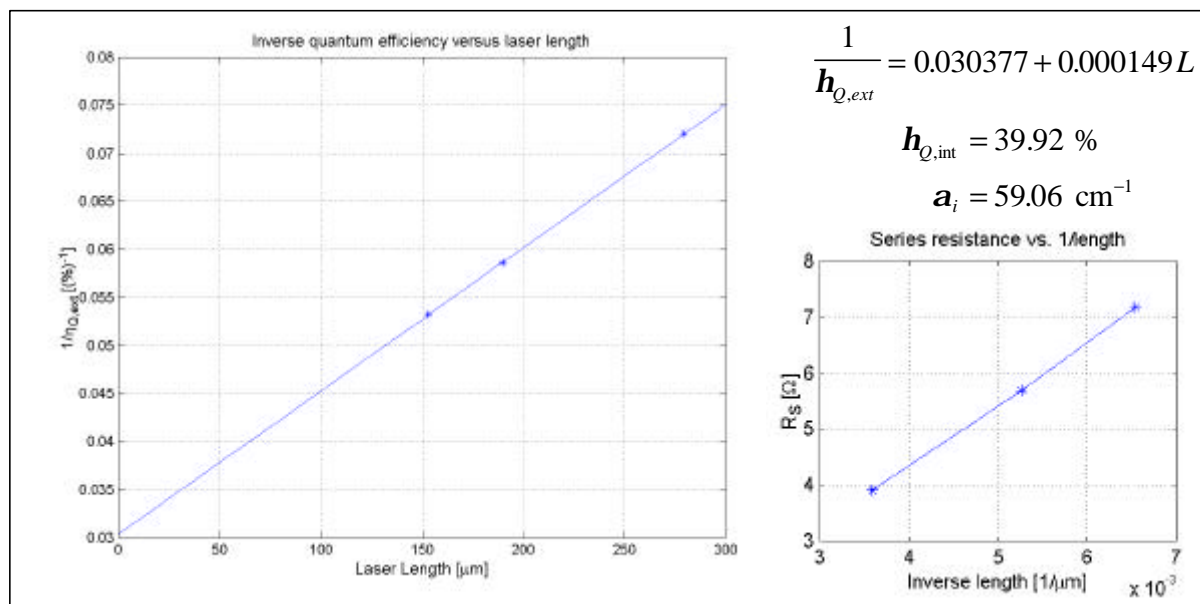
8.2.4.1 Parameters bepaald uit de vermogenmeting (LIV)

Tabel 8-2 geeft een overzicht voor de drie Fabry-Perot-laseriesodes van de bepaalde parameters : de drempelstroom (I_{th}), de externe efficiëntie (h_{ext}), de externe quantumefficiëntie ($h_{Q,ext}$), de serieweerstand (R_S) en de piekgolflengte boven drempel. De laatste kolom bevat de karakteristieke temperatuur die uit de metingen bij verschillende temperaturen geëxtraheerd werd (18 t.e.m. 30°C). Voor de serieweerstand worden twee waarden vermeld, de eerste waarde is de weerstand in regimetoestand (stromen groter dan de drempelstroom), de tweede waarde (iets groter) is de waarde bepaald bij de drempelstroom. Beide waarden werden bekomen door de afgeleide te nemen van de gemeten spanning naar de gestuurde stroom doorheen de laserdiode.

	Lengte [μm]	I_{th} [mA]	η_{ext} [mW/mA]	$\eta_{Q,ext}$ [%]	R_S [Ω]	λ_{piek} [nm]	T_0 [K]
IMC1	153	11.74	0.150	18.77	7.17/9.98	1563.2	47.3
IMC2	190	14.02	0.137	17.08	5.68/8.00	1565.2	58.8
IMC3	279	18.47	0.111	13.89	3.91/5.48	1557.0	65.8

Tabel 8-2 : Overzicht van de eerste meetresultaten voor de drie Fabry-Perot-laserdiodes

De waarden van de efficiëntie kunnen vervolgens gebruikt worden om de interne efficiëntie en de interne optische verliezen van de “gemiddelde” Fabry-Perot-laserdiode te bepalen. Dit proces en het resultaat is weergegeven in Figuur 8-4. De optische verliezen van het materiaal bepaald volgens deze methode bedragen 59 cm^{-1} en komen overeen met de waarden bepaald volgens de “below bandgap”-methode van Ketelsen.

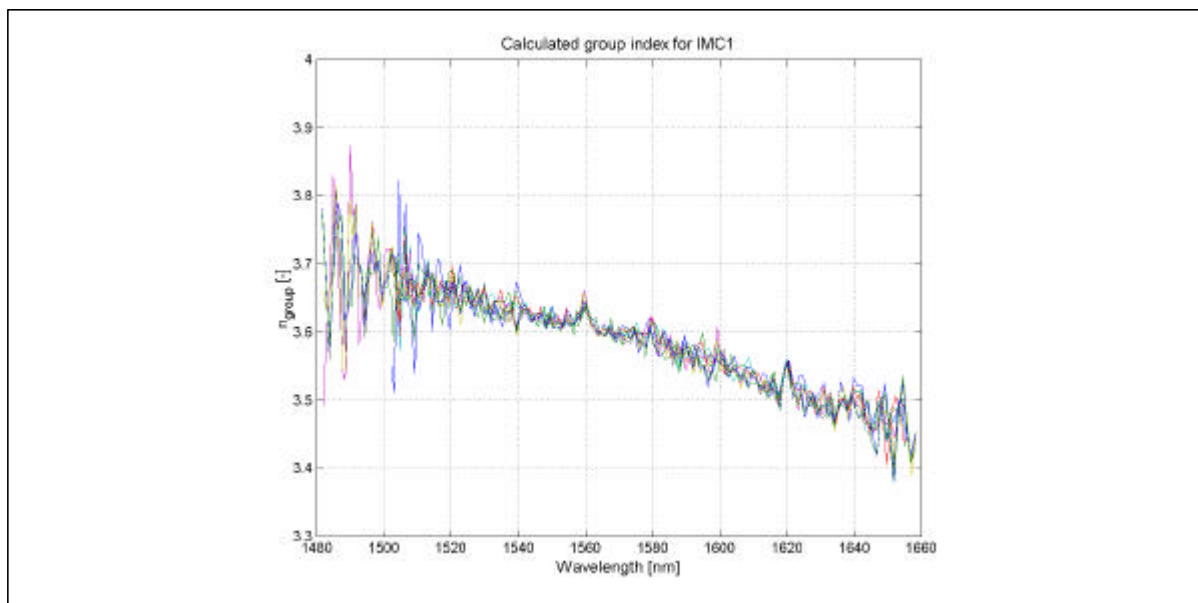


Figuur 8-4 : De inverse efficiëntie van de drie Fabry-Perot-laserdiodes uitgezet als functie van de lengte ter bepaling van het interne optische verlies. Rechtsomderaan is ook de serieweerstand van de drie laserdiodes uitgezet als functie van de inverse caviteitslengte.

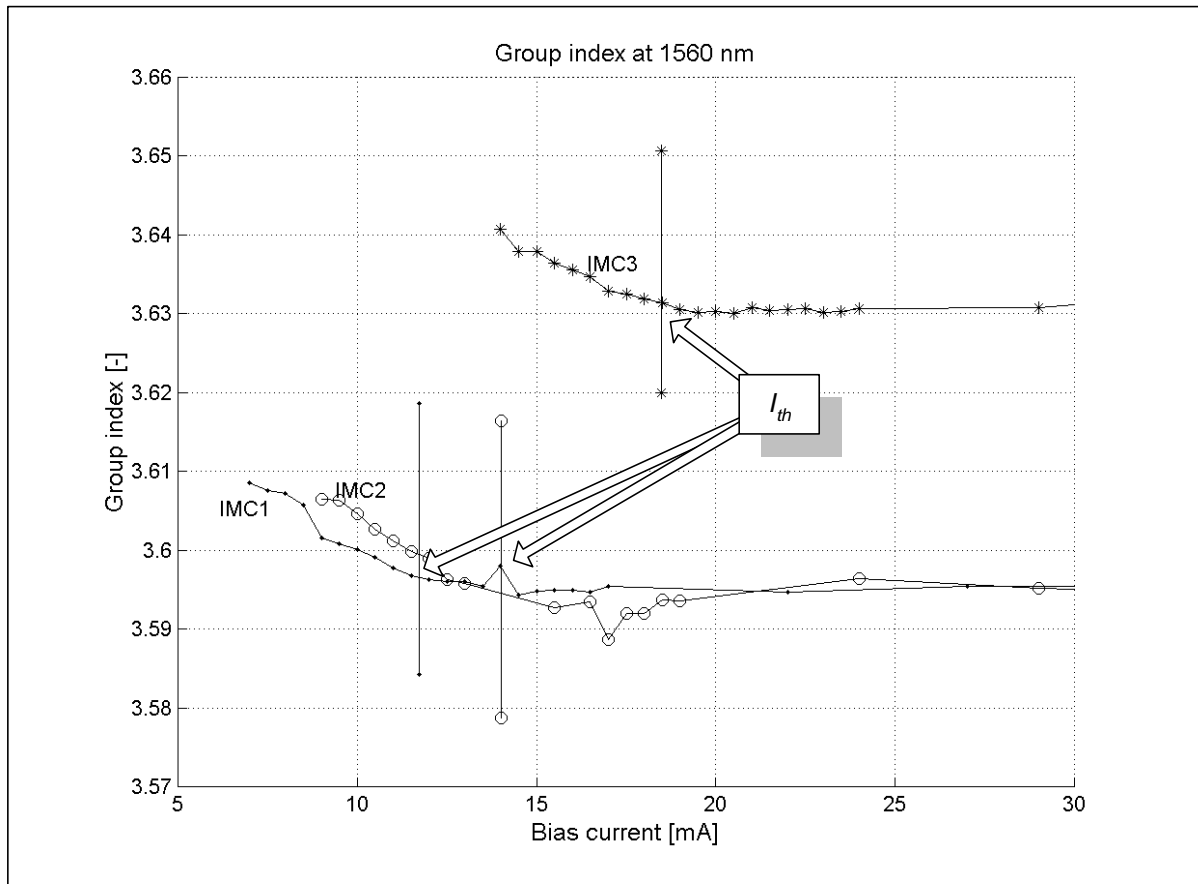
8.2.4.2 Parameters bepaald uit de spontane emissie-spectrummeting

De eerste grootte die bepaald wordt uit het spontane emissie-spectrum van een Fabry-Perot-laserdiode is de groepsindex. Figuur 8-5 toont hoe het eigenlijke resultaat van de berekening eruit ziet. Het is te zien dat aan de rand van de meting (zowel bij lage als bij hoge golflengtes) de bepaling van de groepsindex minder nauwkeurig wordt doordat het opgemeten signaal zwakker wordt en de invloed van de ruis op de meting sterker wordt. Om de invloed van de ruis te beperken en om vanuit de groepsindex de effectieve index te bepalen, worden de opgemeten curven gefit aan de lineaire uitdrukking die in hoofdstuk 4 voorgesteld werd.

Ter vergelijking van de resultaten bekomen voor de drie Fabry-Perot-laserdiodes, werd in Figuur 8-6 de groepsindex bij een bepaalde golflengte uitgezet als functie van de instelstroom. Als golflengte werd 1560 nm gekozen gezien deze de “gemiddelde” lasergolflengte van de drie laserdiodes is. De verticale streepjes op de figuur stellen de drempelstroom van de laserdiode voor. Het is duidelijk te zien dat de eerste twee laserdiodes (IMC1 en IMC2) een gelijkaardig gedrag vertonen, duidelijk verschillend ten opzichte van de derde laserdiode (IMC3). Gezien de gelijkaardige materiaalstructuur is dit resultaat enigszins onverwacht: de resultaten zouden moeten samenvallen voor de drie laserdiodes. Het feit dat het IMC3-resultaat afwijkt kan duiden op een niet-uniformiteit tussen de drie laserdiodes.

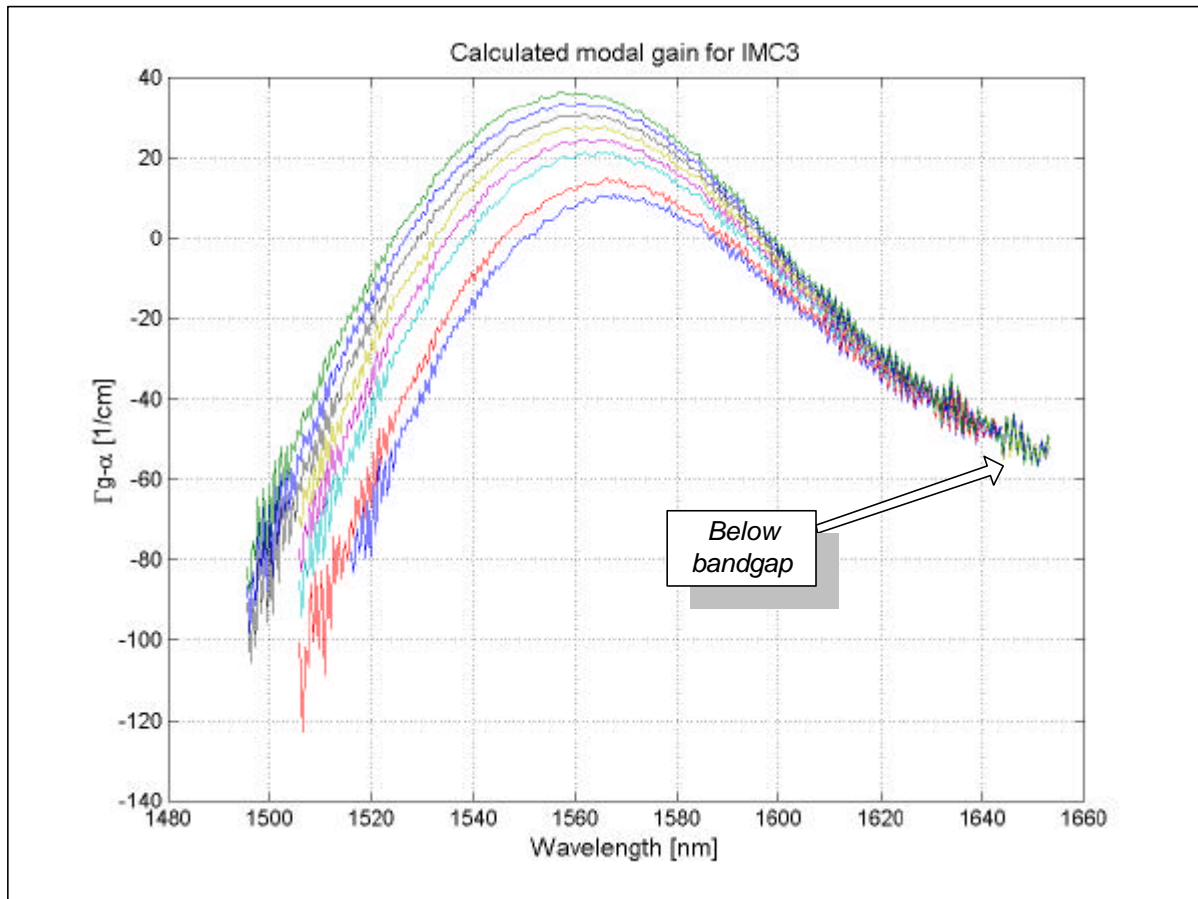


Figuur 8-5 : Een voorbeeld van de groepsindex, zoals die berekend werd uit de afstand van de Fabry-Perot-modi in het spontane emissie-spectrum van de laserdiode.



Figuur 8-6 : De “gefittede” groepsindex bij een golflengte van 1560 nm (gemiddelde piekgolflengte voor de drie Fabry-Perot-laserdiodes).

Figuur 8-7 geeft een voorbeeld van de modale optische versterking zoals die berekend werd met de Hakki-Paoli-methode uit het spontane emissie-spectrum van de Fabry-Perot-laserdiode IMC3. De verschillende curven zijn de resultaten bekomen voor verschillende instelstromen. Aan de rechterzijde van de figuur, bij de hoge golflengtes, bevindt zich het “*below bandgap*”-gebied, waar volgens de methode van Ketelsen de waarde voor het intern optisch verlies af te lezen valt. Voor de voorgestelde laserdiode is dit ongeveer $57 \pm 5 \text{ cm}^{-1}$, hetgeen goed overeenkomt met de inverse-efficiëntie-methode. De kortere laserdiodes (IMC1 en IMC2) leverden niet voldoende vermogen om ten volle in het “*below bandgap*”-gebied te kunnen meten, hetgeen een kleinere limietwaarde voor het optisch verlies opleverde (50 cm^{-1}).



Figuur 8-7: Een voorbeeld van de modale optische versterking van het materiaal, zoals die berekend werd d.m.v. de Hakki-Paoli-methode vanuit het spontane emissiespectrum van een Fabry-Perot-laserdiode.

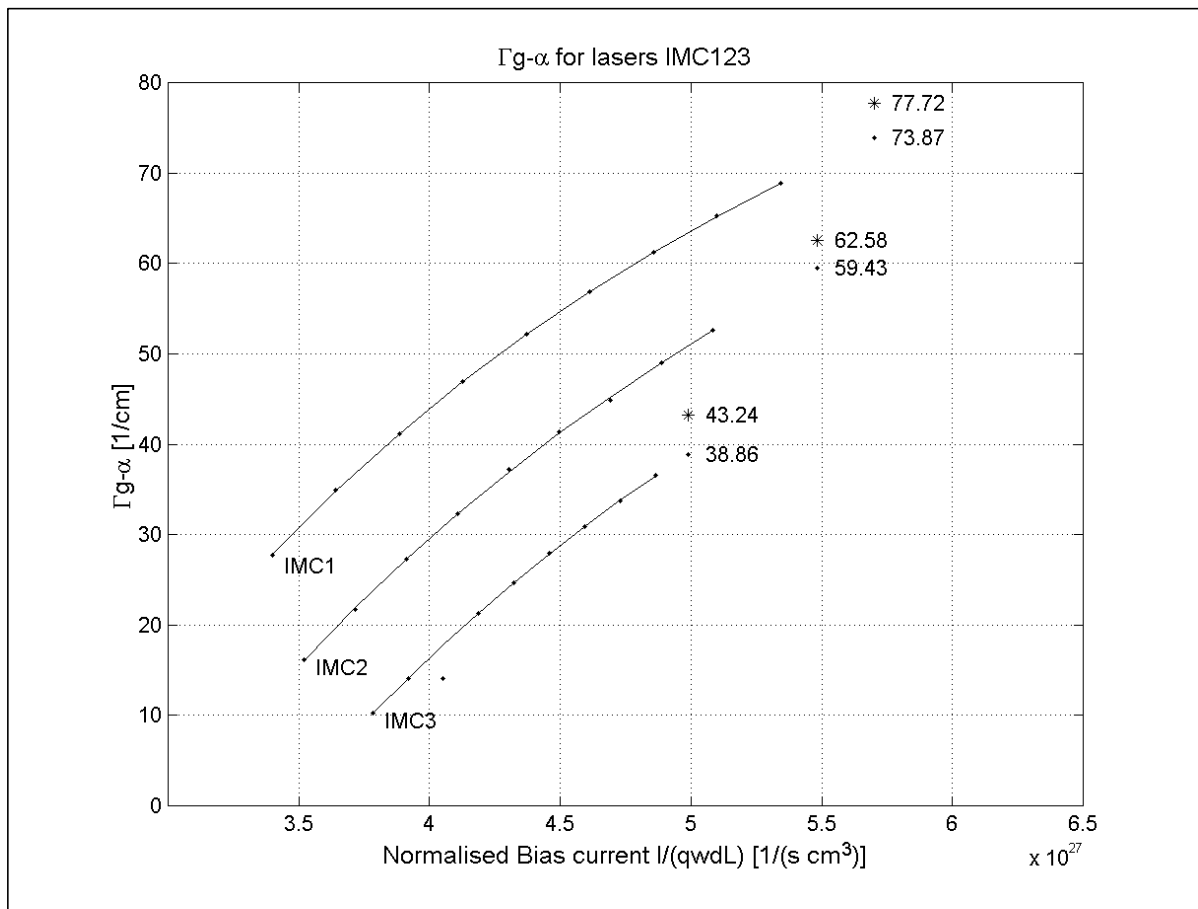
Om de geëxtraheerde waarden voor de drie laserdiodes te vergelijken, wordt het maximum van de berekende curve uitgezet als functie van de genormaliseerde stroom. Gezien de optische versterking niet afhangt van de stroom maar van de ladingsdragersdichtheid, wordt de instelstroom (I) gedeeld door de elementaire lading (q) en het volume van het actief gebied (wdL). Figuur 8-8 toont naast de gemeten resultaten ook een gefitte curve doorheen de gemeten punten. Deze derdegraadsveelterm wordt gebruikt om de waarde van de modale optische versterking en de differentiële optische versterking bij de drempelstroom te kunnen bepalen. De sterretjes op de figuur stellen de modale optische versterking bij drempel voor zoals die berekend kan worden aan de hand van de lengte en de reflectiecoëfficiënten van de spiegels (uitdrukking (8.1)).

$$(\Gamma g - a_i)_{th} = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \quad (8.1)$$

Mits de meetnauwkeurigheid van $\pm 5 \text{ cm}^{-1}$ in aanmerking genomen wordt, komen de meetresultaten goed overeen met de theoretische waarden voor de drie Fabry-Perot-laserdiodes.

De vergelijking van de resultaten bepaald voor de drie laserdiodes levert echter niet het verwachte resultaat. Gezien de laserdiodes uit hetzelfde materiaal vervaardigd zijn en dezelfde lagenstructuur zouden hebben, is het te verwachten dat de drie curven voor de modale optische versterking als functie van genormaliseerde stroom samenvallen. Het feit dat dit niet

het geval is kan op verschillende manieren uitgelegd worden: temperatuurseffecten, meetfouten, stroomspreiding, verkeerde dimensies voor de golfgeleider of een verschillende golfgeleiderstructuur.



Figuur 8-8 : Het maximum van de berekende modale optische versterking voor de drie Fabry-Perot-laserdiodes uitgezet als functie van de genormaliseerde stroom doorheen de laserdiode.

Gezien de metingen beneden drempel gebeurd zijn, kunnen de temperatuurseffecten uitgeschakeld worden als mogelijke verklaring. Het is inderdaad zo dat de temperatuur in de actieve laag niet per definitie overeenkomt met de temperatuur van de laserhouder (die bij elke meting op een constante temperatuur van 20°C gehouden werd), maar de nodige temperatuursvariaties om de verschillen te verklaren zijn te groot om realistisch te zijn.

De mogelijkheid dat een verkeerde waarde voor de reflectiecoëfficiënten gebruikt werd is ook weinig realistisch. Indien er één reflectiecoëfficiënt gebruikt wordt voor de drie laserdiodes, moet deze de waarde 0.8 aannemen eer de curven voor de modale optische versterking enigszins samenvallen. Indien een verschillende coëfficiënt voor de drie laserdiodes aangenomen wordt, zijn waarden van 0.2 tot 0.4 nodig eer de curven samenvallen. Beide opties leveren weinig waarschijnlijke waarden op voor niet-gecoate laserdiodes, vooral gezien de laserdiodes uit hetzelfde gebied van de plak halfgeleidermateriaal vervaardigd werden.

De meting werd naar gewoonte verzorgd en extra gecheckt zodat fouten te wijten aan verkeerde instellingen uitgesloten zijn. Een minder evidente meetfout, met name de invloed van de responsie van de optische spectrumanalyser op de meting, werd theoretisch in meer detail

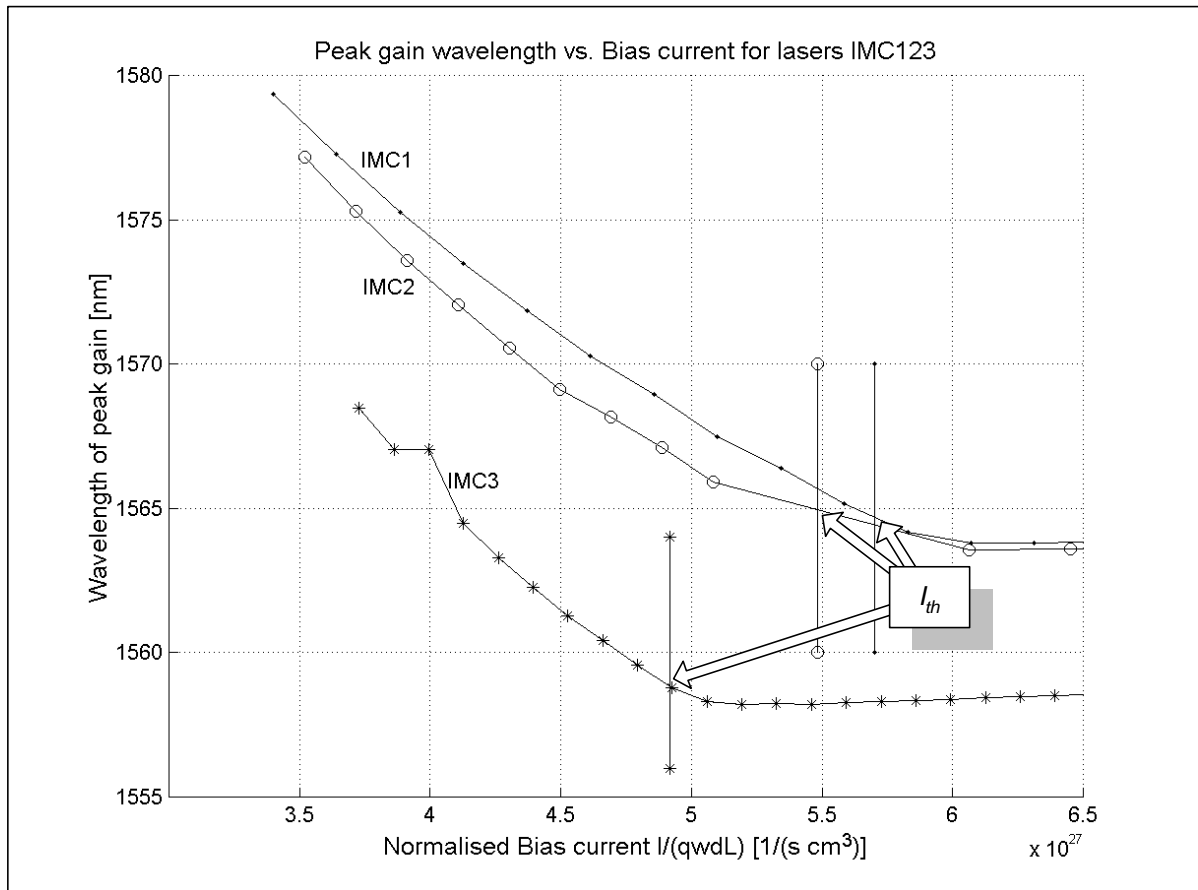
bekeken. Dit gebeurde door een gemeten optisch spectrum te convolueren met de responsie van het toestel en vervolgens de modale optische versterking in beide gevallen te bepalen. De responsie van het toestel werd bepaald door het “optisch spectrum” van een externe caviteitslaser (HP8168) op te meten. Doordat het spectrum van een dergelijk type laser veel smaller is dan de meetmogelijkheden van de optische spectrumanalyser mag aangenomen worden dat het resulterende spectrum overeenkomt met de responsie van het meettoestel. Naast het convolueren werd ook een deconvolutie uitgevoerd door gebruik te maken van de Fourier-transformatie. Zowel de convolutie als de deconvolutie toonden duidelijk aan dat enkel de langste laserdiode (met de kortste afstand tussen de modi) een kleine invloed ondervond van de “beperkte” meetresolutie van het toestel: de bepaalde waarden voor de modale optische versterking verschilden ongeveer 0.2 cm^{-1} . Met andere woorden een mogelijke meetfout te wijten aan de beperkte meetresolutie van de optische spectrumanalyser is in dit geval te verwaarlozen.

Ook de veronderstelling dat het een probleem van stroomspreiding is, kan worden weerlegd. In dat geval, wordt er een effect verwacht dat enerzijds erger is voor de langere laserdiode en dat anderzijds groter wordt bij grotere stromen. Gezien het probleem van de stroomspreiding ervoor zorgt dat bepaalde secties van de laserdiode minder goed gepompt worden, zal het effect zich voordoen als een groter optisch verlies; met andere woorden er wordt een kleinere modale optische versterking gemeten. Het is inderdaad te zien op Figuur 8-8 dat de lange laserdiode een kleinere modale optische versterking heeft dan de kortere, doch er is niet te zien dat het effect groter wordt bij groter wordende stroom. Hierdoor kan deze optie uitgesloten worden.

Als op één na laatste mogelijkheid blijven de niet uniforme caviteitsdimensies over: ook deze mogelijkheid kan om twee redenen uitgesloten worden. De eerste is dat de laserdiodes bijna naast elkaar lagen op de plak halfgeleidermateriaal. De tweede reden is te zien in Figuur 8-9, waar de piekgolflengte uitgezet werd als functie van de genormaliseerde stroom. Het is duidelijk te zien dat de curven voor de drie laserdiodes in omgekeerde volgorde liggen ten opzichte van de Figuur 8-8. Dit betekent dat elke poging die ondernomen wordt om door middel van de caviteitsdimensies (bijvoorbeeld de breedte w) de curven uit Figuur 8-8 dichter bijeen te krijgen ervoor zal zorgen dat de curven in Figuur 8-9 verder uiteen zullen liggen.

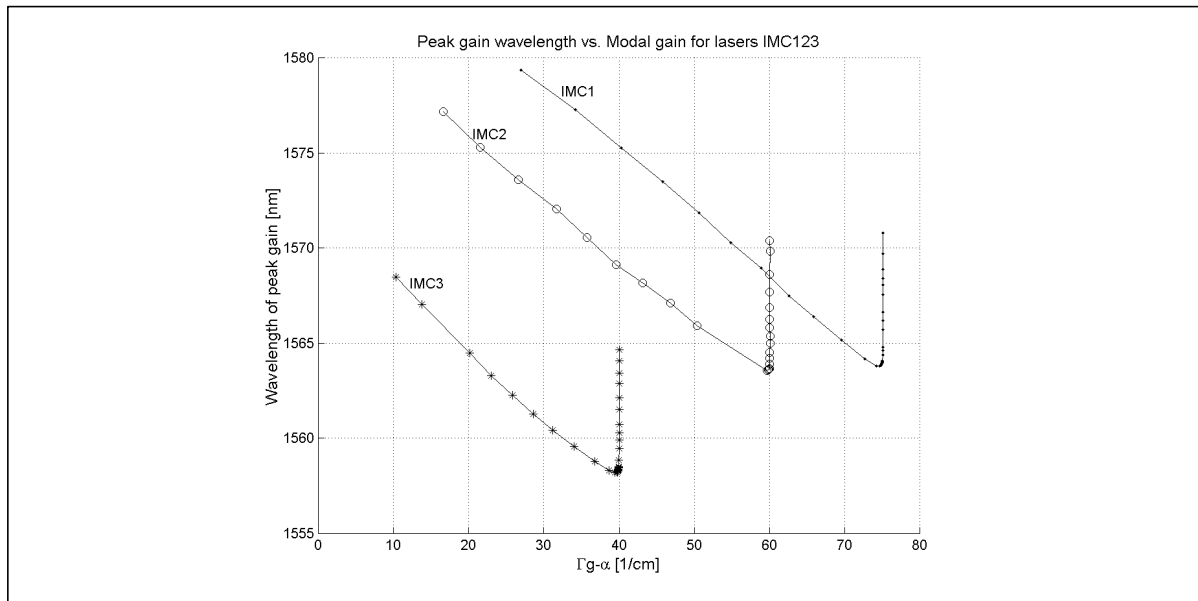
Gezien het niet mogelijk is om de verschillen aan de hand van de afzonderlijke aangehaalde opties te verklaren en gezien de bepaling van de groepsindex (Figuur 8-6) aangeeft dat de laserdiodes zich niet uniform gedragen, kan dus besloten worden dat hier waarschijnlijk een complexer fenomeen (ten gevolge van niet uniforme afmetingen, materiaalsamenstelling of *quantum well* dikte, ...) aan de basis ligt van de bekomen meetresultaten.

Voor alle duidelijkheid dient opgemerkt te worden dat als gevolg van dit niet uniforme gedrag, de verdere extractie op basis van de combinatie van de drie Fabry-Perot-laserdiodes niet uitgevoerd kan worden.



Figuur 8-9 : De golflengte waarbij de gemeten modale optische versterking maximaal is als functie van genormaliseerde stroom doorheen de laserdiode. De verticale streepjes geven de drempelstroom van de laserdiode aan.

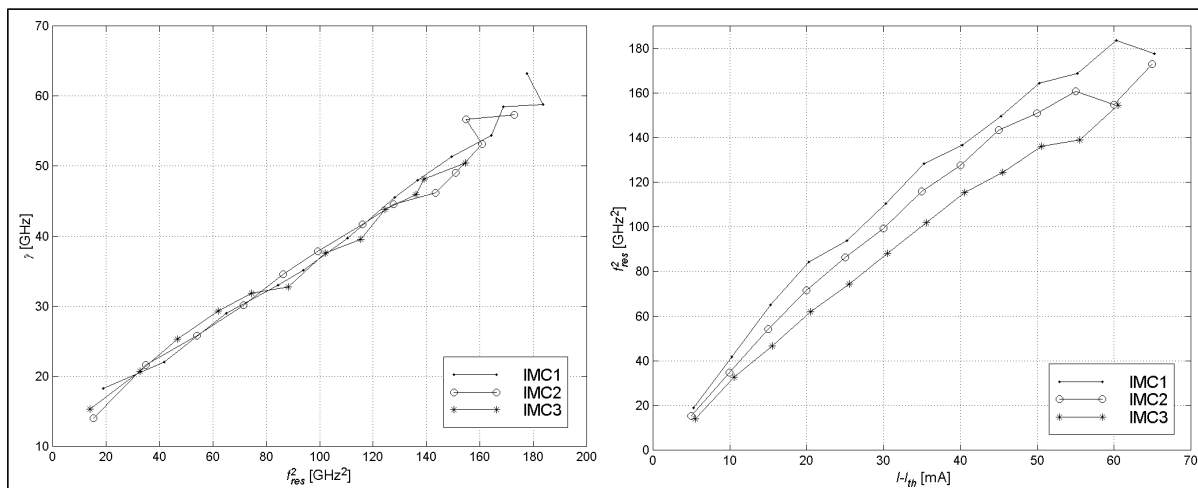
Een laatste opmerking in verband met de bepaling van de optische versterking is te zien in Figuur 8-10. In die figuur wordt de piekgolflengte van de optische versterking uitgezet als functie van de maximale optische versterking voor de drie Fabry-Perot-laserdiodes. Het is duidelijk te zien hoe de maximale optische versterking toeneemt totdat de drempelstroom bereikt wordt. Eenmaal deze waarde bereikt is blijft de optische versterking gelijk doordat de ladingsdragersdichtheid niet langer verandert bij stromen groter dan de drempelstroom. Verder is het duidelijk te zien hoe de piekgolflengte eerst afneemt onder invloed van de veranderende stroom en hoe deze boven drempel opnieuw toeneemt onder invloed van thermische effecten. Dit effect is trouwens ook (minder duidelijk) te zien in Figuur 8-9 waar de piekgolflengte van de modale optische versterking licht toeneemt boven drempel, onder invloed van de thermische effecten.



Figuur 8-10 : De piekgolflengte van de modale optische versterking uitgezet als functie van de maximale waarde ervan. Het is duidelijk te zien hoe de waarde van de optische versterking boven drempel niet meer verandert en hoe de piekgolflengte verschuift onder invloed van thermische effecten boven drempel.

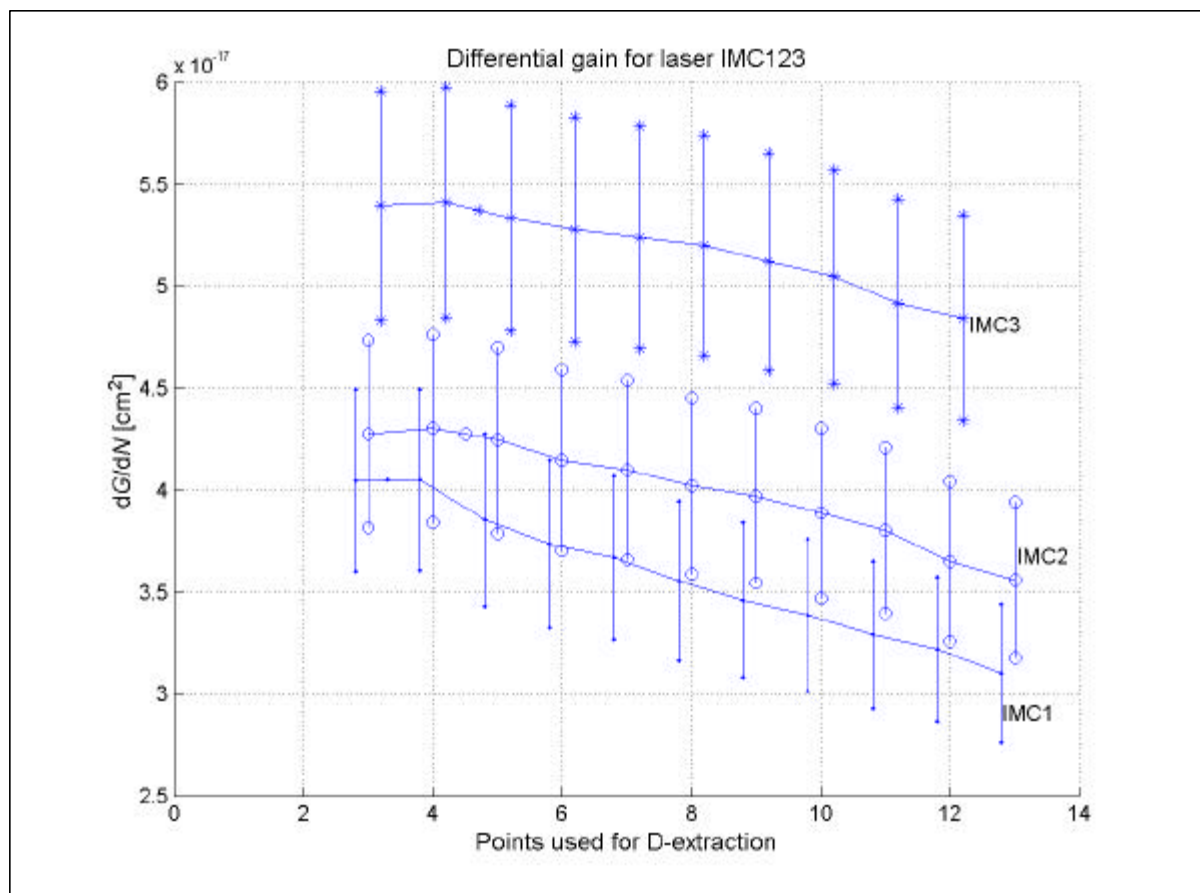
8.2.4.3 Parameters bepaald uit de relatieve intensiteitsruis-meting

Zoals uitgelegd werd in hoofdstuk 5, worden aan de hand van het relatieve intensiteitsruisspectrum de dynamische aspecten van de laserdiode bepaald door een gecombineerd proces van het fitten aan een model en een verdere extractie op basis van de verkregen parameters. De gedetailleerde fitresultaten voor elke stroominstelling worden in het kader van dit proefschrift niet verder besproken, de verdere extractie komt wel aan bod. De startgegevens voor deze verdere extractie zijn weergegeven in Figuur 8-11.



Figuur 8-11 : Links de demping als functie van het kwadraat van de resonantiefrequentie, rechts het kwadraat van de resonantiefrequentie als functie van de stroom boven de drempelstroom. De resultaten voor de drie Fabry-Perot-laserdiodes werden bepaald door het fitten aan een numeriek model voor het relatieve intensiteitsruis-spectrum.

Uit de bepaalde resonantiefrequenties en de instelstromen, kan de “D-factor” bepaald worden, waaruit de differentiële optische versterking berekend wordt. Zoals aangegeven in hoofdstuk 5 bestaat er een zekere dubbelzinnigheid in de bepaling van die “D-factor”, doordat het aantal punten dat gebruikt wordt om de “best passende rechte” te bepalen variabel is. Figuur 8-12 toont hoe de differentiële optische versterking voor de drie Fabry-Perot-laserdiodes verandert als functie van het aantal punten dat gebruikt werd om de “best passende rechte” te bepalen. Om de figuur overzichtelijk te houden, werd op de X-as een kleine offset geïntroduceerd (respectievelijk -0.2, 0 en 0.2 voor laserdiode IMC1, IMC2 en IMC3), zodat de berekende waarden en hun foutmarges niet zouden samenvallen op de figuur. Net zoals bij de bepaling van de groepsindex is duidelijk te zien dat de derde laserdiode (IMC3) een ander gedrag vertoont dan de eerste twee (IMC1 en IMC2). De foutmarges werden bepaald aan de hand van de in appendix C gegeven uitdrukking, waarbij realistische waarden gebruikt werden voor de onzekerheden. De aldus bekomen waarden komen overeen met de waarden die in de literatuur verschenen zijn Westbrook [8.1] vermeldt waarden van $2.7 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ tot $2.7 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$, Grabmaier vermeldt [8.2] een waarde van $3.2 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat het over de zuivere differentiële optische versterking gaat, met andere woorden de waarden uit Figuur 8-12 moeten gedeeld worden door de vulfactor ($G = 0.2$) alvorens vergeleken te worden met de referenties.



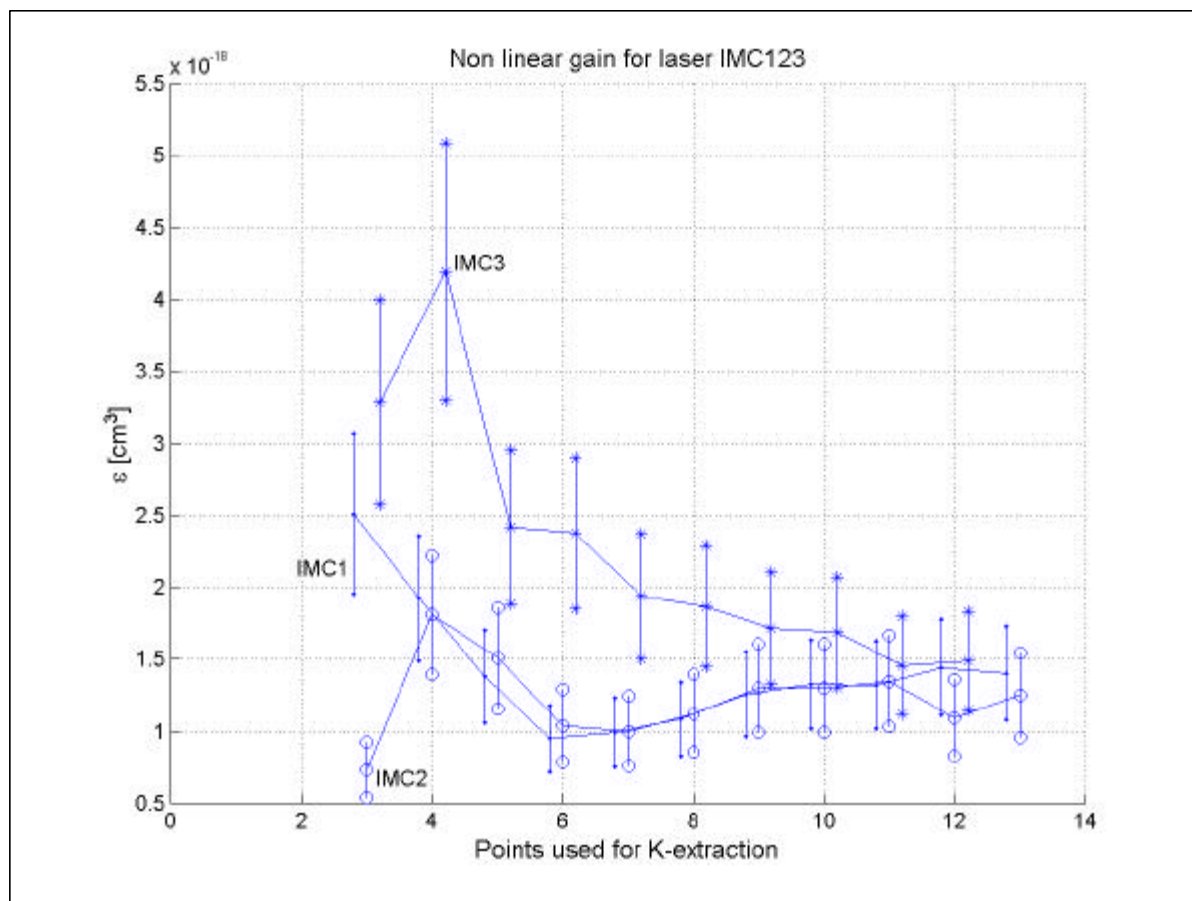
Figuur 8-12 : De berekende waarde (met foutmarge) voor de differentiële optische versterking als functie van het aantal punten dat gebruikt werd om de “D-factor” te bepalen.

Zoals in hoofdstuk 5 uitgelegd, kan de waarde waarbij de “best passende rechte” door de oorsprong gaat gebruikt worden als “de definitieve” “D-factor”. Voor de drie Fabry-Perot-

laserdiodes liggen deze respectievelijk op 3.5, 4.5 en 4.5 punten, aangegeven op de figuur als “gemeten” punt zonder foutmarge. Deze waarde zal dan ook bij verdere berekeningen gebruikt worden.

De tweede parameter die uit de relatieve intensiteitsruismeting kan bepaald worden is de niet lineaire optische versterking (ϵ). Deze parameter is ondermeer afhankelijk van het aantal punten dat gebruikt werd om de “K-factor” te bepalen en via de differentiële optische versterking ook van de waarde van de “D-factor”. Deze laatste werd, zoals vermeld, vastgelegd door middel van de “best passende rechte”. Figuur 8-13 toont het resultaat van deze berekening voor de drie Fabry-Perot-laserdiodes. Ook hier is opnieuw te zien dat laserdiode IMC1 en IMC2 een gelijkaardig gedrag vertonen en dat laserdiode IMC3 duidelijk afwijkt, hetgeen de stelling dat het fenomeen te wijten is aan niet uniformiteiten bevestigt.

De “piek” die te zien is in de curve voor laserdiode IMC3 is te wijten aan het feit dat de punten ter bepaling van de “K-factor” voor deze laserdiode niet echt op een rechte lijn liggen, in tegenstelling tot de andere laserdiodes. Links op Figuur 8-11 is duidelijk te zien hoe de eerste vijf punten op een “andere” rechte liggen dan de rest van de curve, hetgeen resulteert in een andere waarde voor de “K-factor”.



Figuur 8-13 : De berekende waarde (met foutmarge) voor de niet lineaire optische versterking als functie van het aantal punten dat gebruikt werd om de “K-factor” te bepalen.

De derde parameter die uit de relatieve intensiteitsruismeting bepaald wordt is de maximale intrinsieke bandbreedte. Gezien deze parameter rechtstreeks afhankelijk is van de “K-factor”, kan ook hier moeilijk over “de” waarde gesproken worden. Een visuele inspectie

van de grafieken waaruit de “K-factor” afgeleid wordt, toont echter dat een “goede” waarde bekomen wordt als zeven punten gebruikt worden. In Tabel 8-3 zijn naast “de goede” waarde ook de minimum en maximum waarden te zien voor deze intrinsieke maximale bandbreedte evenals de waarden voor de differentiële ladingsdragerslevensduur (t_d). Het is duidelijk te zien dat er een relatief grote marge is, veroorzaakt door de spreiding van de punten bij de bepaling van de “K-factor”. Deze spreiding is nog groter voor de differentiële ladingsdragerslevensduur (t_d) gezien het intercept van een “best passende rechte” veel minder goed geconditioneerd is bij lineaire regressie dan de helling ervan.

	$F_{\text{intrins,max}}$ [GHz]			τ_d [ns]		
	min	7 punten	max	min	7 punten	max
IMC1	25.6	59.2	61.1	-1.042	0.173	0.75
IMC2	37.3	59.6	74.3	0.134	0.221	0.825
IMC3	18.8	40.5	50.3	-4.642	0.238	0.401

Tabel 8-3 : De waarden voor de intrinsieke maximale bandbreedte en de differentiële ladingdragerslevensduur voor de drie Fabry-Perot-laserdiodes.

Tabel 8-4 geeft een overzicht van de waarden voor de differentiële optische versterking en de niet lineaire optische versterking. Zoals reeds aangegeven werd de waarde voor de eerste bepaald uit de conditie dat de “best passende rechte” een nul-intercept had en gezien de niet lineaire optische versterking (e) afhankelijk is van de “K-factor” werd voor de waarden in de tabel de “K-waarde” gebruikt bij zeven punten.

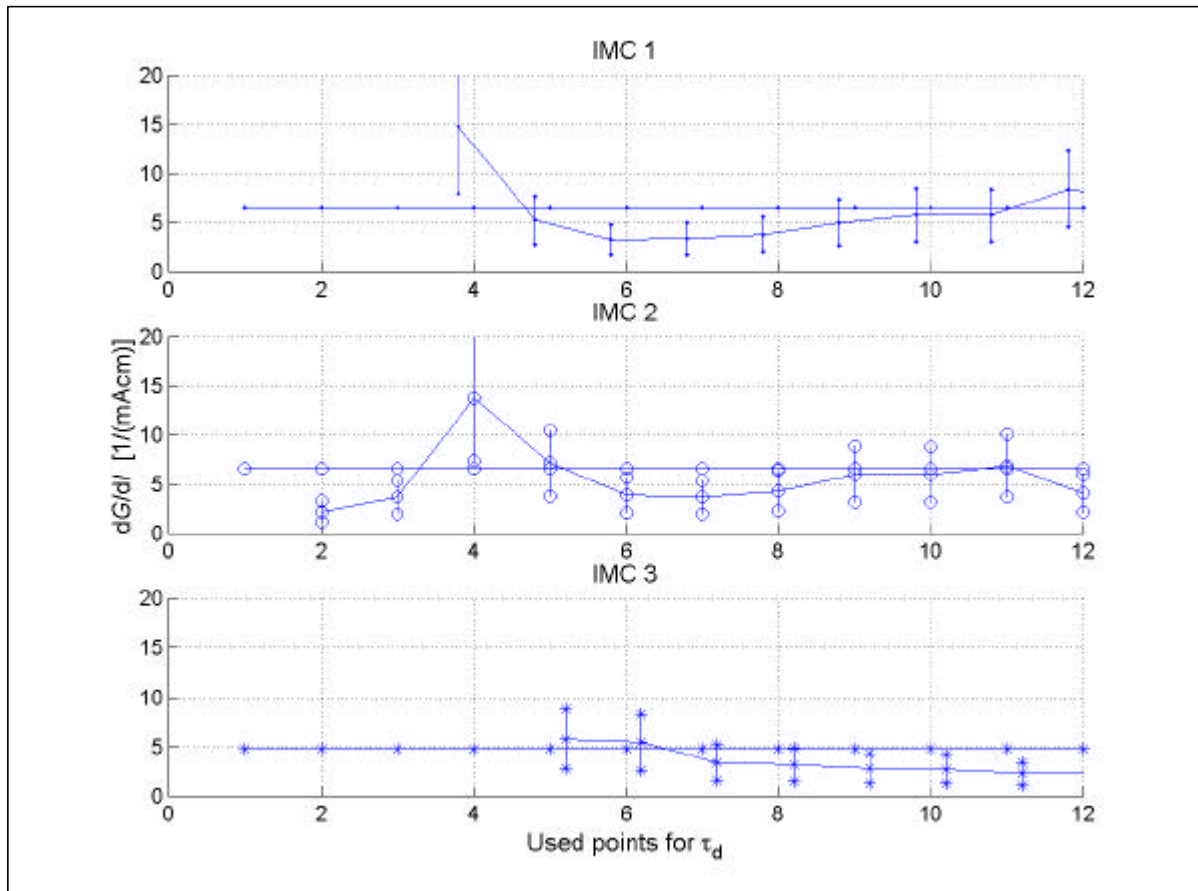
	$\left(\frac{fG}{fN}\right)$ [10^{-17} cm^2]			e [10^{-18} cm^3]		
	waarde	fout	[%]	waarde	fout	[%]
IMC1	4.05	0.65	15.9	0.99	0.23	23.9
IMC2	4.27	0.70	16.3	1.0	0.24	24.4
IMC3	5.37	1.2	21.4	1.9	0.43	22.4

Tabel 8-4 : de waarden voor de differentiële en niet lineaire optische versterking voor de drie Fabry-Perot-laserdiodes, en hun foutmarges.

8.2.5 Bespreking van de resultaten uit de Fabry-Perot-laserdiodes

Doordat het blijkt dat de drie Fabry-Perot-laserdiodes te verschillend zijn kan er geen echte vergelijking van de resultaten of verdere extractie op basis van die resultaten uitgevoerd worden. Het is echter wel mogelijk om de resultaten voor elke laserdiode afzonderlijk te controleren op hun geldigheid : de differentiële optische versterking (bepaald uit de relatieve intensiteitsruis) kan immers omgezet worden in een variatie van de modale optische versterking (bepaald uit de Hakki-Paoli-methode) door gebruik te maken van de differentiële ladingsdragerslevensduur (t_d), de elementaire ladingseenheid (q) en het volume (wdL) van de actieve laag (cf. hoofdstuk 5, sectie 5.4.1). Het resultaat van deze vergelijking voor de drie laserdiodes is te zien in Figuur 8-14. De horizontale lijn stelt de waarde voor die bekomen werd via de Hakki-Paoli-methode, de punten voorzien van foutmarges werden bekomen via

extractie op basis van het relatieve intensiteitsruisspectrum. De figuur toont aan dat de resultaten bekomen op beide manieren relatief goed overeenkomen.



Figuur 8-14 : De vergelijking tussen de resultaten bekomen aan de hand van de Hakki-Paoli-methode (vlakke lijn) en de resultaten bekomen d.m.v. extractie op basis van het RIN-spectrum. De resultaten zijn voorgesteld voor de drie Fabry-Perot-laserdiodes als functie van het aantal punten dat gebruikt werd om τ_d te bepalen, de verticale streepjes geven de foutmarge aan voor de RIN-gebaseerde punten.

8.2.6 Resultaten voor de DFB-laserdiodes

Net zoals bij de bespreking van de resultaten voor de Fabry-Perot-laserdiodes, worden ook voor de DFB-laserdiodes niet alle meetresultaten weergegeven. Bij de Fabry-Perot-laserdiodes lag de klemtoon op de RIN-gebaseerde extractie omwille van de controle-mogelijkheid aan de hand van de modale winst ten opzichte van de instelstroom. De ter beschikking gestelde DFB-laserdiodes zijn echter allemaal voorzien van tenminste één anti-reflectiecoating, die een dergelijke controle onmogelijk maakt doordat de Hakki-Paoli-methode niet toegepast kan worden. Bovendien tonen de Fabry-Perot-resultaten ook aan dat het niet zondermeer mogelijk is om resultaten van de ene laserdiode over te zetten op de andere. In het kader van dit proefschrift, beperkt de beschrijving van de resultaten voor de DFB-laserdiodes zich dan ook tot resultaten uit de vermogenmetingen om de laserdiodes te situeren. Verder worden ook de resultaten, bekomen uit het fitten van het spontane emissie-spectrum van de dubbelgecoate DFB-laserdiodes (IMC7, IMC8 en IMC9), gegeven als illustratie bij het in hoofdstuk 5 beschreven extractieproces.

Gezien de DFB-laserdiodes uit hetzelfde halfgeleidermateriaal als de Fabry-Perot-laserdiodes vervaardigd zijn, blijven de in sectie 8.2.4 gemaakte veronderstellingen geldig voor hierna volgende resultaten met betrekking tot de DFB-laserdiodes.

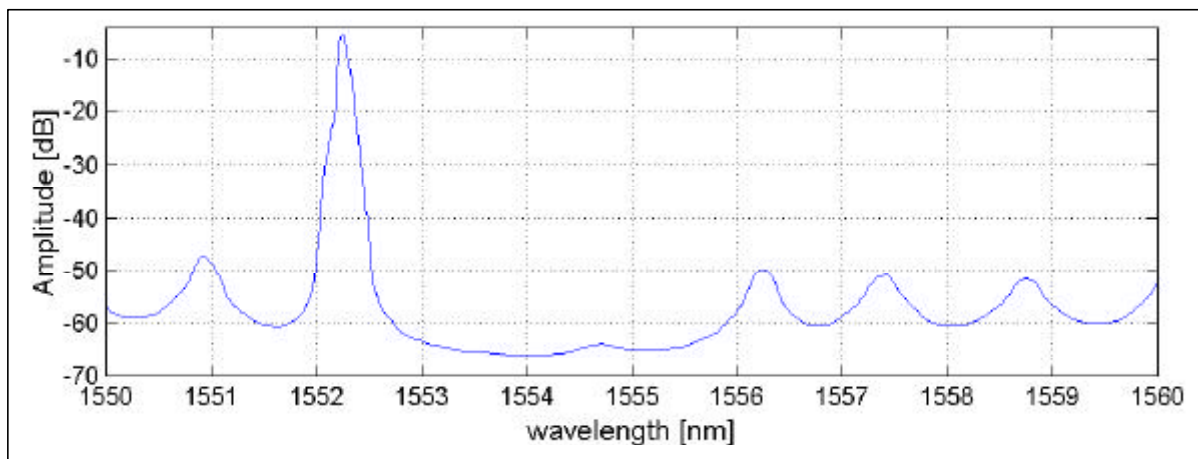
8.2.6.1 Parameters bepaald uit de vermogenmeting

Tabel 8-5 geeft een overzicht van de bepaalde parameters voor de beide soorten DFB-laserdiodes (AR/- en AR/AR). Dit zijn : de drempelstroom (I_{th}), de externe efficiëntie (h_{ext}), de externe quantumefficiëntie ($h_{Q,ext}$), de serieweerstand (R_S) en de piekgolflengte boven drempel. De laatste kolom bevat de karakteristieke temperatuur die uit de metingen bij verschillende temperaturen geëxtraheerd werd (18 t.e.m. 30°C). Voor de serieweerstand worden twee waarden vermeld, de eerste waarde is de weerstand in regimetoestand (stromen groter dan de drempelstroom), de tweede waarde (iets groter) is de waarde bepaald bij de drempelstroom.

	Lengte [μm]	I_{th} [mA]	η_{ext} [mW/mA]	$\eta_{Q,ext}$ [%]	R_S [Ω]	λ_{piek} [nm]	T_0 [K]
IMC4	145	21.97	0.117	14.65	9.44/9.75	1550.9	42.2
IMC5	190	18.49	0.107	13.34	7.02/7.82	1551.2	48.8
IMC6	229	20.15	0.0699	8.73	5.84/7.00	1552.1	52.9
IMC7	170	30.51	0.0661	8.26	7.64/7.75	1550.0	31.6
IMC8	188	25.50	0.0983	12.29	7.04/7.50	1551.1	42.2
IMC9	230	28.00	0.0606	7.57	6.17/6.75	1551.4	42.8

Tabel 8-5 : Overzicht van de eerste meetresultaten voor de zes DFB-laserdiodes

Figuur 8-15 geeft een voorbeeld van een optisch spectrum zoals dit gemeten werd voor stromen boven drempel, bij de laserdiode IMC6. De piekgolflengte en de stopband te wijten aan de werking van het diffractierooster zijn duidelijk zichtbaar.



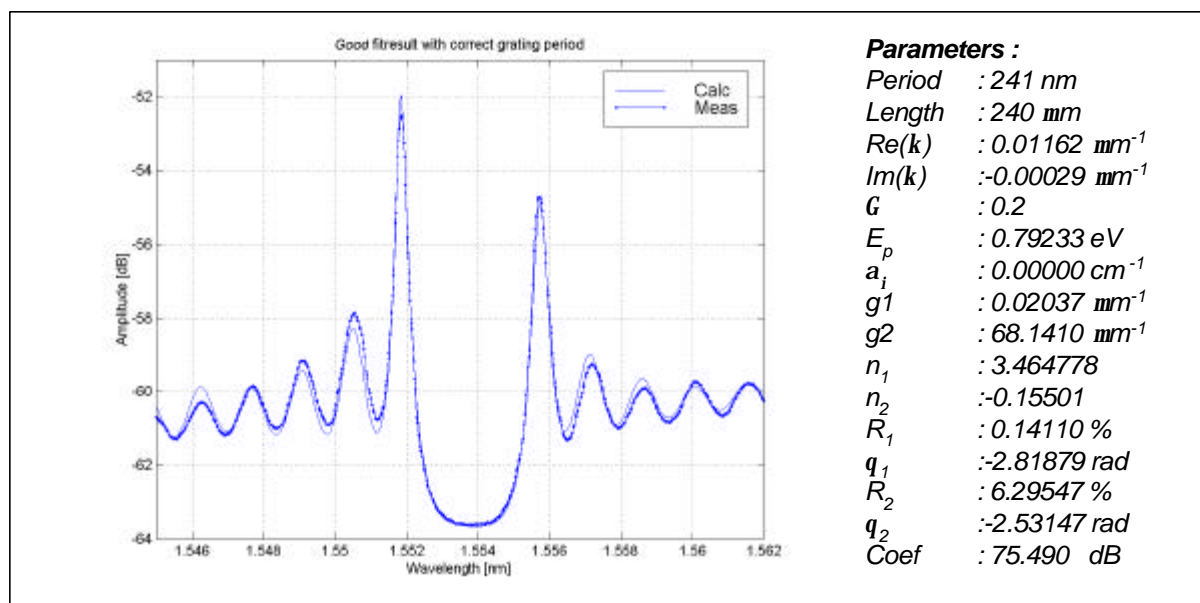
Figuur 8-15 : Een voorbeeld van een gemeten optisch spectrum voor een DFB-laserdiode. De figuur geeft het resultaat weer voor IMC6 bij een stroominstelling van 50 mA.

Merk op dat de piekgolflengte niet overeenkomt met de golflengte waarbij modale optische versterking maximaal is, het is immers de combinatie van de versterking en de filterkarakteristiek van het diffractierooster die de lasergolflengte bepaalt. Bij deze DFB-laserdiodes werd de “detuning”-techniek toegepast: het diffractierooster werd zodanig

gekozen dat de resulterende lasergolflengte kleiner is dan de golflengte waarbij de modale optische versterking maximaal is. Deze techniek wordt gebruikt om een kleinere lijnbreedteverbredingsfactor te realiseren, hetgeen de laserdiode betere eigenschappen bezorgt doordat AM- en FM-modulatie minder gekoppeld zijn.

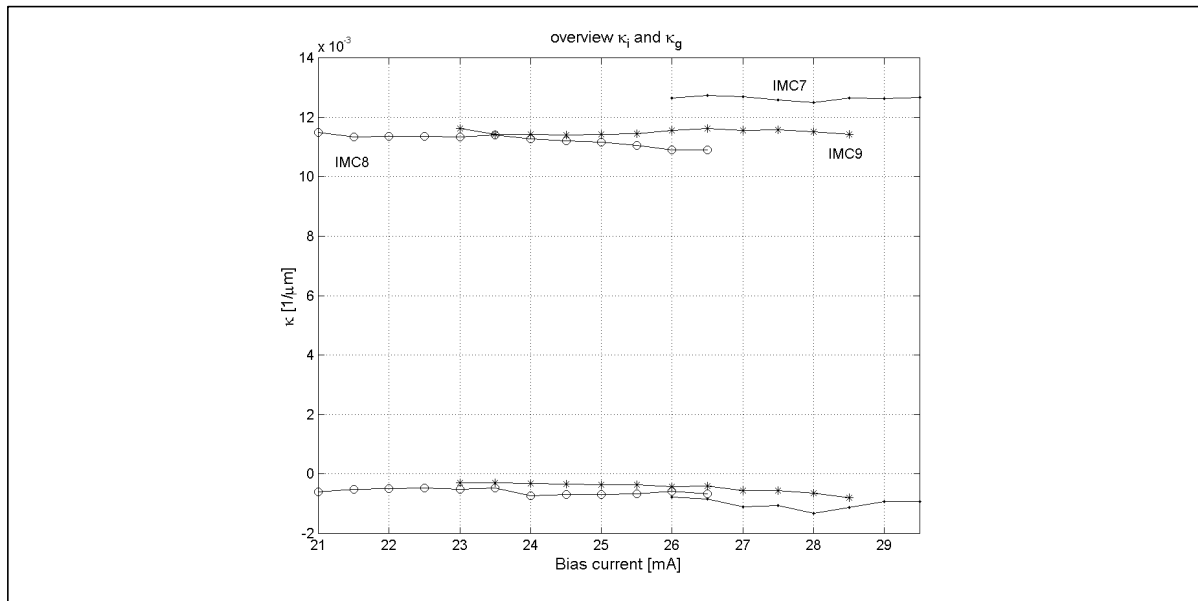
8.2.6.2 Parameters bepaald uit het fitten van het spontane emissie-spectrum

De belangrijkste parameters die uit het spontane emissie-spectrum bepaald worden, zijn de koppelingscoëfficiënt, de optische versterking, de effectieve brekingsindex en de reflecties aan de facetten. Hierna volgen de bekomen resultaten voor de DFB-laserdiodes waarvan beide facetten voorzien waren van een antireflectiecoating. Voor elke laserdiode werden een aantal instelpunten beneden drempel opgemeten. Voor elk van deze spontane emissie-spectra werd vervolgens aan de hand van de in hoofdstuk 5 uitgelegde procedure een model gefit. Eerst werd het spectrum gefit dat opgemeten was bij de kleinste instelstroom. Vervolgens werden deze resultaten gebruikt als startcondities bij de andere instelpunten. Het is van belang om op te merken dat voor alle bekomen resultaten alle parameters gefit werden, met andere woorden, in de laatste optimaliseringsstap werden alle parameters gevarieerd. Een voorbeeld van het eindresultaat van deze extractieprocedure is te zien in Figuur 8-16



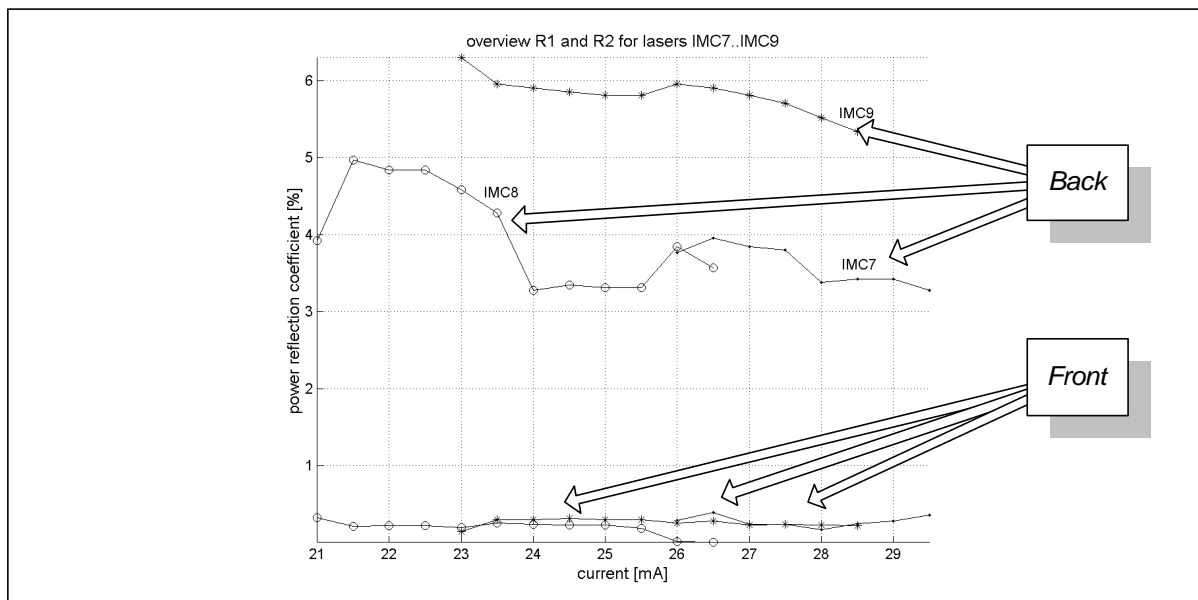
Figuur 8-16: Een voorbeeld van een typisch resultaat bekomen na optimalisering van de parameters bij het fitten van het spontane emissie-spectrum. De figuur toont het resultaat voor de DFB-laserdiode IMC9 bij een stroominstelling van 23 mA.

De eerste parameter van belang bij elke DFB-laserdiode is de koppelingscoëfficiënt, waarvan de resultaten te zien zijn in Figuur 8-17. Het is duidelijk te zien dat de bepaalde waarden zich correct gedragen: niet alleen zijn de waarden stroomafhankelijk maar ze komen bovendien goed overeen voor de drie bijna “identieke” laserdiodes. Er blijkt een kleine versterkingskoppelingscoëfficiënt (de curven onderaan in de figuur) nodig te zijn om een goede fit te bekomen, niettegenstaande deze laserdiodes bij constructie eigenlijk enkel een indexkoppelingsmechanisme bevatten. Gezien de kleine waarde van deze coëfficiënt kan besloten worden dat het hier waarschijnlijk om een parasitair effect gaat.



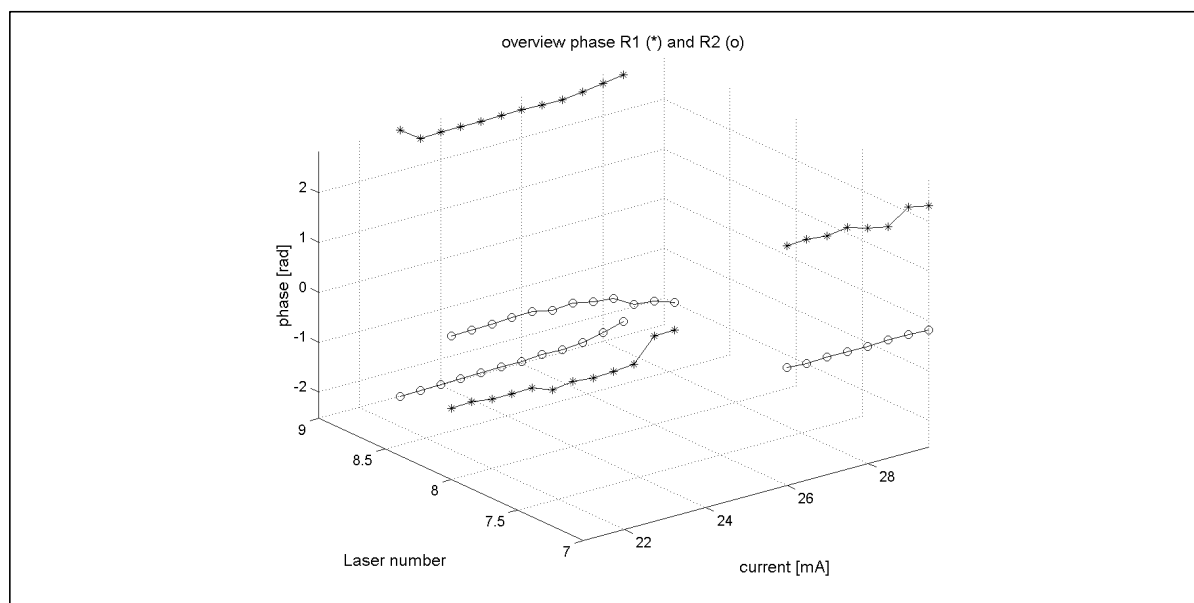
Figuur 8-17: In de figuur zijn de koppelingcoëfficiënten ten gevolge van index en optische versterking te zien voor de drie DFB-laserdiodes, bepaald in een aantal instelpunten beneden drempel. De grootste waarden stellen de indexkoppelingcoëfficiënt voor.

De tweede parameter is de reflectiecoëfficiënt van de facetten. Deze parameter kan enkel via het fitten van het spontane emissie-spectrum bepaald worden. Alhoewel het model gebruik maakt van amplitudereflectiecoëfficiënten, toont Figuur 8-18 de waarden uitgedrukt als vermogenscoëfficiënt. Figuur 8-19 toont de overeenkomstige fases van de reflectiecoëfficiënten.



Figuur 8-18: De bepaalde waarden voor de vermogensreflectiecoëfficiënt van de antireflectiegecoate facetten, uitgedrukt in procent. De verschillende resultaten stellen de beide facetten van de drie DFB-laserdiodes voor.

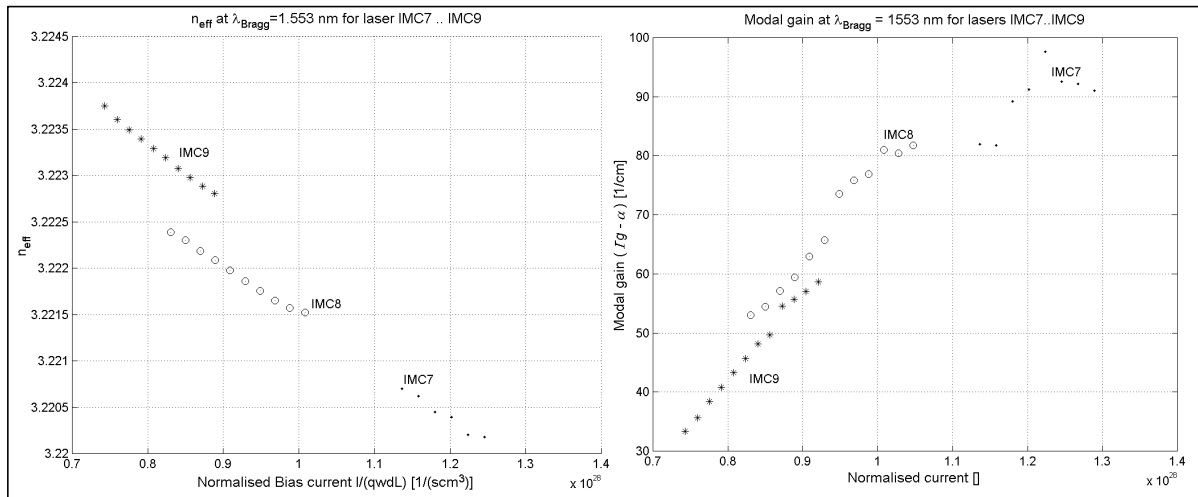
Net zoals bij de koppelingscoëfficiënt is duidelijk te zien dat de bepaalde waarden onafhankelijk zijn van de stroom, zoals verwacht. Bovendien zijn de numerieke waarden voldoende klein om overeen te komen met de vooropgestelde antireflectiecoating van het facet. Verder toont de figuur aan dat de reflectiecoëfficiënt van het achterste facet minder goed bepaald kan worden uit de procedure. Het is logisch dat vooral de reflectiecoëfficiënt aan de voorzijde, waar het spectrum opgemeten werd, een grotere rol speelt in het spectrum dan de coëfficiënt aan de achterzijde. Indien het mogelijk zou zijn om dezelfde meting en extractie te herhalen aan de andere kant van de laserdiode, zou ook de tweede reflectiecoëfficiënt beter kunnen bepaald worden.



Figuur 8-19 : De overeenkomstige fase van de reflectiecoëfficiënten die in Figuur 8-18 te zien zijn.

De laatste resultaten die hier voorgesteld worden zijn de effectieve brekingsindex en de modale optische versterking. Figuur 8-20 toont hoe deze twee parameters, bepaald bij de Bragg-golflengte, variëren als functie van de genormaliseerde stroom. Het is te verwachten dat de curven voor de drie laserdiodes samenvallen bij dezelfde genormaliseerde stromen (afgezien van lekstromen). Het gebied rond $0.82 \cdot 10^{28} (\text{scm}^3)^{-1}$ geeft aan dat er een verschil zou zijn van 0.0005 voor de effectieve brekingsindex in laserdiode IMC9 ten opzichte van laserdiode IMC8. Zoals vermeld is het fitproces niet zozeer gevoelig aan de effectieve brekingsindex, maar wel uiterst gevoelig aan de combinatie van de effectieve brekingsindex en de periode van het diffractierooster. Bij de fabricage van deze laserdiodes werd het diffractierooster met behulp van een e-beam-proces geschreven, hetgeen garandeert dat de periode identiek is voor de drie laserdiodes. Indien aangenomen wordt dat de afwijking niet te wijten is aan lekstromen (de laserstructuur is voorzien van een semi-isolerende hergroei), kan dit verschil gezien worden als de nauwkeurigheid van de extractie.

Rechts op Figuur 8-20 is te zien hoe de modale optische versterking ter hoogte van de Bragg-golflengte varieert als functie van de genormaliseerde stroom doorheen de laserdiodes. In tegenstelling tot de resultaten bekomen bij de Fabry-Perot-laserdiodes blijken de verschillende curven voor de drie DFB-laserdiodes wel samen te vallen.



Figuur 8-20 : Links is de effectieve brekingsindex, rechts de modale optische versterking, beide bepaald ter hoogte van de Bragg-golflengte (1553 nm) en uitgezet als functie van de genormaliseerde stroom.

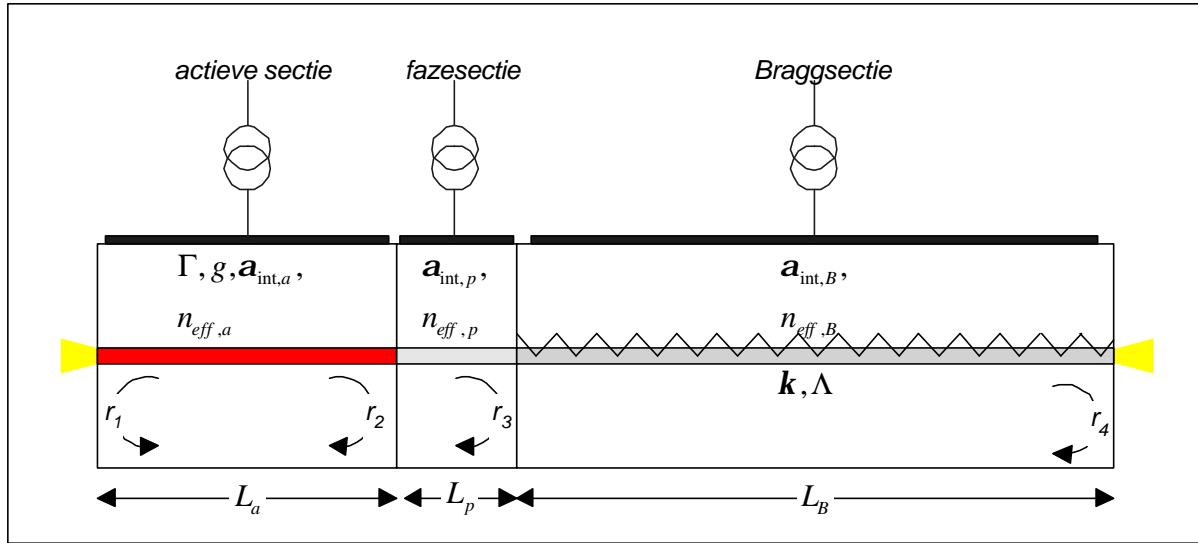
8.3 Spontane emissie-spectrum gebaseerde extractie bij DBR-laserdiodes

8.3.1 Inleiding

Net zoals bij DFB-laserdiodes kan er ook parameterextractie uitgevoerd worden bij DBR-laserdiodes. Door de aanwezigheid van de meerdere secties, zal niet alleen het gebruikte model meer parameters bevatten dan het model van een DFB-laserdiode, maar heeft het ook weinig zin om over “het” spontane emissie-spectrum van de DBR-laserdiode te spreken. Er zijn immers meerdere spontane emissie-spectra mogelijk voor elke combinatie van de stromen door de Bragg- en fasesectie. Het grote aantal parameters maakt het fitproces iets moeilijker dan bij de DFB-laserdiode maar door de vele mogelijke spontane emissie-spectra, is er bij de DBR-laserdiode een mogelijkheid om het vertrouwen in de parameters te verstevigen.

In deze sectie wordt eerst een model voor de DBR-laserdiode afgeleid en dat model wordt vervolgens gefit aan meetresultaten bekomen op een laserdiode [8.3] die ter beschikking gesteld werd door Philips Optoelectronic Centre in het kader van het Europese project UFOS (“User Friendly Optical Sources”).

8.3.2 Het spontane emissie-spectrummodel voor een DBR-laserdiode



Figuur 8-21 : Schematische voorstelling van een DBR-laserdiode met alle parameters

Om het model voor het spontane emissie-spectrum van de DBR-laser op te stellen, worden de spectrale eigenschappen van de Bragg- en fazesectie omgezet in equivalente reflectiecoëfficiënten met behulp van gekoppelde golfvergelijkingen. Op die manier kunnen we de DBR-laserdiode beschrijven als een laserdiode met één sectie maar met een speciale reflector. Ter hoogte van het eindfacet van de Braggsectie kan met behulp van de gekoppelde golfvergelijkingen [8.4], het volgende neergeschreven worden :

$$\begin{aligned} E^+(L) &= e^{-jb_g L_B} \left\{ E^+(0) \left[\cosh(dL) - \frac{j\Delta b}{d} \sinh(dL) \right] + E^-(0) \frac{k}{d} \sinh(dL) \right\} \\ E^-(L) &= e^{jb_g L_B} \left\{ E^+(0) \frac{k}{d} \sinh(dL) + E^-(0) \left[\cosh(dL) + \frac{j\Delta b}{d} \sinh(dL) \right] \right\} \end{aligned} \quad (8.2)$$

Waarbij :

$$d = \sqrt{k^2 - (\Delta b)^2} \quad (8.3)$$

en

$$\Delta b = \left(\frac{2p}{1} n_{eff,B} - \frac{p}{\Lambda_B} \right) - \frac{j a_{i,B}}{2} \quad (8.4)$$

Tegelijkertijd bestaat er bij datzelfde eindfacet een relatie tussen de beide velden E^+ en E^- met name de reflectiecoëfficiënt aan het einde van de sectie : $E(L) = r_4 E^+(L)$ hetgeen kan ingevuld worden in (8.2). Uitgedrukt als een nieuwe reflectiecoëfficiënt aan het begin van de sectie levert dit een golflengte afhankelijke reflectiecoëfficiënt op, gegeven door (8.5).

$$r_B = \frac{E^-(0)}{E^+(0)} = \frac{r_4 e^{-2jb_g L} \left(\cosh(dL) - \frac{j\Delta b}{d} \sinh(dL) \right) - \frac{k}{d} \sinh(dL)}{\cosh(dL) + \frac{j\Delta b}{d} \sinh(dL) - \frac{k}{d} \sinh(dL) r_4 e^{-2jb_g L}} \quad (8.5)$$

Dit resultaat levert ons een nieuwe sectie op die een combinatie is van de fase- en de Braggsectie. Vervolgens wordt opnieuw de invloed van deze sectie herleidt tot een nieuwe reflectiecoëfficiënt

$$r_3' = r_3 + |t_3|^2 r_B = r_3 + (1 - |r_3|^2) r_B \quad (8.6)$$

De invloed van de fasesectie is dan :

$$r_p' = r_3' e^{-j \frac{4p}{l} n_{eff,p} L_p - \mathbf{a}_{i,p} L_p} \quad (8.7)$$

Bijgevolg :

$$\begin{aligned} r_2' &= r_2 + |t_2|^2 r_p \\ &= r_2 + (1 - |r_2|^2) e^{-j \frac{4p}{l} n_{eff,p} L_p - \mathbf{a}_{i,p} L_p} (r_3 + |t_3|^2 r_B) \end{aligned} \quad (8.8)$$

Met ander woorden het spontane emissie-spectrum dat uit de actieve sectie komt is gegeven door :

$$P_{ASE}(I) = C \frac{\left(e^{(\Gamma g - \mathbf{a}_{i,a}) L_a} - 1 \right) (1 - |r_2'|^2) e^{(\Gamma g - \mathbf{a}_{i,a}) L_a}}{\left(\Gamma g - \mathbf{a}_{i,a} \right) \left| 1 - r_1 r_2' e^{-j \frac{4p}{l} n_{eff,p} L_p} e^{(\Gamma g - \mathbf{a}_{i,a}) L_a} \right|} \quad (8.9)$$

Alvorens de uitdrukking (8.9) kan gebruikt worden in een parameterextractieproces moet er ook een model gegeven worden voor de optische versterking en de effectieve brekingsindices van de drie secties. Hierbij kan verondersteld worden dat enkel statisch gedrag wordt beschreven en mogen de temperatuurseffecten verwaarloosd worden gezien de temperatuur van de laser tijdens de meting gestabiliseerd wordt. Als verder nog aangenomen wordt dat enkel de stroom door de eigenlijke sectie een rol speelt voor de eigenschappen van die sectie, kunnen voor elke sectie de volgende uitdrukkingen geschreven worden voor de optische versterking (5.8) en de effectieve brekingsindex (5.9).

$$g_{sectie} = g_{0,sectie} + g_2 (E - E_{piek})^2 \quad (8.10)$$

$$n_{eff,sectie} = n_{0,sectie} + n_{1,sectie} I \quad (8.11)$$

8.3.3 Evaluatie van het gebruikte model

Het model voor het spontane emissie-spectrum van een DBR-laserdiode werd opgesteld vanuit de fysische werking van de laserdiode en bevat dan ook een aantal fysische parameters. Niet alle parameters kunnen echter geëxtraheerd worden doordat ze altijd in combinatie voorkomen in de gebruikte uitdrukkingen.

Uit (8.9) blijkt duidelijk dat het onmogelijk zal zijn de optische versterking, de vulfactor en de interne verliezen afzonderlijk te kennen. De vulfactor en de interne verliezen kunnen gezien worden als respectievelijk een schalingsfactor en een offset voor de optische versterking, er wordt dan ook gekozen om enkel de coëfficiënten van de optische versterking te fitten zoals die voorkomen in (5.8).

Uit de uitdrukkingen (8.4) en (8.7) blijkt tevens dat de effectieve brekingsindex altijd in combinatie met de interne verliezen van de sectie voorkomt, hetgeen opnieuw een onafhankelijke extractie verhindert. In (8.7) blijkt trouwens ook dat voor de fase sectie beide parameters telkens met de lengte van de sectie vermenigvuldigd zijn, een lengte die trouwens nergens anders voorkomt. Net zoals de lengtes van de andere secties, is het niet mogelijk om deze parameter onafhankelijk te extraheren. Gezien de lengte een parameter is die extern eenvoudig kan opgemeten worden, vormt deze parameter geen probleem voor de verdere extractie en wordt deze parameter als vast verondersteld.

De uitdrukking (8.4) toont ook duidelijk aan, dat de periode van het diffractierooster kan gecompenseerd worden door een andere waarde van de effectieve brekingsindex. Het is dan ook van belang om de periode (die bij fabricage vastligt) goed te kennen en als vaste parameter te veronderstellen gedurende de extractie van de andere parameters.

Er wordt bij de constructie van de DBR-laserdiode voor gezorgd dat de reflecties tussen de verschillende secties zo klein mogelijk zijn, zodat kunnen de overblijvende reflecties ervoor zorgen dat de actieve sectie zich als een Fabry-Perot laserdiode gaat gedragen, hetgeen de correcte werking van de DBR-laserdiode teniet doet. Met andere woorden de parameter r_2 is klein, hetgeen gevolgen heeft voor de parameterextractie. Het model (8.9) kan in combinatie met (8.8) herleid worden tot (8.12).

$$P_{ASE}(I) = C \frac{\left(e^{(\Gamma g - \mathbf{a}_{i,a})L_a} - 1 \right) \left(1 - |r_3 + |t_3|^2 r_B|^2 e^{-j\frac{4p}{I} n_{eff,p} L_p + (\Gamma g - \mathbf{a}_{i,a})L_a - \mathbf{a}_{i,p} L_p} \right)}{\left(\Gamma g - \mathbf{a}_{i,a} \right) \left| 1 - r_1 \left(r_3 + |t_3|^2 r_B \right) e^{-j\frac{4p}{I} (n_{eff,p} L_p + n_{eff,a} L_a) + (\Gamma g - \mathbf{a}_{i,a})L_a - \mathbf{a}_{i,p} L_p} \right|} \quad (8.12)$$

Hieruit blijkt duidelijk dat enkel de combinatie van de effectieve brekingsindex in de actieve en fase sectie (8.13) kan geëxtraheerd worden.

$$n_{eff,a} L_a + n_{eff,p} L_p \quad (8.13)$$

Verder blijkt ook dat het model niet gevoelig is aan de optische versterking in de actieve sectie of aan de interne verliezen in de fase sectie maar wel aan de combinatie ervan gegeven in (8.14).

$$\left(\Gamma g - \mathbf{a}_{i,a} \right) L_a - \mathbf{a}_{i,p} L_p \quad (8.14)$$

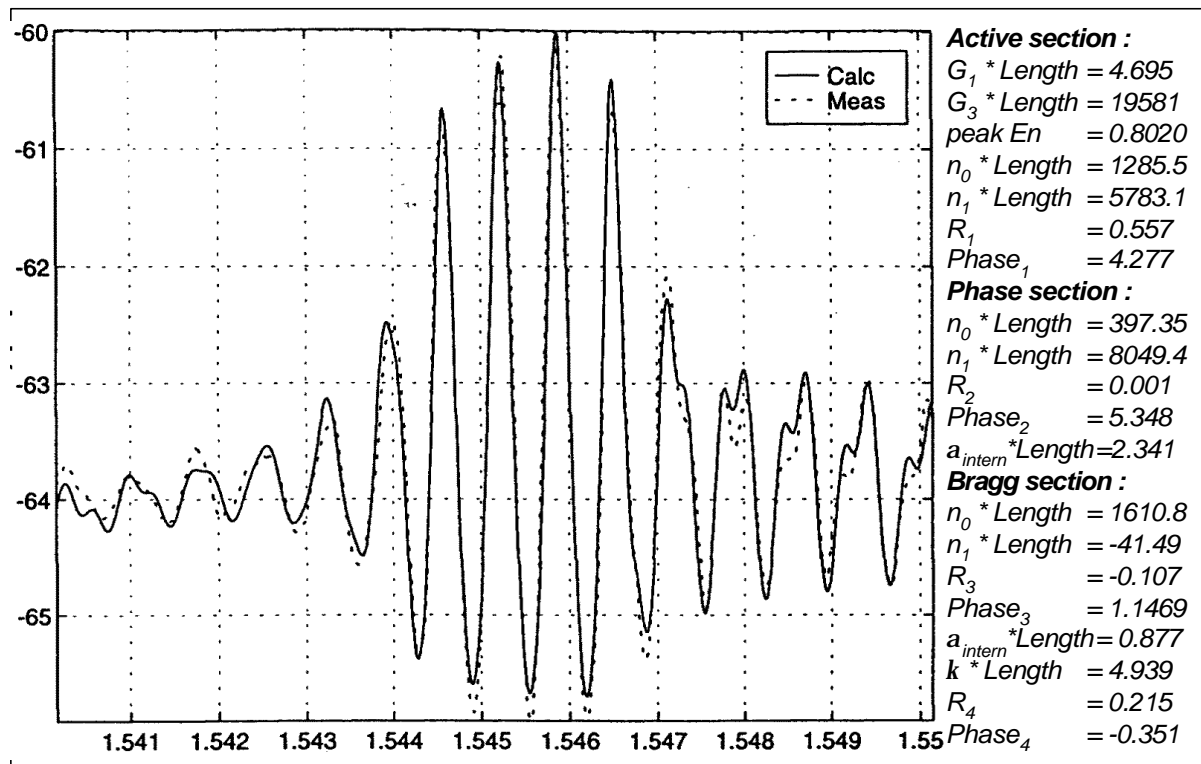
8.3.4 Fitprocedure

Om de parameters te extraheren, werd er met behulp van het optimaliseringsalgoritme volgens Powell [8.5] het numerieke model gefit aan het gemeten spectrum. Als kostenfunctie werd de som van de kwadraten van de fout gebruikt, vermeerderd met een a-priori-kennisterm (cf. hoofdstuk 2, sectie 2.5.2) om de reflectiecoëfficiënten binnen fysische grenzen te houden.

Het is onmogelijk is om alle 21 parameters in één stap te fitten. Het is nodig om eerst manueel een aantal startwaarden te kiezen voor de meest belangrijke parameters (koppelingscoëfficiënt, optische versterking, effectieve brekingsindices). Hierbij worden in eerste benadering de hogere orde aspecten zoals dispersie voor de effectieve brekingsindices

verwaarloosd. Deze verfijningen in het model voor het spontane emissie-spectrum van de laserdiode worden dan in een later stadium aan het fitproces toegevoegd om het eindresultaat voldoende nauwkeurig te maken.

Na het kiezen van een set startwaarden voor de parameters, werden eerst het maximum van de optische versterkingscurve gefit, met name E_p uit vergelijking (5.8). Vervolgens werden de volledige curves voor de effectieve brekingsindex en optische versterking gefit door het optimaliseringsalgoritme uit te voeren waarbij de parameters uit vergelijkingen (5.8) en (5.9) variabel gemaakt werden. Uiteindelijk werd er een laatste optimaliseringsstap uitgevoerd waarbij alle parameters van het model geoptimaliseerd werden. Figuur 8-22 toont het resultaat van deze fitprocedure voor de meting waarbij de actieve-, fase- en Braggstroom respectievelijk 22 mA, 0 mA en 0 mA waren.



Figuur 8-22 : Voorbeeld van een gemeten en een gefit spontane emissie-spectrum voor de DBR-laserdiode van Philips. Links de intensiteit [dB] versus de golflengte [μm], rechts de gefitte parameters van het model

Gezien het hier om een DBR-laserdiode gaat, bestaat er eigenlijk geen eenduidig spontane emissie-spectrum, Het spontane emissie-spectrum van de laserdiode verandert volgens de instelstromen van de fase- en de Braggsectie. Het is dan ook relevant om de parameterextractie uit te voeren op verschillende spontane emissie-spectra bij verschillende combinaties van de stromen door de fase- en Braggsectie.

Eenmaal er een goede fit bereikt is voor een bepaalde instelling van de stroom door fase- en Braggsectie, kan deze parameterset gebruikt worden als startwaarde voor de opeenvolgende parameterextracties in de andere instelpunten. Een kleine verandering in de instelstromen, zal immers slechts een kleine invloed hebben op het spectrum en bijgevolg een kleine variatie aanbrengen in de waarden van de parameterset. Dit heeft verstrekkende gevolgen

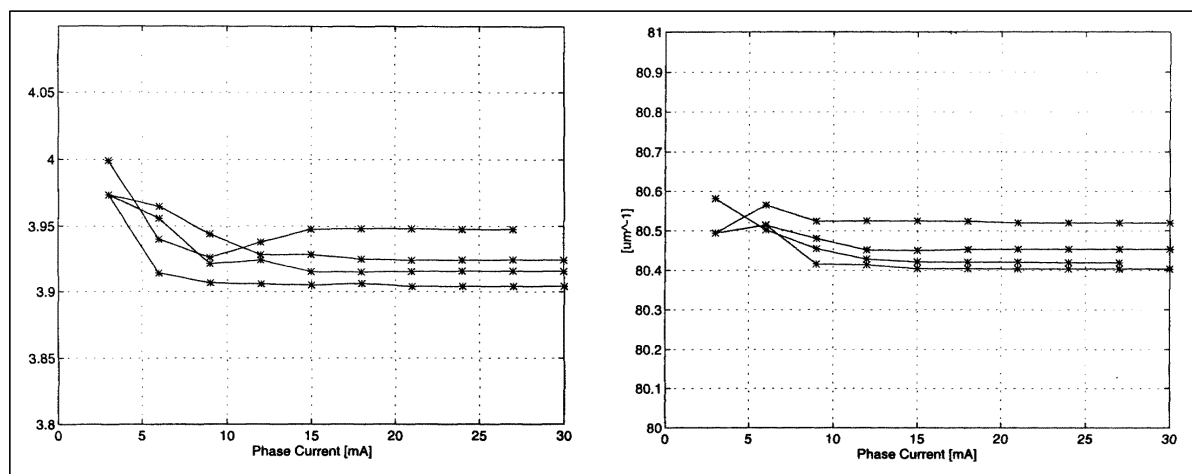
gezien de verdere parameterextractie nu volledig kan geautomatiseerd worden doordat er geen manuele interventie meer vereist is.

Bovendien kan de initiële optimaliseringsprocedure aangepast worden aan de hand van de fysische kennis. In een eerste stap worden nieuwe waarden bepaald voor de offsetcoëfficiënt en de spectrale parameters van de actieve sectie (deze parameters kunnen veranderen ten gevolge van lekstromen). Op die manier wordt ervoor gezorgd dat het berekende en het gemeten spectrum voldoende overlappen. In een tweede stap worden de parameters van de fase- en Braggsectie geoptimaliseerd gezien deze parameters sterk beïnvloed worden ten gevolge van de veranderingen in de instelstromen. In een laatste stap worden alle parameters van het model nog eens tegelijkertijd geoptimaliseerd zodat er een nauwkeurige fit kan bereikt worden.

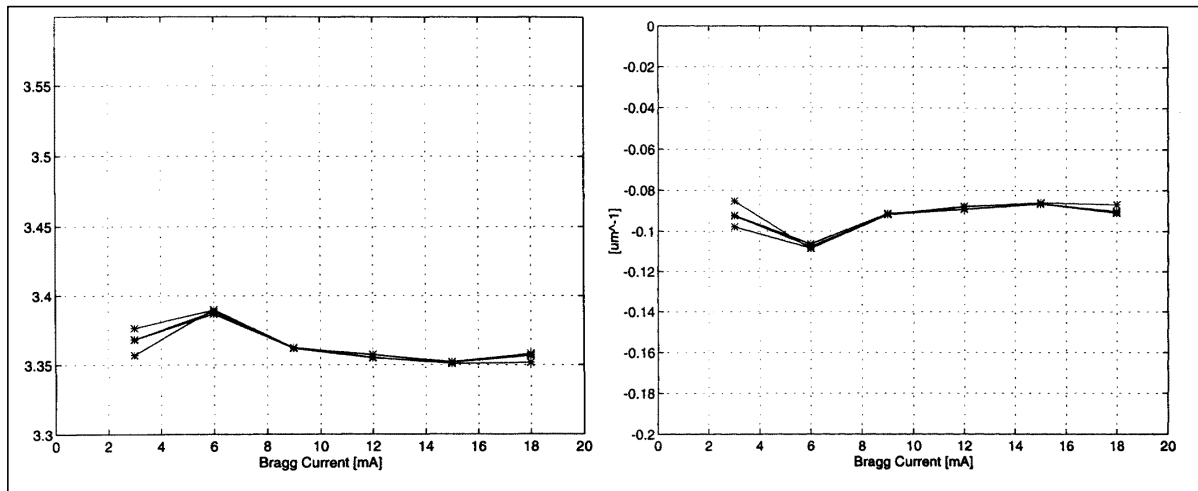
8.3.5 Resultaten van de extractie op een DBR laser van Philips

Het initiële resultaat waarbij er geen stroom vloeit door de fase- en Braggsectie, is te zien in Figuur 8-22. Deze oplossing werd gebruikt als startvoorwaarde voor de andere meetpunten waarbij de stroom door de fase- en Braggsectie gevarieerd werd van 3 tot 30 mA en de stroom door de Braggsectie van 3 tot 18 mA, telkens in stappen van 3 mA.

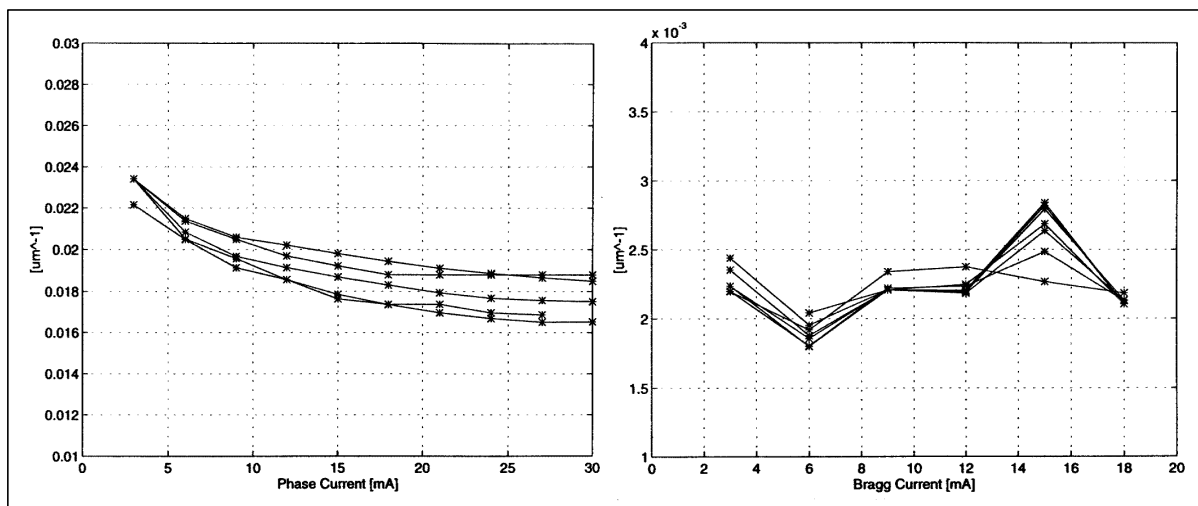
Gezien de hoeveelheid parameters (21 in elk meetpunt) kunnen enkel een paar resultaten aan bod komen. Hierbij werd gekozen om enkel de variërende parameters aan bod te laten komen. Gezien enkel de stromen door de fase- en Braggsectie variëren, zullen ook enkel de effectieve brekingsindices en de interne verliezen voor die secties variëren. Deze resultaten worden respectievelijk voorgesteld in Figuur 8-23, Figuur 8-24 en Figuur 8-25. Uit de figuren blijkt duidelijk dat de gefitte parameters de juiste tendensen vertonen. Het dient ook opgemerkt te worden dat het interne verlies in de fase- en Braggsectie (links op Figuur 8-25) nogal groot is. Dit is wellicht te wijten aan het feit dat de fase- en Braggsectie kort is ten opzichte van de andere secties in de laserdiode, hetgeen het moeilijker maakt om de parameters ervan nauwkeurig te fitten.



Figuur 8-23 : Coëfficiënten n_0 en n_1 voor de effectieve brekingsindex van de fase- en Braggsectie

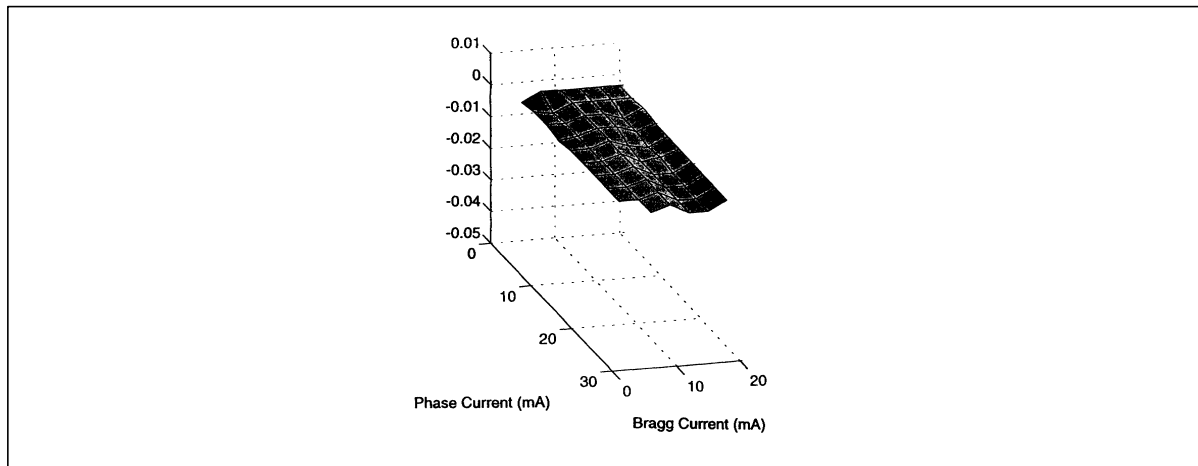


Figuur 8-24 : Coëfficiënten n_0 en n_1 voor de effectieve brekingsindex van de Braggsectie



Figuur 8-25 : De interne verliezen van de fase- (links) en de Braggsectie (rechts).

De andere parameters mogen niet veranderen gezien deze niet beïnvloed worden door de veranderende stromen. Niettemin is het nuttig om de parameters toch te fitten; het constant blijven van de geëxtraheerde waarde is immers een vertrouwensfactor voor de resultaten. Als voorbeeld van een dergelijke parameter, worden de resultaten voor de reflectiecoëfficiënt tussen de fase- en Braggsectie getoond in Figuur 8-26.



Figuur 8-26 : Reflectiecoëfficiënt van de overgang van de fasesectie naar de Braggsectie als functie van de stroom doorheen beide secties.

8.4 Besluit

In dit hoofdstuk werden de ontwikkelde methodes en toepassingen getest aan de hand van echte componenten. De parameterextractie gebaseerd op het spontane emissie-spectrum van een DBR laser diode werd uiteengezet en de gegeven resultaten tonen aan dat een dergelijke extractie kan uitgevoerd worden in de praktijk.

De geïntegreerde softwaretoepassingen werden gebruikt om een set laserdiodes te karakteriseren. Tijdens het uitvoeren van de meet- en parameterextractieprocedure hebben de toepassingen bewezen dat de voorgestelde aanpak voldoet aan de gestelde eisen.

De meest relevante resultaten bekomen op het set DFB- en Fabry-Perot-laserdiodes zijn weergegeven in dit hoofdstuk. Uit de resultaten blijkt dat parameterextractie op een dergelijk set laserdiodes mogelijk is en dat de resultaten bekomen op een afzonderlijke laserdiode kunnen gevalideerd worden. Op basis van de resultaten werd uitgelegd dat het niet mogelijk was om de verdere gecombineerde parameterextractie uit te voeren. Verschillende resultaten (optische versterking en de brekingsindex) toonden aan dat het materiaal waaruit de laserdiodes vervaardigd zijn niet voldoende uniform was.

-
- [8.1] L. Westbrook, D. Cooper, P. Spurdens, 'Measurements of Linewidth enhancement, gain and spontaneous emission in InGaAs Quantum Well Lasers with InGaAsP barriers', Proc. of 11th IEEE Int'l Semiconductor Laser Conf., pp. 184-185, 1988, Boston, USA
 - [8.2] Grabmaier, Appl. Phys. Lett. 59, 1991, p. 3024
 - [8.3] A. Staring, J. Binsma, P. Kuidersma, E. Jansen, P. Thijs, D. van Dongen and G. Depovere, "Wavelength-independent output power from an injection-tunable DBR laser", Phot. Techn. Lett., Vol.6-2, pp. 147-149, 1994
 - [8.4] T. Makino, J. Glinski, "Transfer Matrix analysis of the amplified spontaneous emission of DFB semiconductor laser amplifiers", JQE, 24-8, 1988, pp. 1507-1518
 - [8.5] R. Fletcher, M.J.D. Powell, Computer Journal, Vol 6, pp. 163-168, 1963

HOOFDSTUK 9

Besluit en toekomstperspectief

9.1 Inleiding

De rode draad doorheen dit proefschrift was het meten op opto-elektronische componenten en het bepalen van hun parameters. In plaats van rechttoe rechtaan de reeds bestaande meetprocedures toe te passen op zoveel mogelijk bestaande en nieuwe componenten, heeft dit werk zich geconcentreerd op het eigenlijke meet- en parameterextractieproces met als groot doel het meten en extraheren van parameters tegelijk “aangenamer” te maken voor de onderzoeker en tegelijk meer geschikt te maken voor productie-omgevingen door automatisering mogelijk te maken. In dit proefschrift werd dit doel op drie fronten aangepakt : een onderzoek van geavanceerde parameterextractiemethodes, een meetopstelling voor de karakterisering en een algemene software-aanpak om het geheel te ondersteunen.

9.2 Overzicht van het gerealiseerde werk

In dit werk werden de procedures onderzocht voor geavanceerde parameterextractie, meer specifiek de methodes gebaseerd op het fitten van numerieke modellen aan gemeten karakteristieken. Hoofdstuk 5 geeft aan hoe geavanceerde parameterextractie mogelijk is voor afzonderlijke laserdiodes en hoe de informatie verkregen uit een aantal laserdiodes van een verschillend type kan gebruikt worden om tot een betere parameterset te komen. De gestructureerde behandeling geeft een duidelijk beeld van de mogelijkheden en de beperkingen van de methodes en geeft ook een aantal opties om de methodes robuuster te maken zodat automatisering mogelijk wordt. Dit laatste staat toe om de methodes op termijn in productie-omgevingen te gebruiken.

In dit werk stonden twee geavanceerde parameterextractiemethodes centraal : de parameterextractie gebaseerd op het spontane emissie-spectrum en de parameterextractie gebaseerd op het relatieve intensiteitsruisspectrum. Deze twee werden verkozen omdat de metingen tegelijkertijd “eenvoudig” uit te voeren zijn en ze toch een grote hoeveelheid informatie bevatten. Zoals uitgelegd leent de extractie aan de hand van het spontane emissie-spectrum zich vooral tot het extraheren van interne parameters van de laserdiode zoals de koppelingscoëfficiënt en de golfgeleidereigenschappen. De extractie aan de hand van de relatieve intensiteitsruis levert informatie over de dynamische eigenschappen van de laserdiode. Niettegenstaande de meting uitgevoerd wordt bij een constante stroom.

De voorgestelde methodes en parameterextractieprocedures werden in het kader van dit werk geëvalueerd door de ontwikkelde toepassingen te gebruiken in enkele concrete situaties. In hoofdstuk 8 werden de resultaten van die procedures besproken voor een DBR-laserdiode en een set laserdiodes van het Fabry-Perot- en het DFB-type.

Voor de karakterisering werd een krachtige doch handige en multifunctionele meetopstelling ontworpen en gerealiseerd. Deze opstelling laat aan de onderzoeker toe om een groot gamma metingen uit te voeren en de concrete meetcondities naar believen aan te passen, zonder dat hiervoor ingrijpende veranderingen aan de hardware van de opstelling vereist zijn. Een duidelijk voorbeeld hiervan zijn de in hoofdstuk 6 voorgestelde resultaten bekomen bij het uitmeten van de reflectiegevoeligheid van Fabry-Perot-laserdiodes met een emissiegolflengte in het zichtbare gebied.

Om de softwaretoepassingen van dit werk te realiseren, werd de opgedane kennis in verband met de metingen en de parameterextractieprocedures in hoofdstukken 2 en 3 op een abstracte manier geanalyseerd aan de hand van objectgeöriënteerde technieken. Deze analyse liet toe om de specifieke problematiek om te zetten in generieke softwaremethodes, die op hun beurt de mogelijkheid boden om een software-framework te realiseren dat, net zoals de meetopstelling, tegelijkertijd kon voldoen aan de eisen van kracht en flexibiliteit. De analyse gebeurde op vier vlakken: het samenwerken van verschillende toepassingen, de interactie met meettoestellen, de parameterextractie en de herbruikbaarheid van de toepassingen met oog op verdere automatisering.

Het probleem van de samenwerking tussen de verschillende toepassingen werd aangepakt door een formele informatiestructuur te ontwikkelen, die een vast kader biedt voor de interactie en toch voldoende flexibiliteit overlaat zodat ze niet als een beperking ervaren wordt. Deze structuur kreeg de naam ODIF en werd initieel uitgetest bij informatie-uitwisseling binnen het Europese project COST240. De praktijk toonde aan dat een dergelijk bestandsformaat handiger werkt dan vele bestaande ad hoc oplossingen doordat software-interfaces op een meer algemene manier kunnen geïmplementeerd worden.

De voorgestelde methode staat tevens toe om via hetzelfde interactiemechanisme de toepassingen op afstand te gebruiken en zo bijvoorbeeld metingen via het internet te realiseren. Een dergelijke meting werd in het kader van dit proefschrift uitgevoerd; hierbij werd via het internet een laserdiode op de opstelling in Gent uitgemeten aan de hand van meetsoftware op een computer in Brussel.

Om de interactie met de meettoestellen te verbeteren, werd een abstract communicatie-principe ontworpen dat de naam functionele instrumentdriver kreeg. Deze techniek laat toe om meettoepassingen te ontwikkelen die niet a priori afhankelijk zijn van de initieel gebruikte meettoestellen. Hierdoor kunnen de fysische toestellen vervangen worden, zonder dat er grote software-aanpassingen nodig zijn. Bovendien laat deze methode toe dat minder ervaren gebruikers toch kunnen genieten van de flexibiliteit zonder dat ze daarvoor uitgebreide softwarekennis moeten opdoen.

Tijdens de onderzoeksperiode van dit proefschrift werd er voor de belangrijkste optoelektronische meetinstrumenten een dergelijke functionele instrumentdriver gerealiseerd, die onder diverse condities uitgetest werd door verschillende gebruikers.

Om de onderzoeker een “aangename” en flexibele omgeving te bieden voor parameterextractietoepassingen werd in hoofdstuk 3 de algemene parameterextractieprocedure (model, kostenfunctie en optimaliseringsalgoritme) aan de hand van objectgeöriënteerde methodes op

een volledig abstracte manier uitgewerkt. Door deze studie werd het mogelijk om de gebruiker een framework te bieden waarin het mogelijk is om lasermodellen, kostenfuncties en optimaliseringsalgoritmes onafhankelijk van elkaar te implementeren. Dit staat aan de eindgebruiker toe om nieuwe modellen voor parameterextractie toe te voegen zonder dat hij een uitgebreide of gedetailleerde kennis van het geheel nodig heeft.

Om deze methode tegelijk krachtiger en eenvoudiger te maken werd er, in hoofdstuk 7, voor gekozen om de implementatie uit te voeren d.m.v. een symbiose van twee programmeertalen: een tekstuele taal (C++) en een grafische taal (LabVIEWⁱ). Ook deze combinatie werd op een abstracte manier uitgewerkt en gerealiseerd, zodat het mogelijk was om enkele codegeneratoren te ontwikkelen. Deze laten de gebruiker toe om via een gestandaardiseerde procedure nieuwe modellen toe te voegen zonder dat hij over een gedetailleerde softwarekennis dient te beschikken.

Met het oog op herbruikbaarheid van de meettoepassingen, werd ook de implementatie van die toepassingen op een algemene manier bekeken. Dit werk geeft in hoofdstuk 7 een overzicht van drie basistoepassingen en de specifieke voordelen van de ontwikkelde implementatietechnieken. De systematische aanpak staat toe om zelfs complexe toepassingen te gebruiken als onderdeel van grotere toepassingen, bijvoorbeeld om een verdere automatisering door te voeren. Hierdoor wordt niet alleen het hergebruik van de ontwikkelde code bevorderd, maar krijgt de onderzoeker ook een software-omgeving waar hij steeds meer aandacht kan hebben voor de resultaten en steeds minder aandacht hoeft te besteden aan triviale repetitieve softwaretaken.

De hier behandelde software-aspecten resulteerden in een aantal concrete toepassingen die onder de verzamelnaam “OLIMPEX”ⁱⁱ ter beschikking werden gesteld aan een aantal bedrijven en universiteiten in Europa, Canada en de VS. De ervaring met de diverse concrete toepassingen zoals “OSAvieW”, “ESAvieW”, “ASEfit”, “LNWfit”, “FPgain”, “Tune4” en “TuneCo” toonden duidelijk aan dat de vooropgestelde doelen via de in dit werk gepresenteerde aanpak kunnen gerealiseerd worden.

9.3 Slotbemerkingen

Bij het begin van dit werk werd de studie van parameterextractiemethodes voor opto-elektronische componenten en het bepalen van hun parameters vooropgesteld. Door niet alleen de methodes te bestuderen maar ook de verschillende andere aspecten te bekijken, heeft dit werk bijgedragen tot de ontwikkeling van een nieuwe werkomgeving voor metingen en parameterextractietechnieken.

De in dit werk besproken softwaretechnieken staan toe om in de toekomst meettoepassingen te genereren die veel minder afhankelijk zijn van meetinstrumenten, toepassingen die als plug-in of op afstand kunnen gebruikt worden en die bestand zijn tegen de veranderende eisen van de gebruikers.

ⁱ LabVIEW is een product van National Instruments

ⁱⁱ OLIMPEX staat voor : Opto-eLectronic Integrated Measurement and Parameter EXtraction

Het parameterextractieframework en de ODIF-informatiestructuur staan aan de toekomstige gebruikers toe om met een minimale inspanning nieuwe toepassingen te implementeren zodat er meer tijd vrijkomt voor het ontwikkelen van de modellen, het interpreteren van de resultaten en de uitwerking van nieuwe extractiemethodes.

Door de systematische aanpak werd er een set geïntegreerde toepassingen ontwikkeld die naast het uitvoeren van de doelstellingen (meten en parameterextractie) een ruimer doel realiseerden. Immers, naast de concrete toepassingen die momenteel onder de naam OLIMPEX verspreid worden, werden ook een hele reeks basiscomponenten en technieken ontwikkeld die algemeen bruikbaar zijn, ook buiten het opto-elektronische domein.

APPENDIX A

ODIF : Optical Data Interchange Format

Inleiding

In hoofdstuk 3 werd een beschrijving gegeven van een informatiestructuur om gegevens over instellingen en resultaten van metingen, modellen en parameterextracties te bewaren. De beschrijving werd beperkt tot de hoogste hiërarchische niveaus om de algemene lijn van het proefschrift niet te verstoren. In deze appendix wordt die syntax vanuit een praktisch standpunt en in meer detail behandeld. Deze appendix kan op zichzelf gebruikt worden en werd reeds gepubliceerd als appendix A van het COST 240 boekⁱ.

Na een inleiding, wordt aan de hand van een aantal concrete voorbeelden, de structuur van de syntax, de regels en het gebruik van de verschillende elementen geïllustreerd (sectie A.3). Vervolgens geeft sectie A.4 een complex doch een realistisch voorbeeld dat uitgesplitst wordt in de verschillende subblokken. In sectie A.5, wordt uitgelegd hoe er van een “probleem” overgegaan wordt naar een bestandsstructuur. Als voorbeeld worden in sectie A.5.5 de verschillende stappen, samen met de corresponderende regels uit de syntax, uitgelegd voor een klassiek meetprobleem. In de laatste sectie wordt tenslotte de volledige syntaxbeschrijving op alle niveaus gegeven.

Naast de informatie in deze appendix is er ook informatie en software i.v.m. de ODIF-informatiestructuur te vinden op het internetⁱⁱ. De informatie, die op het moment van het verschijnen van dit werk op het internet ter beschikking was, werd bovendien ook overgenomen in elektronische vorm in appendix D.

ⁱ G. Guekos (Editor), “How to model and measure photonic devices. Experiences from a European collaboration”, Springer Verlag GmbH (Berlin), 1998

ⁱⁱ Adres van de ODIF web site : <http://www.intec.rug.ac.be/Research/Groups/optoMC/odif/>

Appendix A : An Optical Data Interchange Format

A.1 Introduction

The problem of defining a data format appears each time when a model is implemented or when a measurement is automated. Both the input data and the results need to be stored on a computer disk and all persons or applications involved need to understand the content of the file.

Most applications have their own specific format, the numbers in a certain order, in the best case accompanied with some comments but mostly it is just a set of numbers without any reference to their meaning nor their units. When another application needs the results but wants them in a different order or unit, a conversion is needed.

When the data is to be exchanged with other parties these conversion difficulties cause the exchange format to be a paper copy, even when all parties involved have full access to electronic media.

This situation is far from optimal, since each conversion (either automatically or manual retyping) has a big error potential. Furthermore there is the loss of manpower due to the constant need for conversion (programs).

In order to prevent this proliferation of conversion applications, error potential and the manpower spent on deciphering large sets of numbers, a file format is needed which can cope with the complexity of the optical problems yet is not a limiting factor for the actual data storage. For this purpose ODIF, an Optical Data Interchange Format is proposed.

A.2 Terms and conditions of a common interchange format

The problem of data interchange actually breaks up in two parts : the first aspect is what you put in a file, the second aspect is how you put it in the file.

Deciding on what is in a file is specifying the content of that file, e.g. "L" stands for the laser cavity length. Since content is a highly problem-specific issue, it is almost impossible to cast content specification into a set of rigid yet non limiting rules.

Deciding on how to put the information in a file however can be treated in a generic way and thus it can be cast into strict rules, which are commonly known as a "syntax description". All programming languages have a strict syntax on how to write a program (i.e. which characters and in what order they can be in the file), yet it doesn't limit what the actual program achieves (i.e. the content or the performance of the algorithm the program describes). In the same way, a data file syntax description can be made such that it is a strict definition of how to write the file yet doesn't limit what can be stored in the file.

In order to successfully design this syntax, the boundary conditions and restrictions for the files must be outlined on a general level

The demands can be summarised as follow :

- *Flexibility* : the syntax must be designed such that all types of results (from modelling, measurements and parameter extraction) can be incorporated into the same file. This without increasing the overall complexity of the file or syntax.

- *Uniformity* : Since all types of results can be incorporated into one file, they should be treated in a similar way, in order to simplify the usage of the syntax and reduce the number of rules.
- *Platform compatibility* : The syntax must be designed such that every partner can generate and read files on the computer platform he normally uses (UNIX-Workstation, Mac, PC, ...).
- *E-mail compatibility* : Possibility to use modern media for transmission of data (e-mail) is essential to the long term success of such a syntax.
- *Readable by "normal" applications* : The user of the syntax must be able to read a file and manipulate its data without specialised applications or translators. Most of the "normal" programs on the different platforms (e.g. commercially available text editors, word processors, spreadsheets, ...) should be able to read the files and plot the data inside.
- *Not only results* : The origin of results in a file is often as relevant as the results themselves (e.g. the used model and its parameters, the measurement method and settings of the instruments, extraction tools and reference to original data, ...). In order to keep this information during data exchange, the best way is to enclose the information in the "result" file in a structured way.
- *Comments are useful* : As with programming languages, data files need comments added to the results (e.g. used methods, definitions, etc.). The syntax should also incorporate a standard way to include such comments, without damaging the integrity or readability of the data.
- *Simplicity first* : Although the syntax must be able to cope with highly complex data (e.g. a combination of several measurement, modelling and extraction results), it should still be able to store simple results (e.g. a one value measurement) with a minimal overhead.
- *Dynamic to the future* : The syntax must be designed such that it has no hard constraints to future needs, nor should it have hard constraints towards the complexity of the file contents.
- *No strict order* : When storing and recalling results, most errors occur when the numbers need to be in a strict order, referencing the results by a name is more natural and reduces the errors.

Each of these demands has implications on the definition of the syntax. Figure A.1 gives a summary of how the demands are linked to the most important restrictions of the syntax definition.

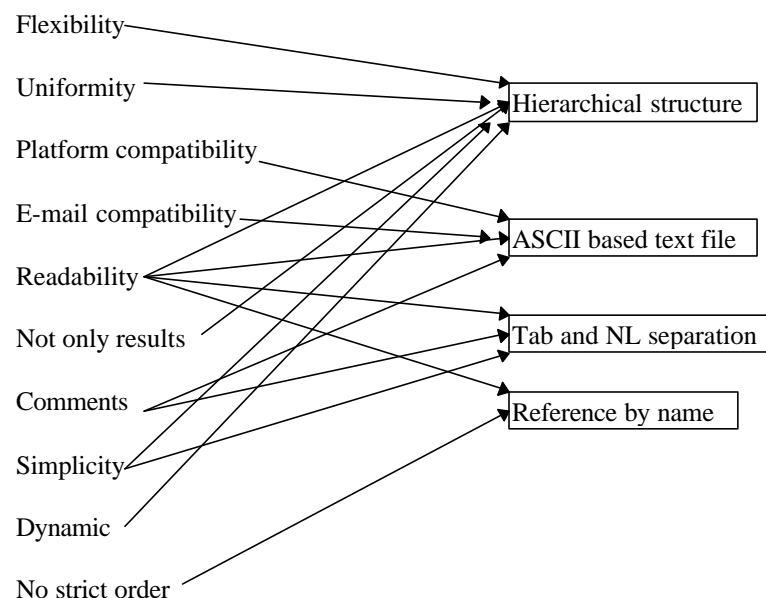


Figure A.1: Summary of the demands and restrictions of the syntax definition.

The ODIF syntax like most syntax definitions, will be a hierarchically structured file format stored in ASCII. It will allow to store and retrieve information based on a name rather than a position in the file. But contrary to most syntax definitions, it will have a strict limitation with respect to white spaces : since most spreadsheet applications use tab and new line characters as separators, ODIF will have to impose restrictions to enable the spreadsheet compatibility.

If the demands for readability (both software and human) would be given up, the strict limitations towards white spaces as well as the ASCII limit can be removed and a more compact, yet binary version of ODIF could be specified.

A.3 The syntax description

A.3.1 Introduction

Describing a syntax is not a trivial task and errors are very likely to occur due to misinterpretation of the standard. For this reason, a formal specification of the ODIF syntax has been written using the classical syntax notation according to N. Wirth, which is given in sections 6 and 7 of this appendix together with some explanation to the method of notation. This part will explain the syntax in less exact terms but will give a better understanding of the ideas and concepts behind the ODIF syntax.

A.3.2 Basic concepts of an ODIF file

An ODIF file is a hierarchical storage place for results of all kinds. In order to keep the different data in place, the ODIF file is divided into *blocks*. Each block has a specific task and can contain a number of other *blocks*, which also have a specific task (storage purpose) and will in turn contain either the data itself or a number of lower order *blocks*.

The *blocks* are indicated using keywords (typically starting with “@” and ending on “.begin” or “.end”) at the beginning and end of each section. Since name referencing is requested, each *block* can obtain a name to clarify its purpose and help accessing the right *block*.

At the lowest level, the data are stored in different lines (with name reference) or in a table if the data come in a matrix form.

A.3.3 The highest level

On the highest level is the *file block*, which can consist of a number of *global blocks*. Each *global block* is a container of results and all results stored in such a container are considered to be related. E.g. several measurements on a device can be stored within one *global block*, measurements on several devices would typically be stored in several *global blocks*.

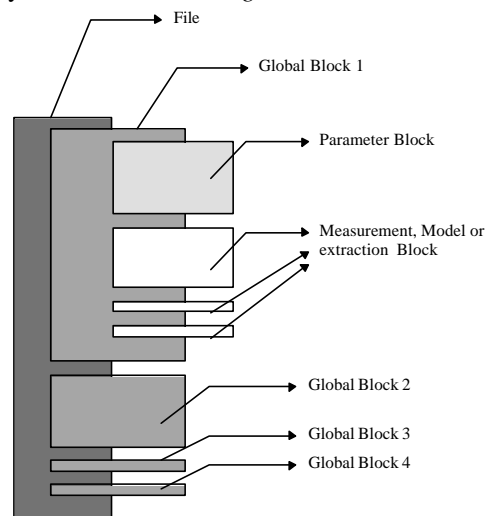


Figure A.2: The high level structure of an ODIF file

Since a *global block* is describing a device and measurement/modelling results it will contain a section (*block*) describing the parameters of that device : the *parameter block*. Following that section, multiple sections for results of measurements, modelling or extraction experiments are possible.

In Figure A.2, a schematic of the ODIF file on the highest level is shown. It should be noted that the figure shows a more complex example and that most ODIF files will consist of only one *global block* which contains a *parameter block* and one *measurement/model/extraction block*.

A.3.4 The parameter block

The *parameter block* is meant for storing information about the device parameters as the name indicates. Device parameters are typically “data” and will be stored directly in the *parameter block* which can not contain other blocks.

Data can take two forms : simple numbers (with indication of name and unit for each one) or more complex tables of numbers (with indication of name and unit for each column). Both can be stored in a parameter block, but only one at a time. When the need exists to combine both, two consecutive parameter blocks should be used. Some examples of valid and invalid *parameter blocks* are shown in Figures A.3 to A.5.

<pre>@parameter.begin <waveguide> L 300 um W 10 um @parameter.end</pre>	<pre>@parameter.begin <loss> wav int_loss nm cm^-1 1550 2 1551 2.1 1552 2 @parameter.end</pre>
--	---

Figure A.3: Two correct *parameter blocks*.

 <pre>@parameter.begin<waveguide&loss> L 300 um W 10 um wav int_loss nm cm^-1 1550 2 1551 2.1 1552 2 @parameter.end</pre> 	<pre>@parameter.begin <waveguide> L 300 um W 10 um @parameter.end @parameter.begin <loss> @data.begin loss<int_loss> wav int_loss nm cm^-1 1550 2 1551 2.1 1552 2 @data.end</pre>
---	---

Figure A.4: An incorrect *parameter block* containing both line and table information.

Figure A.5 : The correct version of Figure A.4, using two separate *parameter blocks*.

A.3.5 The measurement, model and extraction block

In an abstract approach, data originating from a measurement, data calculated by a model or data obtained by parameter extraction methods can be treated in a similar fashion. For this reason, the three blocks associated with these data have a similar internal structure and differ only by the keywords which indicate the kind of the data inside.

As all blocks, the measurement, model and extraction blocks have keywords which indicate the beginning and the end of the block. (respectively : “@measurement.begin”, “@model.begin”, “@extraction.begin” and “@measurement.end”, “@model.end”, “@extraction.end”). The blocks can again consist of a number of *setting blocks* and *data blocks*.

The purpose of the *setting block* is to store the information about how the data were obtained e.g. the settings of the measurement equipment (current sources, power meters, ...), the calculation parameters (step size, number of iterations, ...) or the method used for extraction (fitted using downhill simplex algorithms with minimax cost function, ...).

Following the *setting blocks*, the data itself can be stored in *data blocks*, which either can contain a number of single lines or a table with data. As it was the case with the *parameter block*, it is one or the other and no combinations (lines and data) are possible; if there is a need to store both, two *data blocks* should be used.

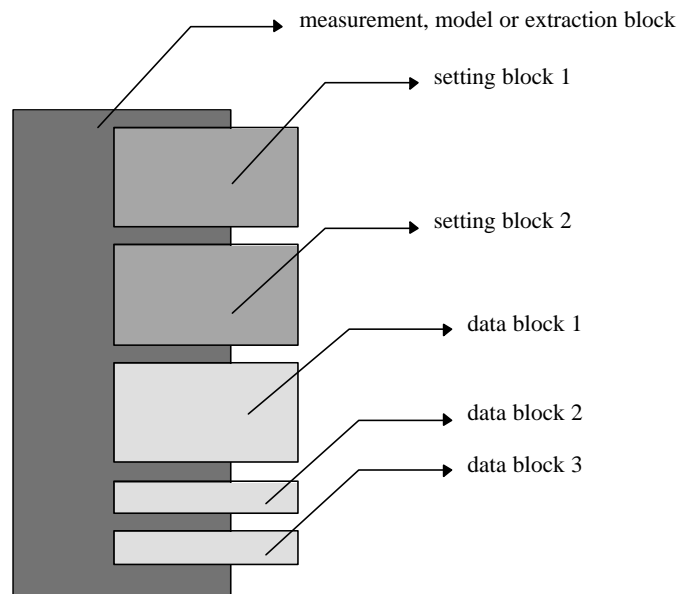


Figure A.6: Structure of a measurement, model or extraction block.

A.3.6 The setting block

The *setting block*, designed for storing the information which explains how the results are obtained, stores that information using lines. In general tables are never used to store “setting” information and therefore tables are not allowed in a *setting block*.

Information about instrument or software settings, is probably the least general information stored in a file, e.g. similar instruments (like optical spectrum analysers) still have a largely different set of control parameters. For this reason, the name reference of the *setting block* has been extended with an obligatory “labname”. This ensures that the interpretation of the numbers inside the *setting block* can always be related to the person, software or standard that defined the content of the block. The “labname” is written between square brackets (“[” and “]”) to distinguish it from regular reference names (denoted between “<” and “>”).

```
@setting.begin [OLIMPEX] <HP90751>
RBW      5      nm
SPAN     100    nm
@setting.end
```

Figure A.7: Example of a valid *setting block*.

A.3.7 The data block

The *data block* can be considered as the main part of an ODIF file; after all, the whole purpose is to store data in a file. As it was the case with parameters, data normally come in two ways : either single

numbers or a tabular format. Similar to the case of the *parameter block*, a *data block* can contain one or the other and if both are required two *data blocks* need to be used.

Since tabular data are mainly used for graphing purposes, the syntax states that tables have to consist of two lines (one for the name of the column and one with the unit) followed by numbers only. Although it is not possible to impose the “rectangular” restriction using the syntactical notation by N. Wirth, ODIF does impose the restriction that all tables need to be rectangular i.e. all rows must have the same number of columns. In case the numbers are not available for parts of the table (e.g. due to the impossibility of measuring linewidth below the threshold of a laser) the value “NaN” (“Not a Number”) should be used.

```
@DATA.BEGIN LI<laser_1>
I          Power
mA         mW
0.0        0.001
1.0        0.013
2.0        0.159
3.0        0.957
4.0        1.568
@DATA.END
```

```
@DATA.BEGIN LI<laser_1>
peak_wav  1550  nm
@DATA.END
```

Figure A.8: Two correct *data blocks*.

```
@DATA.BEGIN LI_WAV<laser_1>
peak_wav  1550  nm
I          Power
mA         mW
0.0        0.001
1.0        0.013
2.0        0.159
3.0        0.957
4.0        1.568
@DATA.END
```

Figure A.9: An incorrect *data block* containing both line and table information.

```
@DATA.BEGIN LI<laser_1>
I          Power
mA         mW
0.0        0.001
1.0        0.013
2.0        0.159
3.0        0.957
4.0        1.568
@DATA.END
@DATA.BEGIN WAV<laser_1>
peak_wav  1550  nm
@DATA.END
```

Figure A.10: The correct version of Figure A.9, using two separate *data blocks*.

```
@DATA.BEGIN LI_LNW<laser_1>
I          Power  LNw
mA         mW     MHz
0.0        0.001
1.0        0.013
2.0        0.159
3.0        0.957
4.0        1.568  5.6
5.0        2.315  4.4
6.0        3.687  2.3
7.0        5.012  1.7
@DATA.END
```

Figure A.11: An incorrect *data block*, the missing numbers where linewidth could not be measured create a

```
@DATA.BEGIN LI_LNW<laser_1>
I          Power  LNw
mA         mW     MHz
0.0        0.001  NaN
1.0        0.013  NaN
2.0        0.159  NaN
3.0        0.957  NaN
4.0        1.568  5.6
5.0        2.315  4.4
6.0        3.687  2.3
7.0        5.012  1.7
@DATA.END
```

Figure A.12: The correct version of Figure A.10, the non existing measurement results are indicated with the

non rectangular table.

value “NaN” which stands for “Not a Number”.

A.3.8 Rules for comments

Comments in ODIF files are quite similar to C++ style comments, both the “block style” comment (between “/*” and “*/”) as well as the “line style” comment (all text after “//”) exist. However they are not identical in usage : contrary to the C++ way where comments are disregarded and therefore can appear almost everywhere in the text, the comments in an ODIF file can only appear on very specific locations.

The formal syntax notation is very clear on these locations, but as a rule of thumb it can be stated that :

*“comments are allowed after every line of ODIF syntactical text, **except** in tables”*

The latter to ensure compatibility with spreadsheet applications.

A.3.9 Advanced aspects of ODIF syntax

As is the case with programming languages, there are extra features in ODIF besides the general structure. By providing features like inclusion and recursion, the ODIF syntax is more powerful and provides sufficient flexibility to the future.

Inclusion allows to use and reference files, without having to copy the contents each time. This example can be very useful for default settings or extractions based on many measurements. The rule for includes is the following :

“Each block on its own and only entire blocks can be included”

Recursion is provided on the block level : each block can contain an infinite number of the same kind. This is especially useful in the case of a *setting block*. When a program is using another to do the measurement, it “encapsulates” the latter. This property is duplicated in the setting block structure using recursion (cf. the example in section A.4).

A.4 Example of a realistic ODIF file

In this section a complete example of a realistic ODIF file is shown and analysed into its components. It should be noted that this example illustrates most facets of ODIF files, yet it can not be seen as a template showing how all ODIF files should look like. Information on how to adapt a specific file format problem to ODIF syntactical rules, is given in the next section (section A.5).

In order to make the example more comprehensive, Figure A.13 gives a schematic overview of the structure of the file and the positions of all the blocks used in the example.

The first part of the data, which describes the device that has been measured, is stored in the *parameter block*, inside the *global block*. Following the device specification, there is a *measurement block* with the actual measurement data, in turn followed by an *extraction block* which contains the results of the performed parameter extraction (loss calculation in this case). Inside the *measurement block*, there are a number of *setting blocks* followed by a *data block*. These are respectively describing the measurement conditions, the equipment and the actual results.

The *extraction block* contains a *setting block* describing the extra inputs needed to make the extraction possible, followed by a number of *data blocks* containing the results of the extraction.

In order to keep the example compact in this text, only a few data points are shown (the original file counts over 500 points).

```

@file.title : rib waveguide loss
@global.begin <Fpgain_OLIMPEX_Data_file>
  @parameter.begin
  @parameter.end
  @measurement.begin
    @setting.begin [OLIMPEX] <CONDITION_OPX>
    @setting.end
    @setting.begin [OLIMPEX] <Fpgain_P_Wav>
      @setting.begin [OLIMPEX] <HP8168>
      @setting.end
      @setting.end
      @setting.end
    @setting.end
    @data.begin OS <R43.2a>
    @data.end
  @measurement.end
  @Extraction.begin <Fpgain_Extr>
    @setting.begin [OLIMPEX] <Fpgain_Extr>
    @setting.end
    @data.begin CALC <Peaks>
    @data.end
    @data.begin CALC <Valleys>
    @data.end
    @data.begin CALC <Gain_Loss>
    @data.end
    @data.begin CALC <Average>
    @data.end
    @data.begin CALC <Group_Index>
    @data.end
  @Extraction.end
@global.end
@File.end

```

Figure A.13: Schematic overview of the file structure.


```

@File.Title : rib waveguide loss
// FPgain Olimpex Data File $Ver: 1.0
@Global.Begin <Fpgain_Olimpex_Data_File>
@Parameter.Begin <DEVICE_OPX>
    type                waveguide        -
    ID                  R34.2a           -
    L                   5.00000000E-1    mm
    R_left              3.20000000E+1    %
    R_right             3.20000000E+1    %
@Parameter.End
@Measurement.Begin
@Setting.Begin [OLIMPEX] <CONDITION_OPX>
    temp                25.00            deg C
    tunable_laser       HP8168           -
    power_meter         AQ2105_1A        -
    application         FPgain_P_Wav     -
@Setting.End //CONDITION_OPX
@Setting.Begin [OLIMPEX] <FPgain_P_Wav>
@Setting.Begin [OLIMPEX] <HP8168>
    Source              MEAS              WAV <FTLS>
    // FTLS             $Ver: 1.0
    Instrument          HP8168           -
    Name                none            -
    Power               2.000            mW
    Start_Wav          1550.000          nm
    Stop_Wav           1551.000          nm
    Wav_Inc            0.001            nm
@Setting.End
@Setting.Begin [OLIMPEX] <AQ2105_1A>
    Source              MEAS              OP <FOPM>
    // FOPM             $Ver: 1.0
    Power_Meter         1                 enum //AQ2105_1A
    power_units         1                 enum //mW
    Wavelength          1550              nm
    Light_Mode          0                 enum //CW
    Corr_Value          1.0000E+0         -
    Corr_Value_unit     1                 enum //---
    Average             1                 -
@Setting.End
@Setting.Begin [OLIMPEX] <Data_Specs>
    //                  $Ver: 1.0
    Operator            No_operator_selected -
    Labname             0                 enum //INTEC
    Number_Notation     1                 enum //Exponential
    Precision           8                 -
    Temp_Units          1                 enum //deg C
@Setting.End //Data_Specs
@Setting.End //FPgain_P_Wav
@Data.Begin OS <R34.2a>
    Wav                 P_out
    nm                  dBm
    1.54273900E+3      -7.41000000E+1
    1.54278000E+3      -7.33200000E+1
@Data.End //R34.2a
@Measurement.End

```

Figure A.14: First part of the ODIF example file.

```

@Extraction.Begin <FPgain_Extra>
@Setting.Begin [OLIMPEX] <FPgain_Extra>
    L                5.00000000E-1    mm
    R_left           3.20000000E+1    %
    R_right          3.20000000E+1    %
@Setting.End
@Data.Begin CALC <Peaks>
    Wav              P_peak
    nm               dBm
    1.54293852E+3    -6.88180255E+1
    1.54348402E+3    -6.91819083E+1
@Data.End
@Data.Begin CALC <Valleys>
    Wav              P_valley
    nm               dBm
    1.54325013E+3    -7.47994704E+1
    1.54379930E+3    -7.49567065E+1
@Data.End
@Data.Begin CALC <Gain_Loss>
    Wav              Gain
    nm               1/cm
    1.54309433E+3    6.95776054E-1
    1.54336707E+3    -4.70907270E-1
@Data.End
@Data.Begin CALC <Average>
    Avg_Gain         1.60992509E+0    1/cm
@Data.End
@Data.Begin CALC <Group_Index>
    Wav              Group_Index
    nm               -
    1.54321127E+3    4.36572404E+0
    1.54352471E+3    4.33829148E+0
@Data.End
@Extraction.End
@Global.End
@File.End

```

Figure A.15: Second part of the ODIF example file.

A.5 How to build ODIF files

A.5.1 Introduction

When applying the ODIF syntax to specific data storage problems, one should always keep in mind that ODIF is designed as a file interchange format with enormous flexibility and possibilities for implementing very complex structures. However, although it is possible to realise these complex structures, ODIF can still implement simple things without adding a large overhead. E.g. omitting the

information in the *setting blocks* and leaving out all reference to the origin of the numbers can provide a far less complex looking ODIF file which consists almost purely of data itself.

A.5.2 The minimal ODIF file for storing one number

In order to save one measurement result only, a measurement block is needed, containing a data block with one entry line. Putting this a measurement block into an ODIF file requires, a *global block* and a *file block*. So the resulting file should look like this

```
@File.Title : one measurement
@global.begin
@measurement.begin
@data.begin POWER<single>
power 10      mW
@data.end
@measurement.end
@global.end
@file.end
```

Figure A.16: Minimal ODIF file example.

A.5.3 The minimal ODIF file for storing one table of numbers

This is an identical problem as the one in the previous point, with as only difference the fact that the data block will now contain a table instead of an entry line. The file should look like this :

```
@File.Title : PI measurement
@global.begin
@meas.begin
@data.begin PI<sweep>
I          P
mA         mW
0          0
1          0.001
2          0.002
3          0.003
@data.end
@meas.end
@global.end
@file.end
```

Figure A.17: Minimal ODIF file example for a table.

A.5.4 Multiple results

Although ODIF can put multiple results of different nature (or even on different devices) into one file, it is not an obligation. The user can still create a new file for each measurement, modelling or extraction result that needs to be saved. It is up to the user of ODIF to decide how big the file may get.

A.5.5 The creative process of making an ODIF file

A.5.5.1 The problem

Suppose one wants to put the following into the ODIF format :

1. One file for each measurement (simplest case).
2. Each measurement has defined conditions
3. Each measurement consists of a number of results (e.g. power vs. wavelength).

A.5.5.2 Basic form of the ODIF file

Since the data come in a tabular form (power vs. wavelength) and it will be one measurement result only, a file containing a *measurement block* is needed. As explained in section 5.3, this implies that we need to add a *global block* and a *file title*.

The base of the file will be :

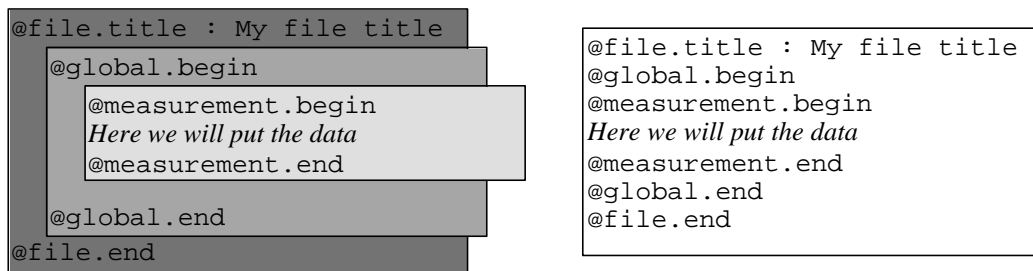


Figure A.18: Base structure and file contents of the ODIF file.

A.5.5.3 Dividing the information

When the base is laid out, one can start thinking about the nature of the actual information that needs to be stored in the ODIF file. In this case (as in most cases) this information can be split into two categories :

1. Settings or stuff you need to specify when you do the measurement
2. The actual measurement results, the table of power versus wavelength

This translates directly into ODIF syntax elements :

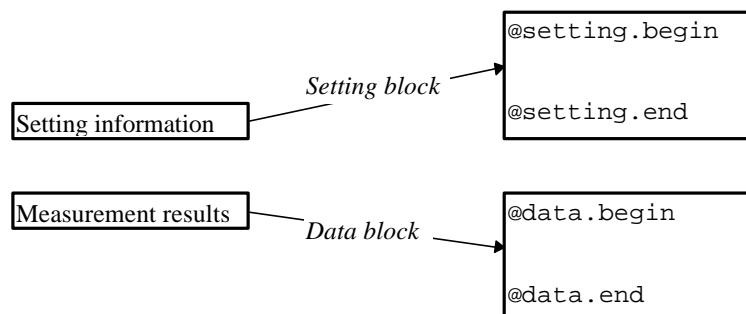


Figure A.19: Mapping information to syntax elements.

So the ODIF file looks now like this :

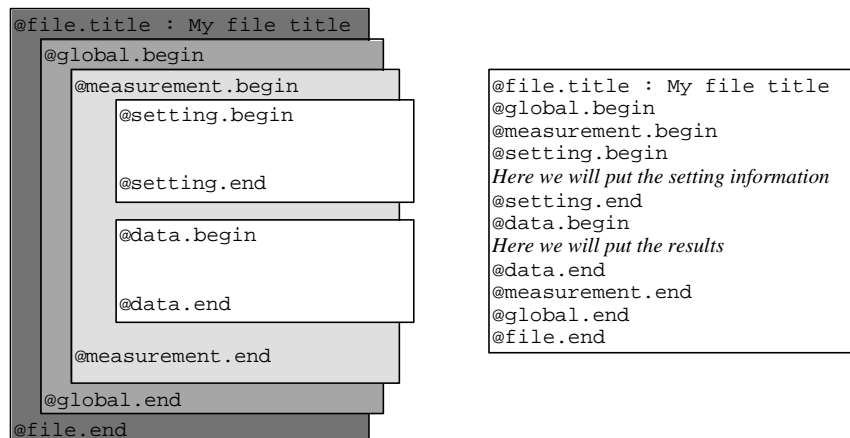


Figure A.20: Schematic and textual overview of a high level ODIF file.

A.5.5.4 The syntactical details of each block

Once the detailed structure of the ODIF file is available, one has to check the formal syntax in order to be able to write the correct strings into the file. In this example only the more complicated rules for the setting block and the data block will be treated in detail. The other blocks (measurement, global and file block) can be treated in the same fashion.

A.5.5.4.1 The setting block

The syntactical definition of a *setting block* is :

```

Setting_Block =   Setting_Begin LabName Reference_name NewLine
                  {Setting_Line | Source_Line | Comment}
                  Setting_End   ( Comment | NewLine )

```

These refer to the following syntax elements :

```

Setting_Begin   = "@" Setting_key "." Begin_key
Reference_name = "<" Name ">"
LabName        = "[" Name "]"
Setting_End     = "@" Setting_key "." End_key

```

Which in turn refer to the following terminal symbols

```

Setting_key    = "Set" | "Setting"
Begin_key      = "B"   | "Begin"
End_key        = "E"   | "End"

```

The first line (opening line of the *setting block*) specifies that the corresponding line in the file should look like :

```
@set.begin [ XXXXXXX ] < YYYYYYYY >
```

where the "XXXXXX" stand for the name of your lab or the authority responsible for the content definition (e.g MyLab or OLIMPEX). "YYYYYYY" is the particular reference name of this setting block, i.e. the name on which one will be able to search for the data in the future.

Since reference names of institutions, measurement or equipment is part of the content of a file and not of a file format, they are not specified in the syntax. This is a similar situation with

programming languages : although the syntax of the C or PASCAL programming language is well defined, they do not specify which variable names should be used.

A.5.5.4.2 The data block

The syntactical definition of a *data block* is :

```
Data_Block      = Data_Begin Data_ID NewLine
                  { Comment }
                  ( Table | { Entry_Line } )
                  Data_End ( Comment | NewLine )
```

These refer to the following syntax elements [1] :

```
Data_ID          = Data_enum Reference_name
Reference_name = "<" Name ">"
Data_enum      = "PI" | "RIN" | "OS" | "LNW" | "PARAM" | "CALC".....
Data_Begin    = "@" Data_key ":" Begin_key
Data_End      = "@" Data_key ":" End_key
```

Which in turn refer to the following terminal symbols:

```
Data_key       = "Dat" | "Data"
Begin_key     = "B" | "Begin"
End_key       = "E" | "End"
```

The first line (opening line of the *data block*) specifies that the corresponding line in the file should look like :

```
@data.begin XXXXXX < YYYYYYYY >
```

where the "YYYYYYY" stands for the referencing name (E.g. "device1") as in the setting block case and the "XXXXXX" stands for the data enum. The latter is designed to be an identifier common to all similar data, a special name. Although ODIF does not provide a complete list of possible identifiers, it is recommended to use a limited list

A.5.5.4.3 The ODIF file with syntactical details

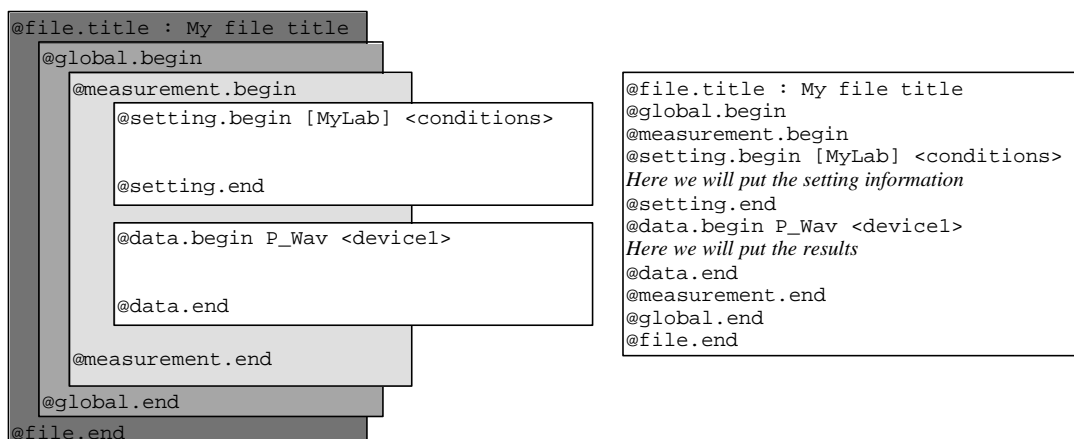


Figure A.21: Schematic and textual overview of a high level ODIF file with correct syntax.

A.5.5.5 Putting in the data : settings and results

According to the syntactical definition (cf. 5.5.4.2) settings can be written using multiple *setting lines* or *source lines*. The first to be used to store information, the latter to be used to store a reference to the origin of the data (in case this is wanted).

The syntax specifies [2]:

Setting_Line = Entry_Line | Hex_Block

Entry_Line =

Name <TAB> (Number | Plain_Text)<TAB> Unit ([<TAB> CommentLine] | NewLine)

Source_Line = Source_key <TAB> Source_type <TAB> Source_Names NewLine

Source_Names = Data_ID { <TAB> Data_ID }

Since the *Hex block* is meant for storing binary data and since our example is numbers only, we can focus on the *entry line* and disregard the *hex block* option as well as the *source line* (no reference needed). As previously indicated, the name itself is not specified by the syntax and should be chosen wisely. In our case we want to store the temperature and the resolution bandwidth of the measurement, so the two resulting lines could look like :

```
temp    20    degC
RBW     0.1   nm
```

Each item separated by tab-characters

As for the data which come in a tabular form the syntactical rule states [3-4]:

Table = Column_Name_Line

Column_Unit_Line

{Data_Point_Line }

Column_Name_Line = Name { <TAB> Name } <NL>

Column_Unit_Line = Unit { <TAB> Unit } <NL>

Data_Point_Line = Number { <TAB> Number } <NL>

This means that we have to specify a name and unit for each column. Since the measurement results are power versus wavelength, the names “Pwr” and “lambda” with respective units “mW” and “nm” can be a logical choice.

A.5.5.6 The ODIF file : end result

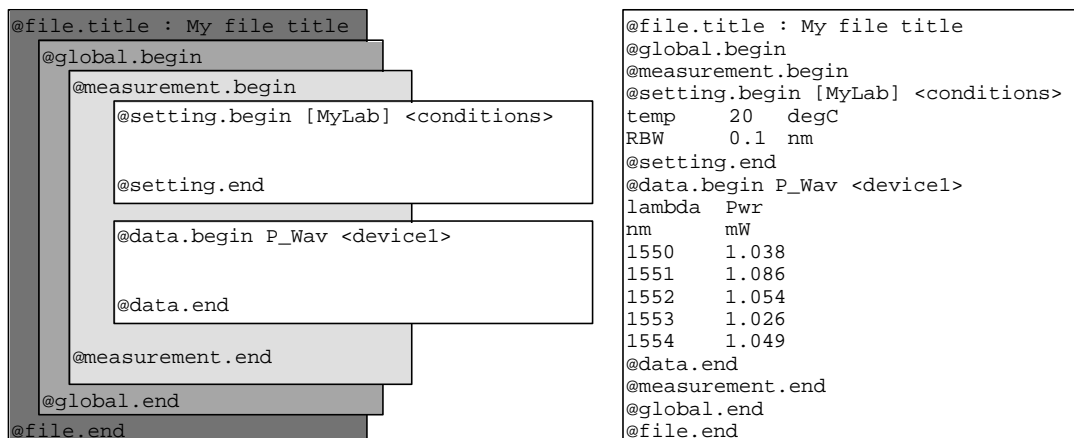


Figure A.22: Structure and contents of the complete ODIF file.

A.6 Introduction to syntax notation according to N. Wirth

The syntax is written down using a meta-language, which describes the total format from a top-down hierarchical approach. This notation method was first proposed by N. Wirth in 1977 [5] and treats syntax using a top down description. It first expresses the syntax in an abstract way using "non-terminals", i.e. words or symbols that will not appear as such in the file. These are then expanded in several levels, until the terminal level is reached, where the exact characters that appear in the file are specified.

In order to make a formal notation possible the following rules are used :

- Words written in bold are "non-terminal"-symbols (this means an abstract symbol).
- Tokens written between double quotes (e.g. "@Parameter") are "terminal symbols" : tokens that will appear literally (without adding any extra spaces) in the resulting file.
- If the syntax rule lets the user choose *exclusively* between two or more things, it will use the symbol : "|". E.g. the rule specifying : "a" | "b" | "c", indicates that a file containing "a" is correct according to the syntax, a file containing "b" also, but a file containing "ab" is not allowed.
- The square brackets "[" and "]" are used to denote the optional presence of something. e.g. ["a"] means that "" (empty string) and "a" are valid, but a repetition "aa" is not.
- The curly brackets "{" and "}" are used to denote infinite repetition (i.e. zero, one, two or more times). E.g. the rule specifying : {a}, means that files containing : "", "a", "aa", "aaa", "aaaa", etc. are correct.

A.7 The complete syntax description

```
File = File_Begin ":" Text NewLine
      {Global_Set}
      File_End
```

```
Global_Set = Global_Block | Global_Include | Comment
Parameter_Set = Parameter_Block | Parameter_Include | Comment
Model_Set = Model_Block | Model_Include | Comment
Measurement_Set = Measurement_Block | Measurement_Include | Comment
Extraction_Set = Extraction_Block | Extraction_Include | Comment
Setting_Set = Setting_Block | Setting_Include | Comment
Data_Set = Data_Block | Data_Include | Comment
```

```
Global_Block = Global_Begin [ Reference_name ] NewLine
               {Parameter_Set}
               {Model_Set | Measurement_Set | Extraction_Set}
               {Global_Set}
               Global_End ( Comment | NewLine )
```

```
Parameter_Block = Parameter_Begin [ Reference_name ] NewLine
                  ( {Setting_Line | Source_Line } | Data_Set )
                  {Parameter_Set}
                  Parameter_End ( Comment | NewLine )
```

```
Model_Block = Model_Begin [ Reference_name ] NewLine
               {Setting_Set}
               Data_Set}
               {Model_Set}
               Model_End ( Comment | NewLine )
```

```

Measurement_Block= Measurement_Begin [ Reference_name ] NewLine
                    { Setting_Set }
                    { Data_Set }
                    { Measurement_Set }
                    Measurement_End ( Comment | NewLine )

Extraction_Block = Extraction_Begin [ Reference_name ] NewLine
                    { Setting_Set }
                    { Data_Set }
                    { Extraction_Set }
                    Extraction_End ( Comment | NewLine )

Data_Block =       Data_Begin Data_ID NewLine
                    { Comment }
                    ( Table | { Entry_Line } )
                    Data_End ( Comment | NewLine )

Setting_Block =    Setting_Begin LabName Reference_name NewLine
                    { Setting_Line | Source_Line | Comment }
                    Setting_End ( Comment | NewLine )

Data_ID = Data_enum Reference_name

Reference_name = "<" Name ">"

LabName = "[" Name "]"

Source_Line = Source_key <TAB> Source_type <TAB> Source_Names NewLine

Source_Names = Data_ID { <TAB> Data_ID }

Setting_Line = Entry_Line | Hex_Block
Hex_Block = ":" Hex_digit { Hex_digit } ";" <NL>          ([6])
Entry_Line =
    Name <TAB> ( Number | Plain_Text ) <TAB> Unit ([ <TAB> CommentLine ] | NewLine )

Data_enum = "PI" | "RIN" | "OS" | "LNW" | "PARAM" | "CALC" ..... ([7])
Source_type = "MODL" | "MEAS" | "EXTR" | "PARAM"

Table = Column_Name_Line
        Column_Unit_Line
        { Data_Point_Line }

Column_Name_Line = Name { <TAB> Name } <NL>
Column_Unit_Line = Unit { <TAB> Unit } <NL>
Data_Point_Line = Number { <TAB> Number } <NL>

Comment = CommentBlock | CommentLine ([8])
CommentBlock = "/*" { Text | NewLine } "*/" NewLine
CommentLine = "///" TextLine

File_Begin = "@File_key".Title_key
File_End = "@File_key".End_key

Global_Begin = "@Global_key".Begin_key
Global_End = "@Global_key".End_key
Global_Include = "@Global_key".Include_key FileName NewLine

```

Parameter_Begin = "@Parameter_key".Begin_key
Parameter_End = "@Parameter_key".End_key
Parameter_Include = "@Parameter_key".Include_key FileName NewLine

Model_Begin = "@Model_key".Begin_key
Model_End = "@Model_key".End_key
Model_Include = "@Model_key".Include_key FileName NewLine

Measurement_Begin = "@Measurement_key".Begin_key
Measurement_End = "@Measurement_key".End_key
Measurement_Include = "@Measurement_key".Include_key FileName NewLine

Extraction_Begin = "@Extraction_key".Begin_key
Extraction_End = "@Extraction_key".End_key
Extraction_Include = "@Extraction_key".Include_key FileName NewLine

Setting_Begin = "@Setting_key".Begin_key
Setting_End = "@Setting_key".End_key
Setting_Include = "@Setting_key".Include_key FileName NewLine

Data_Begin = "@Data_key".Begin_key
Data_End = "@Data_key".End_key
Data_Include = "@Data_key".Include_key FileName NewLine

File_key = "Fil" | "File" ([9])
Global_key = "Glo" | "Global"
Parameter_key = "Par" | "Param" | "Parameter"
Model_key = "Mod" | "Model"
Measurement_key = "Mea" | "Meas" | "Measurement"
Extraction_key = "Ext" | "Extr" | "Extraction"
Setting_key = "Set" | "Setting"
Data_key = "Dat" | "Data"

Title_key = "T" | "Title"
End_key = "E" | "End"
Begin_key = "B" | "Begin"
Include_key = "I" | "Include"

Source_key = "Source"

NewLine = <NL> { <NL> }

TextLine = [Text] NewLine

Text = {Plain_Text | <TAB>}

Plain_Text = {letter | digit | non_control_char }

Name = letter {letter | digit | "_" | "."} ([10])

letter = uppercase | lowercase

lowercase = "a" | "b" | "c" | "d" | "e" | "f" | "g" | "h" | "i" | "j" | "k" | "l" | "m" | "n" | "o" | "p" | "q" | "r" | "s" | "t" | "u" | "v" | "w" | "x" | "y" | "z"

uppercase = "A" | "B" | "C" | "D" | "E" | "F" | "G" | "H" | "I" | "J" | "K" | "L" | "M" | "N" | "O" | "P" | "Q" | "R" | "S" | "T" | "U" | "V" | "W" | "X" | "Y" | "Z"

non_control_char = "_" | "!" | "@" | "#" | "\$" | "%" | "^" | "&" | "*" | "(" | ")" | "=" | "" | "[]" | "<" | ">" | ";" | ":" | "/" | "?" | "~" | "," | "." | " " | sign ([11])

Unit = Number Unit_combination


```

Unit_combination = Simple_Unit { ("/" Simple_Unit) | Simple_Unit }
Simple_Unit = ( prefix Plain_Unit Real ) | (" Unit ")
prefix = "f" | "n" | "u" | "m" | "c" | "d" | "da" | "h" | "k" | "M" | "G" | "T"
Plain_Unit = "-" | "g" | "m" | "s" | "A" | "Hz" | "W" | "dB" | "deg" | "rad" | "C" | "%" | "YYMMDD" | .... ([12])

```

```

Number = ( [sign] (positive_real | positive_integer | "inf" ) ) | "NaN" ([13])
positive_real = positive_integer [fraction] [exponent]
fraction = "." positive_integer
exponent = ("e"|"E" ) integer
integer = [sign] positive_integer
positive_integer = digit { digit }
sign = "+" | "-"
Hex_digit = digit | "A" | "B" | "C" | "D" | "E" | "F" | "a" | "b" | "c" | "d" | "e" | "f"
digit = "0" | "1" | "2" | "3" | "4" | "5" | "6" | "7" | "8" | "9"

```

note on terminal symbols :

<NL> stands for one and only one NewLine ('\n' from C)

<TAB> stands for one and only one tab ('\t' from C)

References

- [1] **Data_enum** describes the type of the data, a complete list is available and can be extended when needed.
- [2] Remark: the Hex block is mainly introduced as an alternative way to write down (compressed) binary information. The actual interpretation of this binary information is up to the user.
- [3] Although the syntax doesn't describe it, a table has to have a rectangular form, which means that all rows must have equal number of columns (divided by the tabs).
- [4] Remark: <NL> means one and only one linefeed, this means that empty lines are not allowed in tables.
- [5] N. Wirth, "What can we do about the unnecessary diversity of notation for syntactic definitions ?", Communications of the ACM, vol. 20, 11 (1977).
- [6] Format of the binary data according to the INTEL-Hex standard.
- [7] **Source_type** describes how the original data has been obtained, a complete list is available and can be extended when needed.
- [8] Although they resemble to common C++ comment identifiers, the usage is only allowed at very strict locations through the file.
- [9] Not explicitly mentioned in the syntax, but keywords are case Insensitive.
- [10] Standard programming language convention.
- [11] Probably some chars will have to be eliminated.
- [12] Remark: space is NOT allowed for no unit, use "--" instead.
- [13] Classical numbers, extended with two special numbers: NaN (Not a Number) and infinity.

APPENDIX B

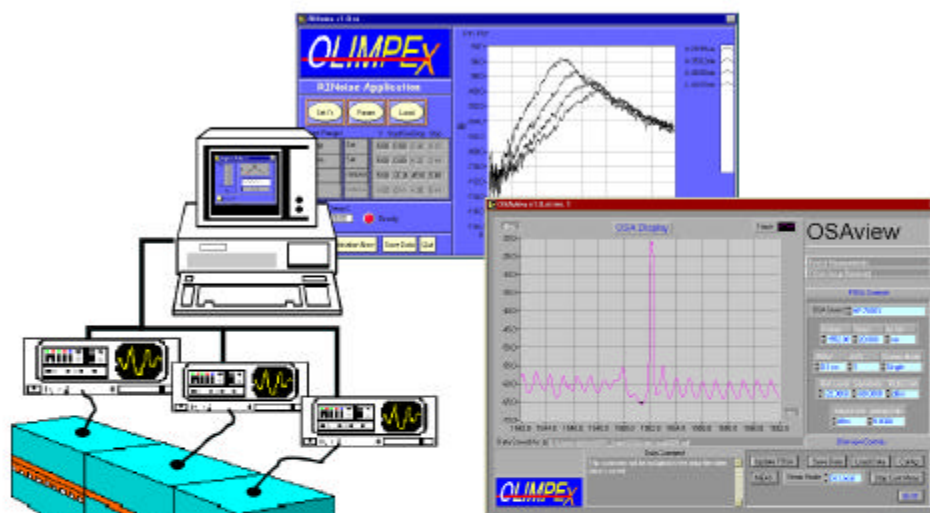
Introductie tot de meettoepassingen in het pakket “OLIMPEX”

Inleiding

De in dit werk beschreven principes en methodes gaven aanleiding tot een aantal geïmplementeerde toepassingen, die onder de algemene naam “OLIMPEX” verspreid werden in een aantal bedrijven en universiteiten in Europa, Canada en de VS. Deze appendix is een kopie van de eerste brochure die ter introductie werd verstuurd naar de verschillende partners van het Europese ACTS project BLISS (“*Broadband Lightwave Sources and Systems*” : AC065). Ze bevat een korte omschrijving van hetgeen OLIMPEX is, de technische vereisten en een opsomming van de verschillende geïmplementeerde toepassingen.

Naast deze informatie op papier is ook een meer recente en meer uitgebreide versie te vinden in appendix D (CD-ROM).

Voor de duidelijkheid dient opgemerkt te worden dat enkele toepassingen die in appendix B en D voorkomen geïmplementeerd werden door een andere partner uit het BLISS-project, met name University College Dublin (UCD).



Introductory guide to





© IMEC-Univ. of Gent, Univ. College of Dublin
 Distributed for evaluation to the partners of
 ACTS-BLISS (AC065)

CONTAINING OVERVIEW OF CURRENT SOFTWARE TOOLS

Authors : P. Verhoeve
 T. Farrell

P01 - IMEC
 P09 - UCD

Table of Contents

1. Introduction	205
1.1 What is  ?	205
1.2 Technical requirements for 	205
2. LIV	206
2.1 Description.....	206
2.2 Technical Details	207
3. RINoise	208
3.1 Description.....	208
3.2 Technical Details	209
4. Peak1	210
4.1 Description.....	210
4.2 Technical Details	211
5. RINFit	212
5.1 Description.....	212
5.2 Technical Details	213
6. IntLoss	214
6.1 Description.....	214
6.2 Technical Details	215
7. TempChar.....	216
7.1 Description.....	216
7.2 Technical Details	217
8. OSAview.....	218
8.1 Description :.....	218
8.2 Technical details :	219
9. FPgain	220
9.1 Description :.....	220
9.2 Technical details :	221
10. Tune4.....	222
10.1 Description :.....	222
10.2 Technical details :	223
11. ASEfit.....	224
11.1 Description :.....	224
11.2 Technical details :	225

About this document

This document describes the collection of tools for laser characterisation and parameter extraction within the OLIMPEX package.

A brief introduction is given to explain the OLIMPEX framework and the philosophy behind the approach toward measuring opto electronic devices. Following that, more detailed information (what it can measure), an image of the graphical user interface (front panel) and some technical information (which instruments are supported) will be given for each application.

1. Introduction

1.1 What is ?

OLIMPEX stands for **O**pto-electronic **I**ntegrated **M**easurements and **P**arameter **E**xtraction.

OLIMPEX is a collection of software tools for semi-automated laser characterisation which also performs parameter extraction from measurements taken.

OLIMPEX is an open structure (framework) in which different tools can cooperate and be integrated into larger control modules. All tools are elaborated into user-friendly and robust software, i.e. software in which measurements and parameter extraction can be done without a large amount of interaction from the user.

OLIMPEX is a software standard (design philosophy) which guarantees interoperability of all components (tools) and portability across different measurement set-ups. This means that all applications have a specific output file format, which in turn can be used as input file for other tools within the OLIMPEX package.

OLIMPEX is a flexible and portable solution. Instruments are represented in an abstract fashion making the applications less dependent on the physical instruments used. This ensures that the software can operate on many different measurement set-ups.

All applications described by this guide are to be considered OLIMPEX compatible, complying with the above aspects.

1.2 Technical requirements for

As with all software, the OLIMPEX package has technical requirements which make it possible to be used on a system. The software has been developed within the LabVIEW environment (which is not a part of OLIMPEX), for this reason the user must have a version of the **LabVIEW full development package version 4.0** or higher.

It has no extra computer hardware demands than those imposed by LabVIEW itself, although especially for the more advanced parameter extraction tools a high performance PC is advised.

Although LabVIEW code is portable across 7 platforms, the OLIMPEX code is not. It has been developed for the **Windows95** platform and parts of the code may work on other platforms but they are not supported at the moment.

All instrument drivers are based on the GPIB-bus communication method between the computer and the instrument.

2. LIV

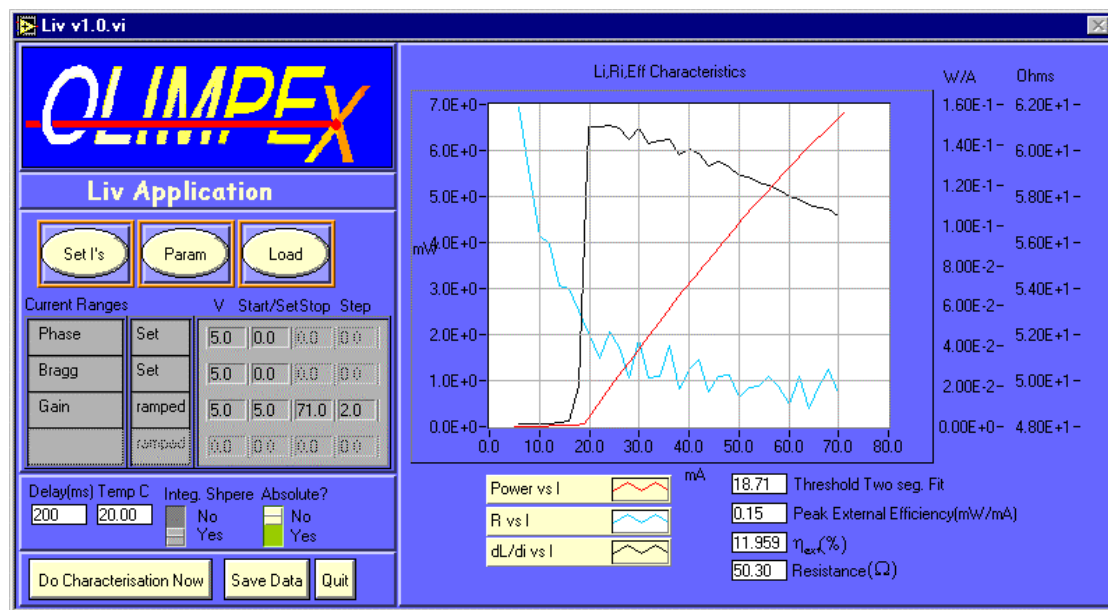
2.1 Description

This application performs a static light power vs. laser drive current measurement. It will also measure the voltage on the laser while the drive current is ramped.

The user can set the biasing conditions on up to three sections and an additional section is ramped using user defined values for the start, stop current as well as the current step.

The user can also specify the temperature (either using an installed temperature controller or entering the value for the temperature manually) so that measurements as a function of temperature can be made.

The application gives the threshold current, external efficiency and resistance of the laser as a function of drive current, which are calculated from the power and voltage measurements respectively. Diode resistance at high currents and peak efficiency is also given.



2.2 Technical Details

Originating Partner: P09-UCD

File Format:

Olimpex LIV File

Contains:

Table of laser drive current vs. light power and applied voltage, external efficiency, threshold, and resistance.

All information needed to repeat the measurement.

Instrument Driver Type: PID

Supported Instruments:

Current Sources:

ILX : LDX3207B, LDX3207C, LPD3811

Profile : LDC1002, LDC1005

HP : HP6625A

Optical Power Meters:

ANDO : AQ2105

Newport : 2832-C

Advantest : TQ8215

Multimeters :

Phillips : PM2525

Temperature Controllers:

ILX : LDT-5910B

Notes:

Threshold current is extracted from the intersection of the extrapolated curves below and above the turn on.

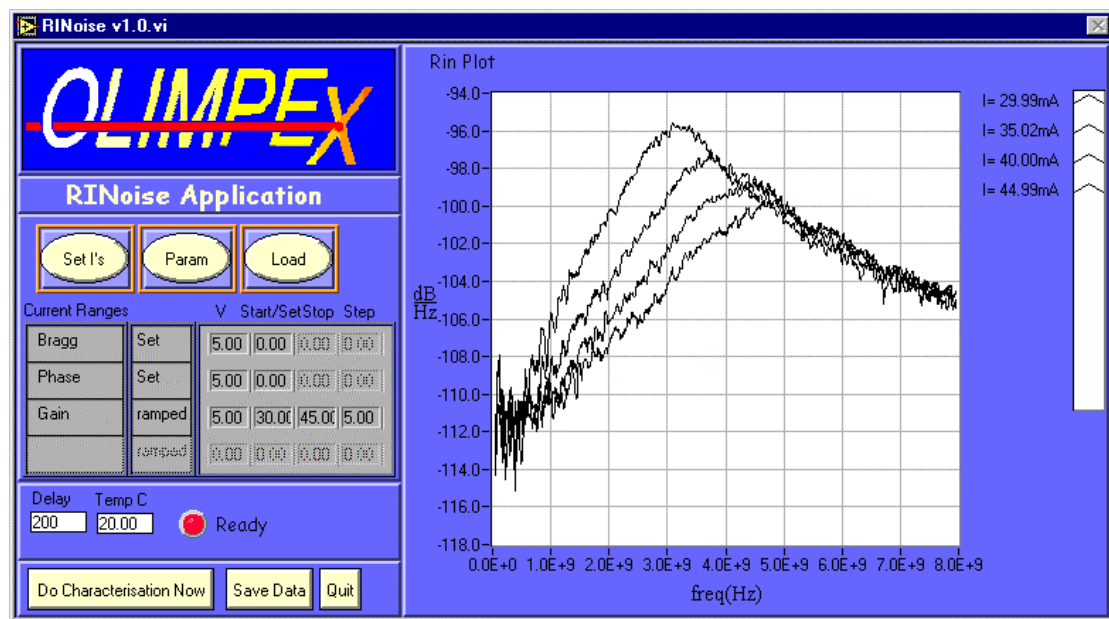
3. RINoise

3.1 Description

This application enables the measurement of the RIN (Relative Intensity Noise) of a laser.

The user can set the biasing conditions on up to four sections. Multiple RIN measurements can be made by specifying a value for the start and stop current as well as the current step.

The user can also control the temperature of the laser so that measurements as a function of temperature can be made.



3.2 Technical Details

Originating Partner : P09-UCD

File Format :

Instrument Driver Type : PID

Supported Instruments :

Current Sources:

ILX : LDX3207B, LDX3207C, LPD3811

Profile : LDC1002, LDC1005

HP : HP6625A

Lightwave - electrical spectrum Analysers :

HP: HP74100

Multimeters :

Phillips: PM2525

Temperature Controllers :

ILX: LDT-5910B

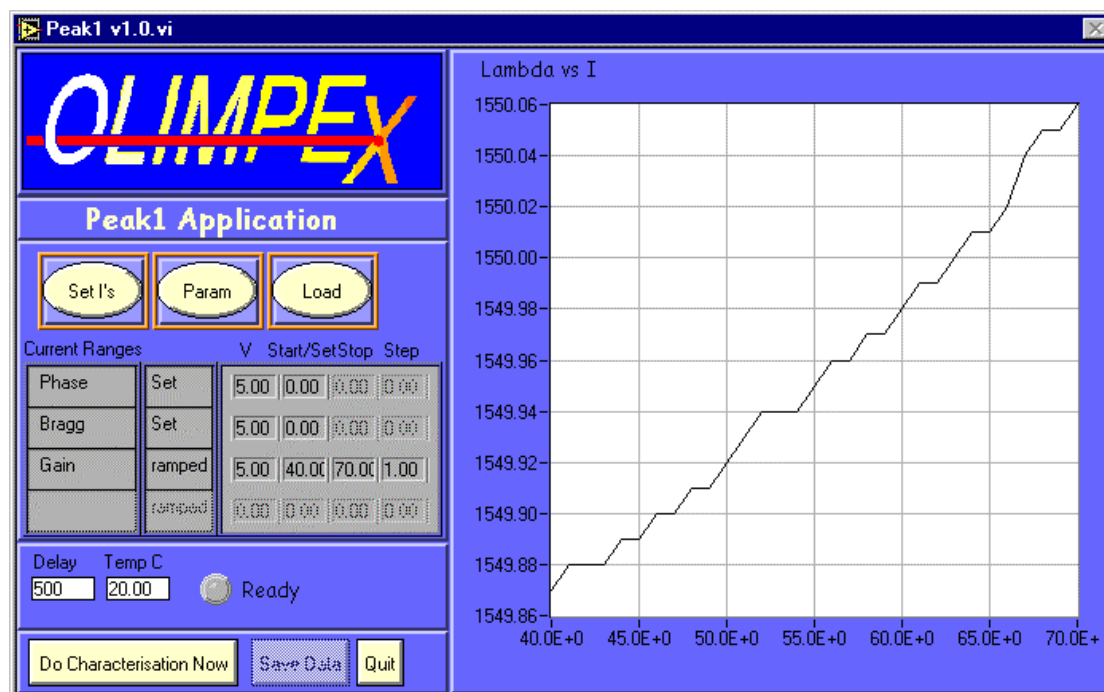
Notes :

4. Peak1

4.1 Description

This application enables the measurement of the peak wavelength of the laser while ramping one section. The wavelength is plotted against the ramped drive current.

The user can set the biasing conditions up to three sections and a fourth section is ramped with a user defined start, stop and step. The user can also specify the temperature (either using an installed temperature controller or entering the temperature manually) so these measurements can be made as a function of temperature.



4.2 Technical Details

Originating Partner : P09-UCD

File Format :

Instrument Driver Type : PID

Supported Instruments :

Current Sources:

ILX: LDX3207B, LDX3207C, LPD3811

Profile : LDC1002, LDC1005

HP: HP6625A

Wavelength Meters and Optical Spectrum Analysers :

ANDO: AQ-6310B

Advantest: TQ-8325

Multimeters :

Phillips: PM2525

Temperature Controllers :

ILX: LDT-5910B

Notes :

5. RINFit

5.1 Description

This application extracts parameters from the RINoise measured data. The user must find the Olimpex files from the RINoise application for the extraction. To do a full extraction additional parameters are needed. If the input parameters e.g. cavity length are not specified in the Olimpex files the user is prompted for them. If only some are known the application will extract all the parameters possible with the given set of user inputs.

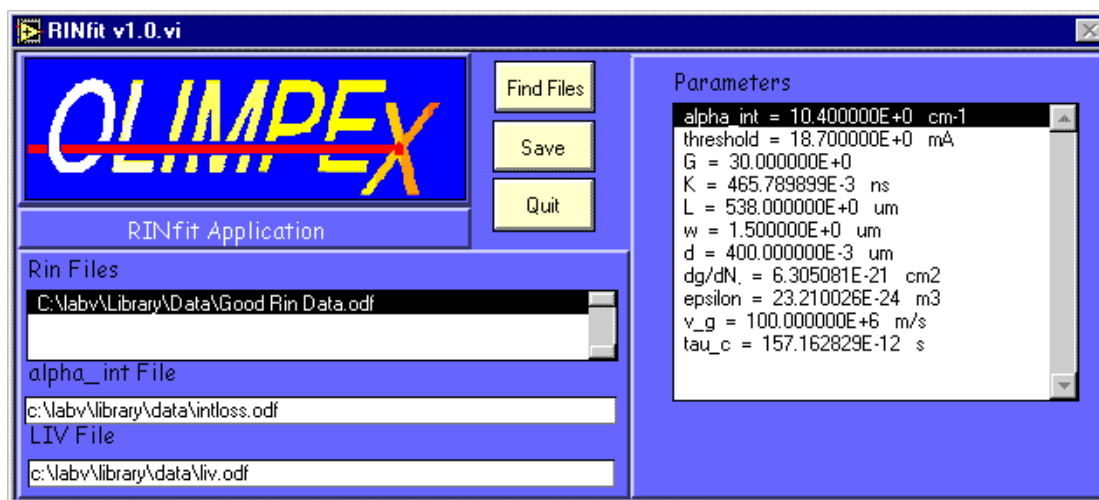
Inputs :

RIN Measurement Data (Power vs. Frequency)

α_{int} , I_{th} , G , L , w , d , v_g

Outputs :

damping ($\gamma(I)$), resonance frequency ($f_r(I)$) as function of current and derived parameters (K , dG/dN , ϵ , v_g , τ_c)



5.2 Technical Details

Originating Partner : P09-UCD

File Format :

Notes :

6. IntLoss

6.1 Description

This application extracts the internal loss of a Fabry Perot laser from a set of LIV measurement files. The LIV measurements must be made on lasers of the same type with different lengths. If the laser length is not specified in the LIV files the user is prompted for a value. To complete the extraction the refractive index or the reflection coefficient must be specified.

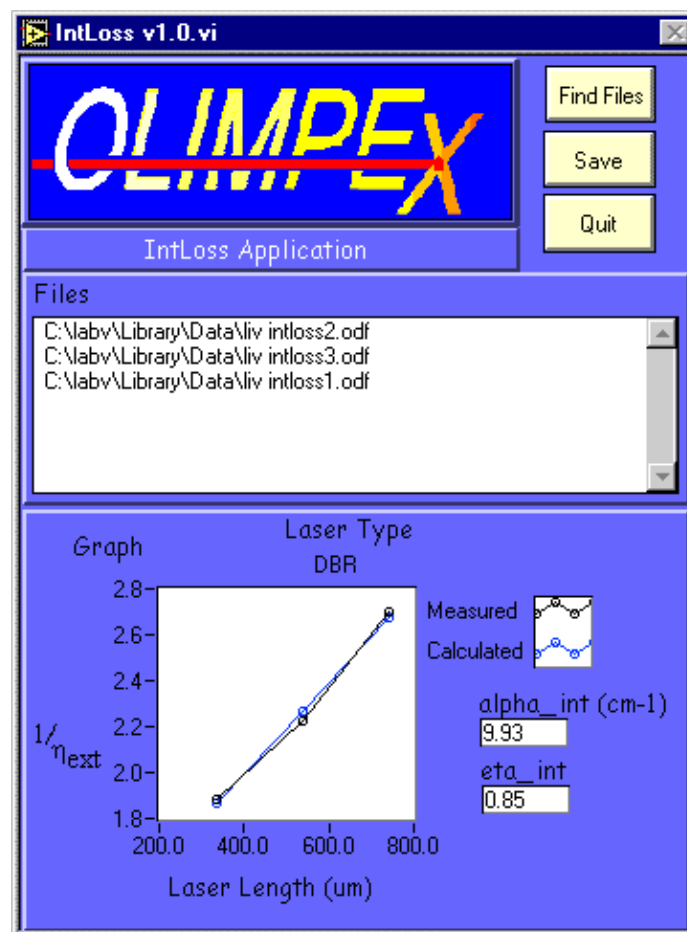
Inputs :

Multiple measurement files from the LIV application. These must be for FP lasers at different lengths. The application uses more specifically the external efficiency (η_{ext}) and the laser length.

The effective refractive index or the product of facet reflectivities is used. If the laser is AR coated the product of the facet reflectivities is used, otherwise the effective refractive index is used.

Outputs :

$\alpha_{\text{int}}, \eta_{\text{int}}$



6.2 Technical Details

Originating Partner : P09-UCD

File Format :

Notes :

7. TempChar

7.1 Description

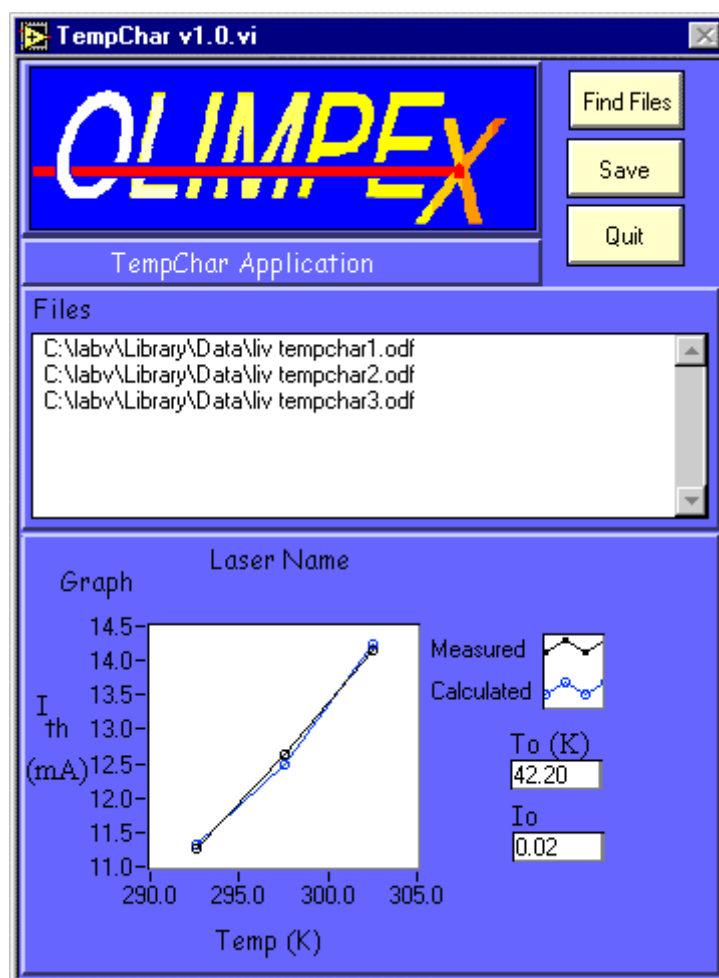
This application extracts the characteristic temperature of a laser from multiple LIV measurements as a function of temperature. The user must locate the Olimpex files generated by the LIV application where each file is a LIV measurement of the same laser at different temperatures.

Inputs :

Measurement files from the LIV application with same laser but different temperatures. The application uses more specifically the threshold current (I_{th}) and the temperature.

Outputs :

T_0



7.2 Technical Details

Originating Partner : P09-UCD

File Format :

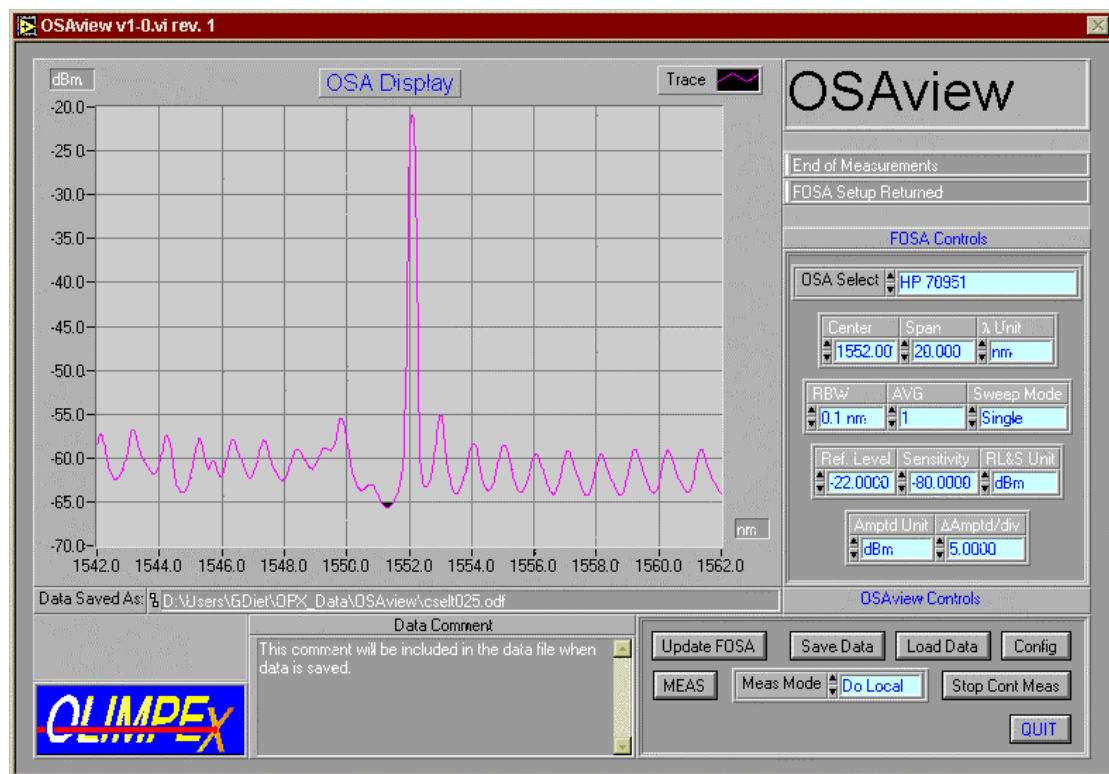
Notes :

8. OSAview

8.1 Description :

This application implements and mimics the functionality of an optical spectrum analyser on a computer. It allows the user to perform measurements of optical spectra on an interactive basis. As on regular optical spectrum analysers, the user can work in continuous or in single sweep mode while he can modify the settings for the measurement through the front panel on the computer.

The resulting optical spectrum can be saved to disk, together with all the information about the measurement settings. All this information can be loaded and viewed as well by the OSAview application.



8.2 Technical details :

Originating partner : P01 : IMEC

File format :

Instrument driver type : functional instrument

Supported instruments :

Optical spectrum analysers :

HP : HP-7095X

Advantest : Q8381A¹

Anritsu : MS9701B (*scheduled*)

ANDO : AQ-6310

Notes :

The application can be used for direct operation through the front panel, but it can also be used as a sub module for other applications (some specific measurement scenarios are available).

¹ Does not support the SMSR measurement

9. FPgain

9.1 Description :

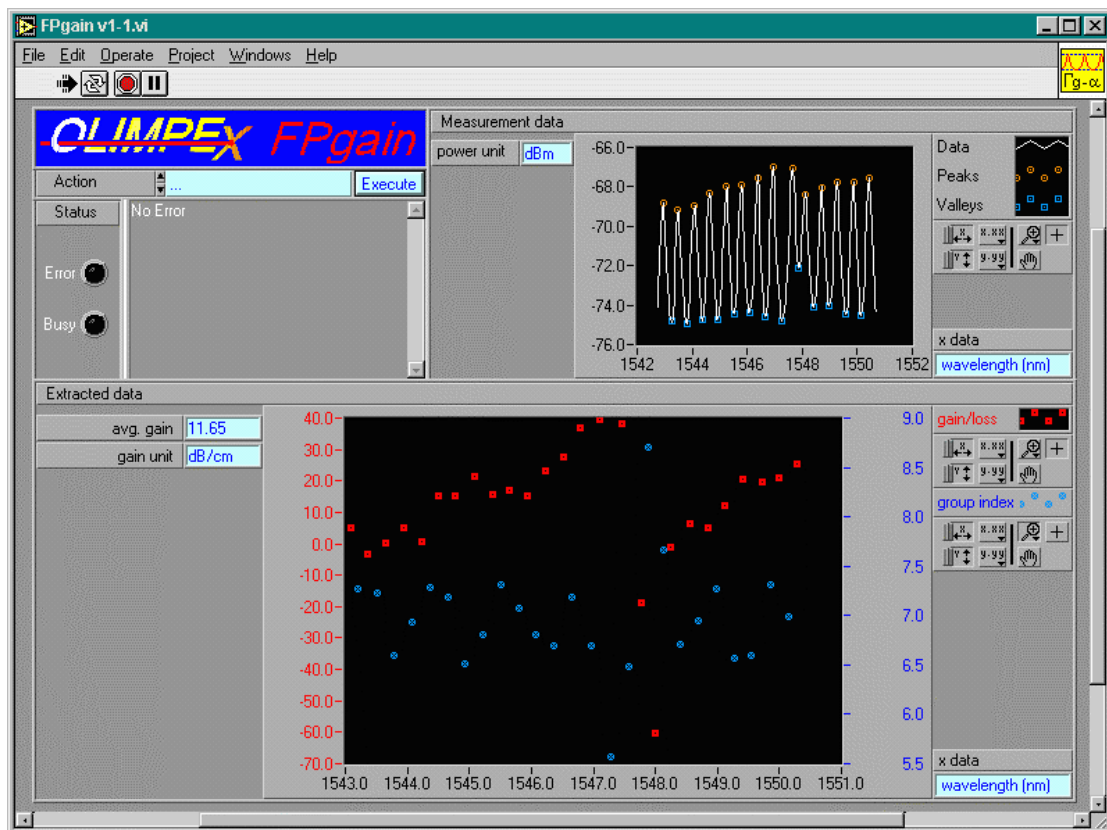
This application allows the user to calculate the gain/loss for an optical waveguide or laser based on a measured spectrum.

The user can also perform the necessary measurements through this tool :

In case of a laser, an optical spectrum is to be measured. This measurement can be selected on the front panel of the application which calls up OSAview, the optical spectrum analyser application for the measurement.

In the case of an optical waveguide, the measurement of the Fabry-Perot fringes needs to be done with the aid of a tuneable laser source, or by changing the temperature and thus changing the optical length of the cavity. Both measurements are available to the user through a menu selection on the front panel.

The gain/loss calculations are done using the method described by Hakki and Paoli. If the Fabry-Perot fringes are measured as function of wavelength, i.e. for a laser spectrum measured with OSAview or for a waveguide spectrum measured with the tuneable laser, also the group refractive index is extracted.



9.2 Technical details :

Originating partner : P01 - IMEC

File format :

Instrument driver type : functional instrument

Supported instruments :

Optical spectrum analysers :

HP : HP7095X

Advantest : Q8381A²

Anritsu : MS9701B (scheduled)

ANDO : 6310 (scheduled)

Tunable laser source :

HP6818

Notes :

² Does not support the SMSR measurement

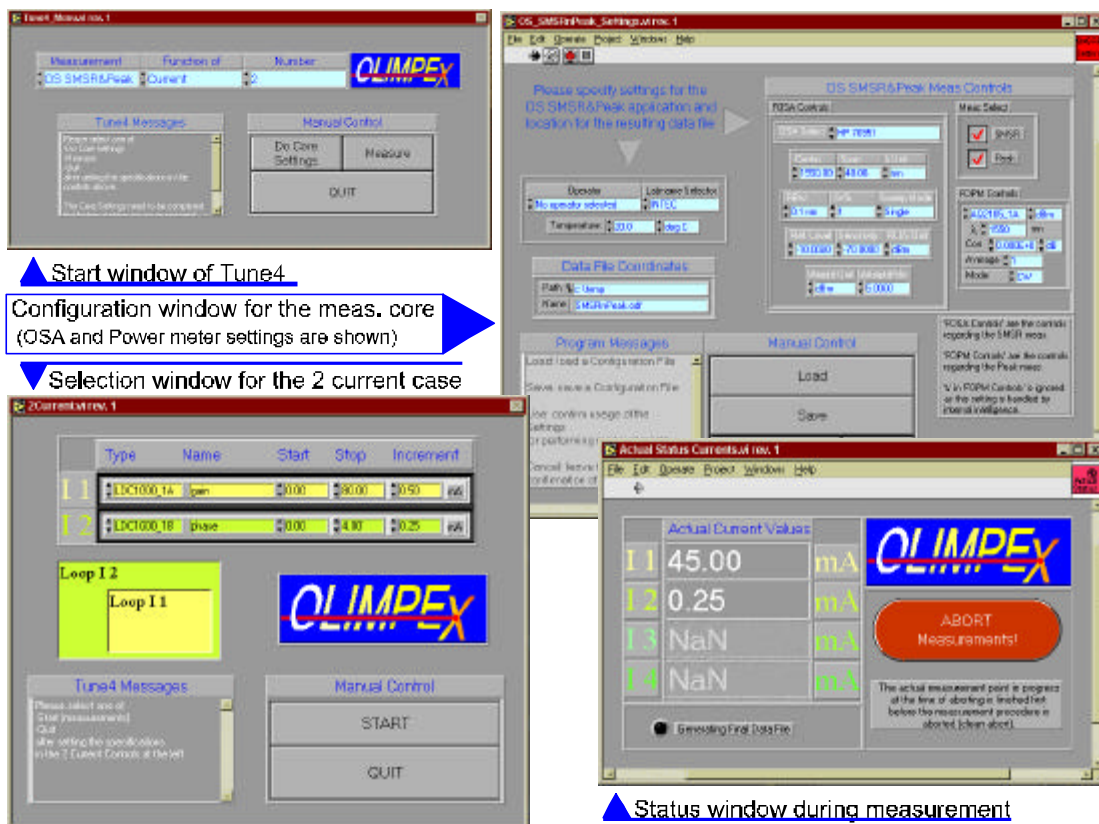
10. Tune4

10.1 Description :

This application allows the user to measure the static tuning characteristics of multi-section lasers (up to 4 sections can be controlled).

The application allows to measure peak wavelength, side mode suppression ratio (if the used optical spectrum analyser supports this function) and optical output power.

The application assumes the both the power and the optical spectrum can be measured at the same time, using a power splitter in the set up. The necessary calibration factors to correct the absolute power level can be entered into the program.



10.2 Technical details :

Originating partner : P01 - IMEC

File format :

Instrument driver type : functional instrument

Supported instruments :

Optical spectrum analysers :

HP : HP7095X
Advantest : Q8381A³
Anritsu : MS9701B (scheduled)
ANDO : AQ6310 (scheduled)

Optical power meters :

ANDO : AQ2105
Advantest : TQ8215
Newport : 2832-C
Profile : PDA1000

Current sources :

ILX : LDX3207B, LDX3207C, LPD3811
Profile : LDC1002, LDC1005, ITC1102

Notes :

³ Does not support the SMSR measurement

11. ASEfit

11.1 Description :

This application allows the user to fit a model of the ASE spectrum of a single section DFB laser to a measured spectrum. The spectrum can be loaded from an OLIMPEX file, as generated by OSAview.

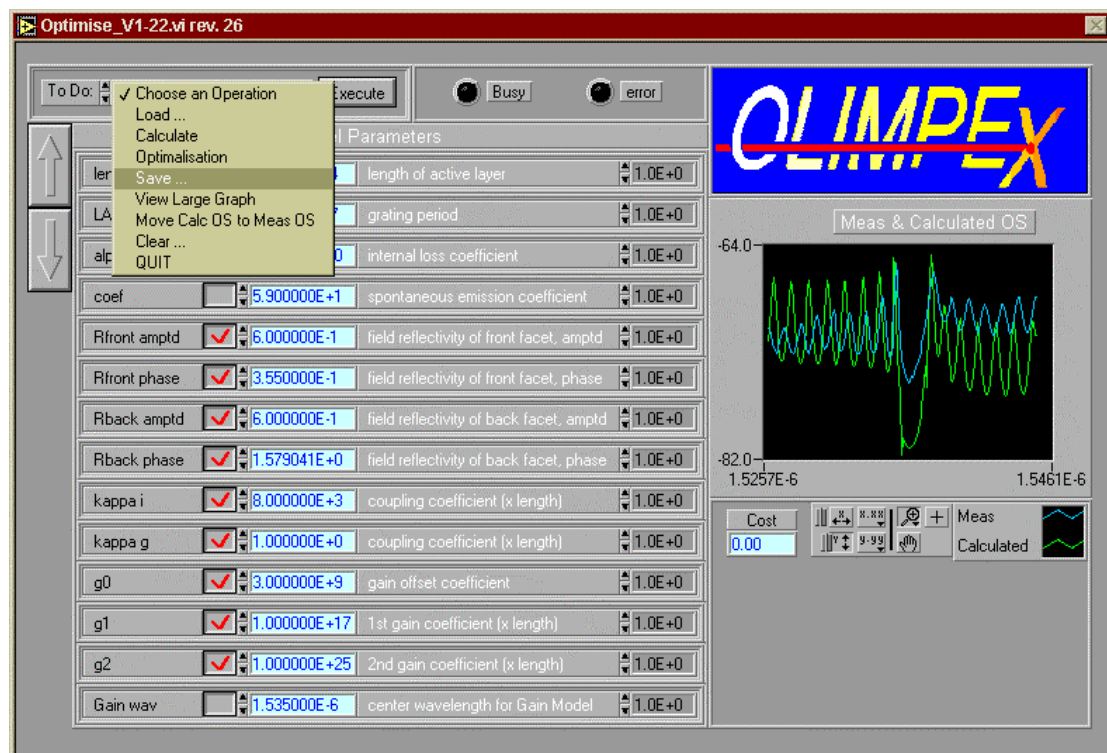
The user can specify a start value for all parameters and can select whether or not he wants to fit this parameter with the optimisation algorithm provided. In order to have a more flexible approach to the optimisation, the user can also enter a multiplication factor between the actual parameter and the value used in the optimisation algorithm. In this way it can be assured that all parameters, which are used by the optimisation algorithm, are of the same order of magnitude.

INPUT :

- ASE measurement (Intensity vs. wavelength, logarithmic scale)
- L and Λ
- Estimate for R_1 , R_2 , κ_i , κ_g

OUTPUT :

- R_1 , R_2 , ϕ_1 , ϕ_2 , κ_i , κ_g , n_g , gain



11.2 Technical details :

Originating partner : P01

file format : OSAview file with extra parameter block

APPENDIX C

Uitdrukkingen en afleidingen

C.1. Inleiding

Deze appendix beschrijft de uitgevoerde nauwkeurighedsanalyses aan de hand van de differenties van de gebruikte uitdrukkingen. De relevante uitdrukkingen worden hernomen en het eindresultaat van de differentieberekeningen wordt gegeven.

C.2 Nauwkeurighedsanalyse van de extracties uit RIN

In deze sectie worden de bijkomende uitdrukkingen gegeven, die het mogelijk maken om, startende vanuit de onnauwkeurigheden van de laserparameters en de geëxtraheerde “D-” en “K-factor”, de foutmarge op de differentiële optische versterking en de niet lineaire versterkingscoëfficiënt.

C.2.1 De differentiële optische versterking

De differentiële optische versterking kan bepaald worden volgens de in hoofdstuk 5 afgeleide uitdrukking (C.1), waarbij de injectie-efficiëntie (h_i) gelijk aan één verondersteld wordt.

$$\left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right) = \Phi(w, d, L, D, v_g) = \frac{4\mathbf{p}^2 qwdL}{h_i v_g} D \quad (\text{C.1})$$

De groepssnelheid (v_g) wordt gegeven door uitdrukking (C.2), waarbij c de lichtsnelheid voorstelt en n_g de groepsindex.

$$v_g = \frac{c}{n_g} \quad (\text{C.2})$$

Om de foutmarge op de differentiële optische versterking te bepalen, moeten eerst de partiële afgeleiden naar alle parameters bepaald worden. Deze zijn gegeven in de uitdrukkingen (C.3) tot (C.7)

$$\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}w} = 4 \frac{\mathbf{p}^2 qdLDn_g}{c} \quad (\text{C.3})$$

$$\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}d} = 4 \frac{\mathbf{p}^2 q w L D n_g}{c} \quad (\text{C.4})$$

$$\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}L} = 4 \frac{\mathbf{p}^2 q w d D n_g}{c} \quad (\text{C.5})$$

$$\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}D} = 4 \frac{\mathbf{p}^2 q w d L n_g}{c} \quad (\text{C.6})$$

$$\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}n_g} = 4 \frac{\mathbf{p}^2 q w d L n_g}{c} \quad (\text{C.7})$$

De foutmarge op de differentiële optische versterking in (C.8), wordt dan gegeven door de som van de partiële afgeleiden te maken, telkens vermenigvuldigd met de foutmarge van die parameter.

$$\Delta \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right) = \left(\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}w} \right) \Delta w + \left(\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}d} \right) \Delta d + \left(\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}L} \right) \Delta L + \left(\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}D} \right) \Delta D + \left(\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}n_g} \right) \Delta n_g \quad (\text{C.8})$$

C.2.2 De niet lineaire optische versterkingscoëfficiënt

Net zoals bij de differentiële optische versterking worden in het geval van de niet lineaire optische versterkingscoëfficiënt eerst de diverse partiële afgeleiden bepaald naar alle parameters. Hierbij is het van belang om af te leiden tot aan de basisparameters. De uitdrukking van de niet lineaire optische versterking is gegeven in (C.9).

$$\mathbf{e} = \left(\frac{K}{4\mathbf{p}^2} - t_p \right) v_g \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right) \quad (\text{C.9})$$

De groepssnelheid is gegeven in (C.2) en de differentiële optische versterking in (C.1), de fotonlevensduur is gegeven in (C.10). Dit alles gecombineerd levert de uitdrukking (C.11) op voor de niet lineaire optische versterking als aangenomen wordt dat beide facetten een gelijke reflectiecoëfficiënt R hebben.

$$t_p = \frac{1}{v_g(\mathbf{a}_i + \mathbf{a}_m)} = \frac{1}{v_g \left(\mathbf{a}_i + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right)} \quad (\text{C.10})$$

$$\mathbf{e} = 4\mathbf{p}^2 q w d L D \left(\frac{K}{4\mathbf{p}^2} - \frac{n_g}{c \left(\mathbf{a}_i + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right)} \right) \quad (\text{C.11})$$

De verschillende afgeleiden van deze uitdrukking zijn voorgesteld in uitdrukkingen (C.12) tot (C.19). De foutmarge van de niet lineaire optische versterking wordt dan opnieuw gegeven door de som van alle afgeleiden vermenigvuldigd met de toleranties voor elke parameter.

$$\frac{\mathfrak{I}e}{\mathfrak{I}a_i} = 4\mathbf{p}^2 \frac{qwdL^3 Dn_g}{c \left(a_i L + \ln\left(\frac{1}{R}\right) \right)^2} \quad (\text{C.12})$$

$$\frac{\mathfrak{I}e}{\mathfrak{I}n_g} = -4\mathbf{p}^2 \frac{qwdL^2 D}{c \left(a_i L + \ln\left(\frac{1}{R}\right) \right)} \quad (\text{C.13})$$

$$\frac{\mathfrak{I}e}{\mathfrak{I}D} = \frac{qwdL}{c} \left(\frac{c a_i KL + cK \ln\left(\frac{1}{R}\right) - 4\mathbf{p}^2 L n_g}{a_i L + \ln\left(\frac{1}{R}\right)} \right) \quad (\text{C.14})$$

$$\frac{\mathfrak{I}e}{\mathfrak{I}L} = \frac{qwdD}{c} \left(\frac{cK a_i^2 L^2 + 2cK a_i L \ln\left(\frac{1}{R}\right) + cK \ln\left(\frac{1}{R}\right)^2 - 4\mathbf{p}^2 a_i n_g L^2 - 8\mathbf{p}^2 n_g L \ln\left(\frac{1}{R}\right)}{a_i L + \ln\left(\frac{1}{R}\right)} \right) \quad (\text{C.15})$$

$$\frac{\mathfrak{I}e}{\mathfrak{I}R} = -4\mathbf{p}^2 \frac{qwdL^2 Dn_g}{cR \left(a_i L + \ln\left(\frac{1}{R}\right) \right)^2} \quad (\text{C.16})$$

$$\frac{\mathfrak{I}e}{\mathfrak{I}K} = qwdLD \quad (\text{C.17})$$

$$\frac{\mathfrak{I}e}{\mathfrak{I}w} = \frac{qdLD}{c} \left(\frac{c a_i KL + cK \ln\left(\frac{1}{R}\right) - 4\mathbf{p}^2 L n_g}{a_i L + \ln\left(\frac{1}{R}\right)} \right) \quad (\text{C.18})$$

$$\frac{\mathfrak{I}e}{\mathfrak{I}d} = \frac{qwLD}{c} \left(\frac{c a_i KL + cK \ln\left(\frac{1}{R}\right) - 4\mathbf{p}^2 L n_g}{a_i L + \ln\left(\frac{1}{R}\right)} \right) \quad (\text{C.19})$$

C.2.3 De controleberekening

Zoals in hoofdstuk 5 uitgelegd is, kan de variatie van de modale optische versterking ten opzichte van de stroom doorheen de laserdiode op twee manieren berekend worden : uit de Hakki-Paoli-methode en uit de RIN-extracties. Het verband tussen beide wordt gegeven in uitdrukking (C.20).

$$\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}I} = \frac{t_d}{qwdL} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right) \quad (\text{C.20})$$

De partiële afgeleiden voor deze berekening worden gegeven in uitdrukkingen (C.21) tot (C.25).

$$\frac{\mathcal{I} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}I} \right)}{\mathcal{I} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right)} = \frac{t_d}{qwdL} \quad (\text{C.21})$$

$$\frac{\mathcal{I} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}I} \right)}{\mathcal{I}t_p} = \frac{1}{qwdL} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right) \quad (\text{C.22})$$

$$\frac{\mathcal{I} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}I} \right)}{\mathcal{I}w} = - \frac{t_d}{qw^2dL} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right) \quad (\text{C.23})$$

$$\frac{\mathcal{I} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}I} \right)}{\mathcal{I}d} = - \frac{t_d}{qwd^2L} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right) \quad (\text{C.24})$$

$$\frac{\mathcal{I} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}I} \right)}{\mathcal{I}L} = - \frac{t_d}{qwdL^2} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right) \quad (\text{C.25})$$

C.3 Nauwkeurighedsanalyse van de Hakki-Paoli-methode

De uitdrukking in de methode is te zien in (C.26), waarbij de twee vermogens (P_{max} en P_{min}), de lengte (L) en de reflectiecoëfficiënt (R) de variabelen zijn.

$$\Gamma g - \mathbf{a}_i = G = \frac{1}{L} \left(\ln \left(\frac{\sqrt{P_{max}} - \sqrt{P_{min}}}{\sqrt{P_{max}} + \sqrt{P_{min}}} \right) + \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right) \quad (\text{C.26})$$

De partiële afgeleiden zijn gegeven in uitdrukkingen (C.27) tot (C.30). Voor enkele realistische waarden voor de parameters ($P_{max} = -66$ dBm, $P_{min} = -77$ dBm, $L = 153$ μm en

$R = 0.3$) levert dit een modale optische versterking $G = 40 \text{ cm}^{-1}$ op. Indien de specificaties van het toestel gebruikt worden in 0.1 en 2 genomen wordt als nauwkeurigheid van respectievelijk de reflectiecoëfficiënt en de gemeten lengte lever dit een onzekerheid van 5 cm^{-1} op.

$$\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}L} = -\frac{1}{L^2} \left(\ln \left(\frac{\sqrt{P_{\max}} - \sqrt{P_{\min}}}{\sqrt{P_{\max}} + \sqrt{P_{\min}}} \right) + \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right) \quad (\text{C.27})$$

$$\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}R} = -\frac{1}{LR} \quad (\text{C.28})$$

$$\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}P_{\max}} = \frac{1}{2L} \left(\frac{\sqrt{P_{\max}} + \sqrt{P_{\min}}}{\sqrt{P_{\max}} - \sqrt{P_{\min}}} \right) \left(\frac{1}{(\sqrt{P_{\max}} + \sqrt{P_{\min}})\sqrt{P_{\max}}} - \frac{\sqrt{P_{\max}} - \sqrt{P_{\min}}}{(\sqrt{P_{\max}} + \sqrt{P_{\min}})^2 \sqrt{P_{\max}}} \right) \quad (\text{C.29})$$

$$\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}P_{\min}} = -\frac{1}{2L} \left(\frac{\sqrt{P_{\max}} + \sqrt{P_{\min}}}{\sqrt{P_{\max}} - \sqrt{P_{\min}}} \right) \left(\frac{1}{(\sqrt{P_{\max}} + \sqrt{P_{\min}})\sqrt{P_{\min}}} + \frac{\sqrt{P_{\max}} - \sqrt{P_{\min}}}{(\sqrt{P_{\max}} + \sqrt{P_{\min}})^2 \sqrt{P_{\min}}} \right) \quad (\text{C.30})$$

APPENDIX D

Gedetailleerde informatie over de toepassingen en componenten van het pakket “OLIMPEX”

Inleiding

De informatie van deze appendix is terug te vinden op de CD-ROM die bij dit proefschrift hoort. Op die CD-ROM is meer gedetailleerde informatie te vinden over de in dit werk gerealiseerde toepassingen en componenten. De CD is opgevat als een internetsite en werd uitgevoerd in het HTML-formaat dat bekeken kan worden met elke internetbrowser die frames kan gebruiken.

Om de inhoud van de CD te bekijken, volstaat het om het bestand “overview.html” te openen in een browser en vervolgens de gewenste hyperlinks te selecteren.

Inhoud

OLIMPEX

Deze appendix bevat een kopie van de CD-ROM die als smaakmaker verstuurd werd naar de verschillende partners van het Europese project BLISS (“*Broadband Lightwave Sources and Systems*”). Ze bevat een korte omschrijving van hetgeen OLIMPEX is, de technische vereisten en een opsomming van de verschillende geïmplementeerde toepassingen. Voor elke toepassingen is er een korte gebruikershandleiding aan de hand van een kopie van de grafische gebruikersinterface.

De CD-ROM bevat ook een voorbeeld van de documentatie die bestaat voor de verschillende componenten van het parameterextractieframework en de implementatie van de functionele instrumentdriver. Voor enkele componenten, is ook de source code aanwezig.

ODIF

Naast een kopie van de op het internet gepubliceerde informatie omtrent ODIF (inclusief de LabVIEW file interface software), bevat deze CD ook het ontwikkelde prototype van de ODIF-parser en een illustratie hoe deze kan gebruikt worden om een software interface in C++ te implementeren. Beide illustraties bevatten de C++ source code.

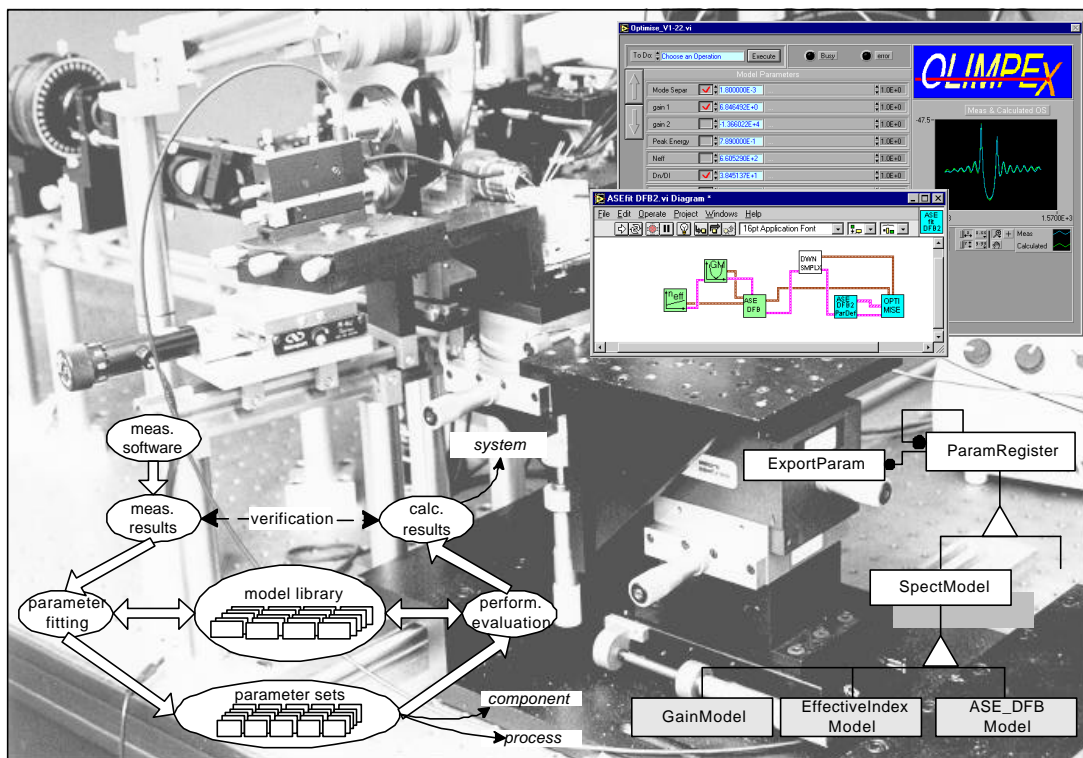
LabVIEW

In deze sectie wordt een overzicht gegeven van de symbiose tussen LabVIEW en C++, zoals deze in hoofdstuk 7 uiteengezet is. Ook hier worden bepaalde voorbeelden geïllustreerd aan de hand van source code

Objectgeoriënteerde meet- en parameterextractie-
methodieken voor opto-elektronische componenten
*Object oriented measurement and parameter extraction methodologies
for opto-electronic components*

English translation

Piet Verhoeve



PREFACE

The work presented in this thesis could not have been accomplished without the contributions of many people. Due to the scope and the diversity of the work done during the past six years, it is not possible to mention all the individual contributions without forgetting some. So I want to start by thanking all of these people for the many “smaller” contributions they made to this work. Naturally certain other persons deserve special recognition.

Firstly I would like to thank Prof. P. Lagasse, Head of the Department, under whose guidance the department has grown successfully in recent years. The total floor space available of the department has not increased but, what is more important, the staff, the research opportunities and the facilities available have most certainly grown. These facilities have played a key role in carrying out this work.

I would like to thank the promoters of this thesis, Prof. R. Baets and Dr. G. Morthier, for the opportunities they have provided. I am thinking here not only of the different scientific aspects which formed the basis of the work, such as the many discussions on measurements, parameter extraction, the software education and the visits to several institutes, but also of the international experience I acquired through the different European projects and the opportunities to experience the pros and cons of the recent information technology such as ISDN video conferences, the Internet and teleworking.

I would like to thank Prof. H. Tromp for his valuable contribution during the development and realisation of the software framework. Also a word of thanks to Prof. R. Boute for his help concerning the formal syntactical description of ODIF.

Of the many European contacts in the course of the projects, I will certainly remember the experiences with “Dublin” and “Stockholm”. I would like to thank the people of the University College Dublin for the exciting interaction during the implementation of the OLIMPEX applications.

As many people know, Stockholm occupies a special place in my heart. This is mainly due to Björn Broberg, with whom I realised my first linewidth measurement at the Institute of Microelectronics (IM) in 1993. During the following years, when the institute came to be called IMC, he followed my work with enthusiasm. The various visits to Stockholm were not only interesting from a scientific point of view, but also from the cultural. It was during these visits that I learned to know and appreciate the “family” side of Sweden.

The “LabVIEW-C++” software cocktail could not have been developed without the contribution of the people at National Instruments. I would especially like to thank Mr. Andres Salvador-Stamm for taking care of the inside contacts, for his enthusiasm, and for the stimulating discussions about the realisations.

I am not going to attempt to name all the people in the department who have made a contribution to this work. A word of thanks should not be a representation of the staff history. However, there are a few persons who simply have to be mentioned individually: Geert Diet for the implementation of several applications in LabVIEW, and Eddy Hebbelinck and Luc Haentjens for their patience during the fabrication process of the many parts for the measurement set-up. Furthermore I would like to thank three persons who played an important role and have since left the department: Peter De Dobbelaere, who taught me many tricks and secrets of optical alignment, Danny Vercauteren, who developed the Word template used for this PhD. and Stefan Verelst, who helped me take the first steps in the field of object oriented programming. As the last persons in the line of INTEC colleagues, I would like to thank the different guardians of the computer network: Henk, Francis, Chris and Kristien.

I would also like to thank the people who turned the department into “the lab”. This came about not only as a result of the scientific contributions, but also the general atmosphere at the lab. The less scientific discussions during the lunch and coffee breaks were also important. I will always remember the coffee Pascale made in “the 39”. In the mean time this break has become a well established tradition. A cosy chat, the latest issue of *Flair*, a new episode of Bo’s activities, pralines or a piece of leftover cake. During the past years the lonely cup of coffee in the morning has changed into a pleasant pause in between the scientific activities.

Last but not least, I would like to thank my wife Veerle. She is probably the only person who knows how much effort this PhD has taken. I am not thinking about my contribution but about her support and the endurance that it took to continue the work through these years. I think especially about her caring for the children during the times I was acquiring experience abroad, her tolerance of my less pleasant side during periods of stress, and the way she managed the family so that I could work late without distraction to finish this book. And beyond all this, I would also like to thank her for checking the Dutch text to filter out the spelling errors left by the spelling checker.

Gent, September 1998

Piet Verhoeve

TABLE OF CONTENTS

Preface	3
Table of contents	7
List of symbols and abbreviations	13
Chapter 1	15
Introduction	15
1.1 Context.....	15
1.2 Definition of the problems	16
1.3 Objectives.....	17
1.4 Structure of the thesis	18
1.5 Publications list	18
Chapter 2	21
Measurement philosophy for opto-electronic components	21
2.1 Introduction.....	21
2.2 Opto-electronic components	21
2.3 Characterisation of components	26
2.3.1 Characterisation based on parameter extraction.....	26
2.3.2 The benefit of physical parameters versus mathematical values	27
2.3.2.1 For the component manufacturer.....	27
2.3.2.2 For the user of the component	27
2.4 Measuring opto-electronic components.....	28
2.4.1 Direct measurements and indirect measurements	28
2.4.2 Intelligent methods for measuring.....	28
2.4.3 Combination of measurements as “aurea mediocritas” (golden mean).....	29
2.4.4 Combination of components as an extra possibility	29
2.5 Parameter extraction for opto-electronic components	29
2.5.1 Parameter extraction or fitting is a process with pitfalls.....	29
2.5.2 Physical parameters contain more information.....	31
2.6 Consequences and goals for the measurement environment.....	32
2.6.1 Automation and good software design are needed	32
2.6.2 Requirements of a flexible environment.....	32
2.7 Conclusion	33

Chapter 3	35
The abstract approach to the software design.....	35
3.1 Introduction.....	35
3.2 General measurement software	35
3.3 Communication between applications.....	37
3.3.1 General principle of operation.....	37
3.3.2 ODIF, a hierarchical information structure	39
3.3.2.1 The principle of a formal syntax description.....	39
3.3.2.2 The general structure of ODIF	40
3.3.2.3 Introduction to the formal notation.....	40
3.3.2.4 The formal syntax description of the highest levels.....	41
3.3.2.5 Analysis of the formal syntax description.....	42
3.4 Communication between applications and instruments	46
3.4.1 The classical approach: the instrument driver.....	46
3.4.2 The principle of the functional instrument driver	47
3.4.3 The functional instrument driver: the object model.....	48
3.5 Short introduction to the notation method of Rumbaugh	49
3.6 An object model for parameter extraction.....	50
3.6.1 The classic functional approach to parameter extraction	50
3.6.2 The first approach to an object model.....	50
3.6.3 The relationship of the laser model to the optimising algorithm.....	51
3.6.4 The optimising algorithm	53
3.6.5 The laser model	53
3.6.6 The cost function.....	54
3.6.7 The complete object model for the parameter extraction problem.....	55
3.7 Conclusion.....	57
Chapter 4	59
Parameter extraction on laser diodes.....	59
4.1 Introduction.....	59
4.2 Properties of the waveguide.....	59
4.2.1 The optical gain and related parameters	59
4.2.1.1 The optical gain.....	59
4.2.1.2 The differential optical gain	60
4.2.1.3 The non-linear gain.....	60
4.2.2 The internal optical loss.....	61
4.2.3 Group index - effective index of refraction.....	62
4.2.4 Reflections at the facets	62
4.2.5 Properties of the built in diffraction grating	63
4.3 The static laser properties.....	64
4.3.1 Threshold current.....	64
4.3.1.1 Method one: the intersection with the X-axis	64
4.3.1.2 Method two: the inflexion point of the power curve	65
4.3.1.3 Method three: intersection of the spontaneous emission and the lasing operation.....	65
4.3.2 Series resistance	66
4.3.3 The peak wavelength and the spectral purity.....	67

4.3.4	Characteristic temperature: T_0	67
4.3.5	The near field and the far field.....	68
4.3.6	The optical spectrum.....	68
4.4	Noise properties of laser diodes.....	69
4.4.1	Introduction.....	69
4.4.2	Amplitude noise: the relative intensity noise	69
4.4.3	Phase noise: the linewidth.....	70
4.5	The dynamic laser properties.....	71
4.5.1	Introduction.....	71
4.5.2	AM modulation.....	72
4.5.3	FM modulation.....	72
4.5.4	AM FM coupling.....	72
4.6	Conclusion.....	73
Chapter 5		77
Advanced parameter extraction for laser diodes.....		77
5.1	Introduction.....	77
5.2	Extraction on amplified spontaneous emission spectra	77
5.2.1	General aspects of fitting on amplified spontaneous emission spectra.....	78
5.2.1.1	The models.....	78
5.2.1.2	The fitting process.....	78
5.2.1.3	The reliability and the accuracy of the solution.....	78
5.2.2	ASE based extraction for DFB laser diodes	79
5.2.2.1	The amplified spontaneous emission spectrum model	80
5.2.2.2	Evaluation of the ASE spectrum model of a DFB laser diode.....	81
	<i>A. Parameter combinations</i>	81
	<i>B. Sensitivity of the cost function to its parameters</i>	82
5.2.2.3	Used fitting procedure.....	84
5.2.3	ASE based extraction for Fabry-Perot laser diodes.....	84
5.2.3.1	The amplified spontaneous emission spectrum model for a Fabry-Perot laser diode	85
5.2.3.2	Evaluation of the model	85
5.3	Extraction from the relative intensity noise (RIN).....	88
5.3.1	Introduction.....	88
5.3.2	The measurement and elementary extraction.....	89
5.3.3	Extraction of component parameters	91
5.3.3.1	The “D-factor”: differential optical gain.....	91
5.3.3.2	The “K-factor”: Intrinsic maximal bandwidth and non linear gain coefficient.....	92
5.3.3.3	Analysis of the extraction accuracy.....	93
5.3.3.4	Overall overview of the extraction based on the RIN measurements	94
5.4	Extraction based on a combination of measurements	95
5.4.1	A single laser diode	95
5.4.2	A set laser diodes	97
5.4.2.1	Introduction.....	97
5.4.2.2	A proposal for a set laser diodes.....	97
5.4.2.3	A parameter extraction procedure based on a number of Fabry-Perot laser diodes	97
5.4.2.4	Extraction procedure based on a number of DFB laser diodes	100

5.4.2.5	Extraction procedure based on a number of Fabry-Perot and DFB laser diodes	100
5.5	Conclusion	101
Chapter 6		103
The measurement set-up		103
6.1	Introduction.....	103
6.2	Mechanical requirements	103
6.2.1	Requirements of the laser diode.....	103
6.2.2	Requirements of the measurements.....	104
6.3	Mechanical approach for the requirements	104
6.3.1	General approach of the measurement set-up	104
6.3.2	The positioning tower for the laser diode	106
6.3.3	The optical bench.....	108
6.3.3.1	The coupling to optical fibre	108
6.3.3.2	The near and the far field	109
6.3.3.3	The optical power	111
6.4	Some implementation details	111
6.5	Evaluation of the measurement set-up	112
6.5.1	Introduction.....	112
6.5.2	The stability and the temperature dependency.....	113
6.5.3	Reflection sensitivity	115
6.5.3.1	Why measure reflection sensitivity.....	115
6.5.3.2	The concept of the measurement set-up.....	116
6.5.3.3	The implementation of the measurement set-up	116
6.5.3.4	The measurements	117
6.6	Further developments of the measurement set-up	119
6.7	Conclusion	120
Chapter 7		123
Implementation of the measurement and extraction software		123
7.1	Introduction.....	123
7.2	General aspects of the implementation.....	123
7.2.1	The choice of programming languages	123
7.2.2	A short introduction to LabVIEW.....	125
7.2.3	The symbiosis of LabVIEW and C++.....	126
7.2.3.1	The association of LabVIEW icons with C++ objects.....	126
7.2.3.2	The interaction between LabVIEW and C/C++.....	130
7.2.4	LabVIEW programming in object oriented style	131
7.3	The fundamental components of the applications	131
7.3.1	The functional instrument driver	131
7.3.2	The ODIF file interface.....	133
7.3.3	The C++ objects in LabVIEW.....	133
7.3.4	Documentation of the applications	135
7.4	The fundamental applications.....	137
7.4.1	The standard application.....	137
7.4.2	The engine application.....	138

7.4.3	The extraction application.....	140
7.5	The end result: OLIMPEX	141
7.5.1	Introduction.....	141
7.5.2	What is OLIMPEX ?	141
7.5.3	The realised components and applications.....	142
7.6	Conclusion.....	143
Chapter 8		145
Evaluation of the measurement and extraction tools		145
8.1	Introduction.....	145
8.2	Extraction on a set of FP and DFB laser diodes.....	145
8.2.1	Description of the laser diode set	145
8.2.2	The measurement procedure used	147
8.2.3	Evaluation of the applications used.....	150
8.2.4	The results obtained for the Fabry-Perot laser diodes	150
8.2.4.1	Parameters obtained from the power measurement (LIV)	151
8.2.4.2	Parameters obtained from the amplified spontaneous emission	152
8.2.4.3	Parameters obtained from the relative intensity noise (RIN)	158
8.2.5	Discussion on the results for the Fabry-Perot laser diodes	161
8.2.6	Results for the DFB laser diodes	162
8.2.6.1	Parameters determined from the power measurement	163
8.2.6.2	Parameters obtained by fitting the amplified spontaneous emission spectrum.....	164
8.3	ASE based extraction for DBR laser diodes.....	167
8.3.1	Introduction.....	167
8.3.2	The ASE model for a DBR laser diode.....	168
8.3.3	Evaluation of the model used	169
8.3.4	The fitting procedure.....	170
8.3.5	The results of the extraction for a DBR laser from Philips	172
8.4	Conclusion.....	174
Chapter 9		175
Conclusion and perspectives.....		175
9.1	Introduction.....	175
9.2	Overview of the work accomplished	175
9.3	Final remarks	177
Appendix A		179
ODIF : Optical Data Interchange Format.....		179
Appendix B		201
Introduction to the measurement tools of the package “OLIMPEX”		201
Appendix C		225
Expressions and calculations		225

Appendix D	231
Detailed information on the tools and the components of the package “OLIMPEX”	231

LIST OF SYMBOLS AND ABBREVIATIONS

Abbreviations :

ASE	...	Amplified spontaneous emission
DAQ	...	Data acquisition, typically used to indicate a plug-in card in a computer.
DBR	...	Distributed Bragg reflector laser diode
DFB	...	Distributed feedback laser diode
FID	...	Functional instrument driver
GPIB	...	General Purpose Instrumentation Bus, a communication protocol often used for measurement equipment.
LabVIEW		Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench, a graphical programming environment and language. LabVIEW is a registered trademark of National Instruments.
RIN	[dB/Hz]	Relative Intensity Noise, the relative amount of intensity noise of a laser diode with respect to the average output power.
SMSR	...	Side-mode-suppression-ratio, the ratio of the power in the main mode and the second largest mode of the optical spectrum.
SQE	...	Sum of squared errors, the sum of the squares of the difference between a measured and calculated characteristic.
WDM	...	Wavelength division multiplexing, a technique to send signal at different wavelengths through one optical fibre.
WTLS	...	Widely tuneable laser

Symbols :

$\frac{\eta_G}{\eta_N}$	[m ²]	differential optical gain
η_{ext}	[W/A]	external efficiency, the ratio of the output optical power versus the injected current.
η_i	[%]	injection efficiency
$\eta_{Q,\text{ext}}$	[%]	external quantum efficiency, de external efficiency expressed in terms of particles (number of photons per electron)
α_{Henry}	[-]	linewidth enhancement factor, named after C.H. Henry, who was the first to recognise the phenomenon.
α_i	[m ⁻¹]	internal optical loss of the material
A	[s ⁻¹]	non radiate recombination coefficient (“ <i>mono-molecular recombination coefficient</i> ”)

B	$[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$	bimolecular recombination coefficient
C	$[\text{m}^6\text{s}^{-1}]$	Auger recombination coefficient
d	[m]	thickness of the active region
ϵ	$[\text{m}^3]$	non linear gain coefficient or gain suppression coefficient
f	[Hz]	frequency
f_r	[Hz]	resonance frequency
Γ	[-]	confinement factor
γ	[Hz]	damping factor
G	$[\text{m}^{-1}]$	modal optical gain ($G = Gg - a$)
g	$[\text{m}^{-1}]$	optical gain of the material
I	[A]	current
I_{th}	[A]	threshold current
λ	[m]	wavelength
L	[m]	length of the section
N	$[\text{m}^{-3}]$	carrier density (electron concentration)
q	[C]	elementary charge unit
R_{sp}	$[\text{s}^{-1}]$	spontaneous emission generation coefficient
S	$[\text{m}^{-3}]$	photon density
τ_d	[s]	differential carrier lifetime
τ_p	[s]	photon lifetime
v_g	[m/s]	group velocity
w	[m]	width of the active region

CHAPTER 1

Introduction

1.1 Context

Opto-electronic components started being used for telecommunications a few decades ago. In the beginning, they were mainly used for long distance connections. Due to the digitisation of most communications (ISDN, GSM, etc.) and due to the breakthrough of computer networks such as the Internet, the demand for an ever greater bandwidth has continued to grow. This demand for greater bandwidth gave rise to the installation of more and more optical links. This will not lead to fibre links to the end user's home in the near future, but plans already exist to bring the fibre to the street ("fibre to the curb"), thus grouping a small number of end users.

As the number of optical connections increased, the methods used to establish these optical connections changed during the development of optical telecommunications. Recent techniques such as WDM (Wavelength Division Multiplexing) make it possible to send multiple signals (each at a different wavelength) through a single optical fibre. The changes in techniques used resulted in new components (e.g. optical switches) and existing components (e.g. laser diodes) were almost totally altered due to the changing requirements. The light that is sent through a WDM network must meet specific requirements of purity and stability. In order to emit such light, the laser diode has to have a special design, and preferably even a design that makes it possible to tune the laser wavelength over a certain range.

These tendencies caused not only an increase in the demand for optical components, but also required the development of relatively cheap components that nonetheless are high performance and often complex in structure. To enable the efficient fabrication of such devices, an effective characterisation (preferably combined with parameter extraction) is needed.

The manufacturer of the component needs to determine the quality of an individual component as early as possible so that bad components can be rejected before expensive processing steps such as mounting and packaging are carried out. If the manufacturer can verify whether or not the realised parameters correspond with the designed parameters, he can then use this information to correct the production processes. If the characterisation is sufficiently accurate and complete, the manufacturer can pass on the results as component specifications to the customer.

The system designer is mainly interested in an accurate description of a component. This allows him to design systems based on real components, thus eliminating the need for extra high tolerances for all components used. Furthermore this accurate description makes it possible to perform system simulations with higher accuracy.

Characterisation techniques based on parameter extraction are well known and often used in the field of electronic semiconductors (e.g. the SPICE parameters of a transistor). However in the field of opto-electronics these methods are not often used. This can be explained in terms of the complexity of the components and the fact that the fabrication processes have not been very stable until recently. The presence of photons, multiple sections and the resulting complex behaviour makes an efficient and accurate characterisation far from trivial. Furthermore a large number of parameters that greatly influence the behaviour of the component cannot be measured directly. There is clearly a need for a characterisation strategy which uses all available information. It should determine a complete and consistent parameter set for the component (or for a number of components).

1.2 Definition of the problems

There is nothing new about the characterisation of opto-electronic components and the related parameter extraction. Up to now, however these activities have been carried out separately. Each research or development lab in the field of laser diodes has certain measurement facilities, some of which are automated. In most cases the facilities consist of separate set-ups and are equipped with ad hoc software.

Since the laser diode has to travel from one set-up to another in order to perform the different measurements, the characterisation is very often limited to the measurements which are strictly necessary. Furthermore, in most cases no relationship exists between the different results (file formats) of the several measurement set-ups due to the ad hoc software solutions. Very often the data have to be converted or even re-entered manually. Both the lack of compatible files and the different measurement set-ups greatly reduce the benefits of parameter extraction procedures due to the large overhead involved.

Advanced parameter extraction methods (e.g. parameter extraction based on the amplified spontaneous emission spectrum of a laser diode) are even less widely used in practice. If such methods are to be used in production environments, the complex methods have to be converted into simple tasks by means of automation. Hence there is a need for a software approach that makes such automation possible in an integrated fashion.

In the world of measurement it is not very common to design and implement software such that it can be re-used and maintained easily. Hence the introduction of a new measurement instrument (e.g. extension or replacement) very often necessitates a great number of software modifications. The lack of good software design also causes the multiple implementation of identical measurements due to the low maintenance capabilities. Furthermore, the lack of flexible software can result in less efficient use of the equipment. Due to the large investments needed for opto-electronic measurement instruments, a maximum degree of utilisation is aimed at by distributing the measurement instruments amongst the different measurement set-ups. The situation regularly occurs in which a specific instrument (for which the ad hoc software was developed) is occupied but a similar instrument (of a different manufacturer) is available. In the case of non-flexible software this results in a waste of measurement resources since the measurement cannot be performed.

However, there is a growing tendency in the software world to develop software with a view to the re-usability and maintenance of the applications implemented. One possible method for accomplishing this is defined by the object oriented paradigm. The problem is

divided into a number of “objects”, each of which implements a part of the problem. When all objects are put together, the entire problem can be solved.

Since these objects stand on their own and since they have clear interfaces with respect to the rest of the solution, it is easier to provide maintenance for the end result. When an object implementation has to be changed (e.g. for reasons of execution speed), this can be done without affecting the rest of the solution. Of course, this implies that the interface and the behaviour of the object do not change. Furthermore it is often possible to recognise generic objects in the solution proposed. These generic objects can be used to realise other implementations, thus stimulating the code re-use.

These software techniques are still a long way from being used in the world of measurements and (laser) models. It was only at the time of writing this text that the first publications of such efforts appeared in the literature [1.1]. If such software techniques could be grafted onto the measurement world, it would be a big leap forward for the characterisation of components. This requires the development of a structured approach which deals with the combination of measurement set-up, measurement software and parameter extraction software. Furthermore the approach should result in a decrease of the time spent by a researcher to convert data or implement specific problems.

Ideally an environment is to be developed, such that performing and combining different measurements and parameter extractions is an easy task for the researcher. An environment which makes it possible to introduce new laser models or extraction algorithms without the need for major software modifications. An environment which makes it possible to use existing measurement applications in combination with varying measurement instruments. An environment which makes it possible to use measurement applications already developed as plug-in components for larger measurement applications. In short, an environment which allows the researcher to “play” with measurements, (laser) models and parameter extraction methods.

1.3 Objectives

The core of this thesis deals with measurement and parameter extraction for optoelectronic components, and more specifically for laser diodes. Although these techniques are known and partly used, this thesis will go further: it will propose an overall solution to the problem. To do so, the existing methods will be studied, structured and improved to increase the consistency and enable the automation of the methods. This will enable the utilisation of such methods in production environments. The objectives of this work can be divided into three parts: characterisation, parameter extraction and a structured software approach.

The first part is the characterisation of laser diodes. A measurement set-up will be realised to enable extensive characterisation without moving the laser diode. Furthermore this measurement set-up will be equipped with the necessary characterisation software to simplify and automate the measurement effort.

The second part is the parameter extraction. The different methods for parameter extraction will be examined. More specifically the advanced parameter extraction methods will be studied in detail. A roadmap will be developed to act as a guide to accomplishing full parameter extraction for laser diodes.

The third part of the thesis is the software approach. Instead of viewing software as a necessary evil for performing calculations and achieving automation, this thesis will develop an

overall approach in which the underlying software methods, software structures and basic implementations form a support and an enrichment to the solution.

1.4 Structure of the thesis

All three parts presented in the previous section can be found in the structure of this work. The first part (the measurement set-up) is described in the central chapters of this book; the description of the two other parts (the parameter extraction and the software approach) it to be found in the first and the final chapters of the book.

The description of the measurement set-up is preceded by the theoretical description of the methods developed. In Chapter 2 an overview is given of the measurement strategy for opto-electronic components and the objectives of this work are explained in detail. Once the strategy and the objectives are established, the theoretical software methods and structures are developed in Chapter 3. Chapter 4 gives an overview of the most important laser parameters and the different methods for extracting them. Chapter 5 continues this description by studying two advanced parameter extraction methods. The methods based on the amplified spontaneous emission spectrum and the relative intensity noise are elaborated in the scope of this work.

After the description of the measurement set-up in Chapter 6, the practical issues of the software implementation are discussed in Chapter 7. This chapter contains information on the chosen combination of a textual (C++) and a graphical programming language (LabVIEW), a symbiosis developed within the framework of this thesis. The chapter also describes the realised applications, that have been distributed to a number of institutes in Europe, Canada and the U.S. The evaluation of the applications implemented and the parameter extraction methods developed is described in Chapter 8. The procedures proposed in Chapters 4 and 5 are tested on a number of specific laser diodes.

Finally the conclusions are formulated in Chapter 9.

1.5 Publications list

The research performed during the course of this thesis resulted in a number of publications in international journals and in proceedings of international conferences. This section gives an overview of these publications.

- [1] G. Vermeire, F. Vermaerke, *P. Verhoeve*, R. Baets, P. Van Daele, P. Demeester, "Single growth run 4th order QW GaAs-Al₆₀GaAs DFB lasers emitting at 780 nm", Lasers and Electro-Optics Society (LEOS) 1994 7th Annual Meeting , IEEE 94CH3371-2, Library of Congress 93-61268, Vol. 2, 31 October - 3 November 1994, pp. PD1.7.
- [1] A.J. Lowery, H. Olesen, G. Morthier, *P. Verhoeve*, R. Baets, J. Buus, D. McDonald, D.D. Marcenac, "A proposal for standardised parameters for semiconductor lasers", International Journal of Optoelectronics, 1995, vol 10, number 5, pp. 347-355.
- [1] *P. Verhoeve*, J. Timperman, D. Van Ruymbeke, R. Baets, J. Degrieck, "A novel method to discriminate compressive versus tensile strain in fibre Fabry-Perot strain sensors", Optical Fibre Measurement Conference (OFMC), 1995
- [1] V. Sainov, Ts. Petrova, A. Dimitrova, C.J. Van Den Poel, A. Valster, I. Veretennicoff, *P. Verhoeve*, R. Baets, Nguyen Huu Thanh, P.M. Boone, "Recording and copying of

reflection holograms with a semiconductor laser", Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) 1996

- [1] G. Morthier, *P. Verhoeve*, R. Baets, R. Schatz, "Extraction of a large set of laser parameters from different measurements", IEEE International Semiconductor Laser Conference 1996
- [1] G. Morthier, *P. Verhoeve*, R. Baets, "A simple but accurate expression for the static and dynamic chirp in DFB lasers", Integrated Photonic Research (IPR), 1996
- [1] A.M. Gulisano, D.J. Robbins, P.J. Williams, *P. Verhoeve*, "Widely tunable sampled-grating DBR lasers to address 100 channels over 40 nm for WDM applications", ECIO97
- [1] *P. Verhoeve*, G. Diet, G. Sarlet, G. Morthier, R. Baets, T. Farrell, "OLIMPEX: measurement and parameter extraction tools for advanced laser diodes", Proceedings of Lasers and Electro-Optics Society (LEOS), Benelux chapter 97, pp. 109
- [1] *P. Verhoeve*, "Stretching the limits of LabVIEW: the symbiosis of Object Oriented "C++" programming and "G"", LabVIEW Technical Resource, vol. 6-1, pp. 24-26, 1998
- [1] *P. Verhoeve*, "The route to G++, object oriented programming techniques in LabVIEW", LabVIEW Technical Resource, vol. 6-2, pp.20-23, 1998
- [1] *P. Verhoeve*, Appendix A: "An Optical Data Interchange Format", from the book: "How to model and measure PHOTONIC DEVICES, Experiences from a European collaboration", Springer Verlag GmbH (Berlin), final report of COST240 project, to be published.

Presentation were given at the following (inter)national forums. However, no general proceedings are available for these forums.

- [1] *P. Verhoeve*, R. Baets, "Estimation of laser parameters from lightwave measurements", Union Radio-Scientifique Internationale (URSI), 1995
- [1] *P. Verhoeve*, G.Morthier, "Parameter extraction on laser diodes from spontaneous emission spectra", Semiconductor laser and amplifier workshop, Veldhoven, 1995
- [1] *P. Verhoeve*, G. Morthier, R. Baets, K. Sato, Y. Nakano, "ASE-spectra based parameter estimation for DFB and DBR lasers", COST240 Workshop Budapest, 1996
- [1] *P. Verhoeve*, "Instrument driver software: beyond the physical instruments", NI-days Benelux 1996
- [1] *P. Verhoeve*, "Measuring beyond physical instruments", Symposium on Virtual Instrumentation in Telecom, 1997
- [1] *P. Verhoeve*, G. Diet, G. Sarlet, G. Morthier, R. Baets, T. Farrell, "OLIMPEX: measurement and parameter extraction tools for advanced laser diodes", Union Radio-Scientifique Internationale (URSI), 1997

-
- [1.1] S. Fine, W. Smith, T. Turner, "Improving model development with configuration management", IEEE Computational Science and Engineering, Vol. 5-1, 1998, pp. 56-65

CHAPTER 2

Measurement philosophy for opto-electronic components

2.1 Introduction

This chapter gives an overview of the general aspects on measuring and characterising opto-electronic components.

The first part gives an overview of the operating principles of semiconductor laser diodes and some recent developments in the area of opto-electronic components. The behaviour of a number of components is illustrated by measurement results which have been obtained in the course of this work.

The second part starts from the component usage viewpoint and proposes a generic characterisation strategy (Section 2.3) which is applied to opto-electronic components in section 2.4

The third part of the chapter analyses a number of specific characterisation aspects (Section 2.5) which lead to the specific problems that are solved in this work (Section 2.6).

2.2 Opto-electronic components

The basic structure of a laser diode consists of a cavity (a waveguide and two mirrors) that acts as an optical resonator and is filled with a pumped material (the laser medium). Due to the pumping, the carriers in the laser medium can absorb energy and move to a state of higher energy (Figure 2-1.a). When such a carrier drops back to its base state, a photon is released. This can happen in two ways: spontaneous (Figure 2-1.b), or stimulated (Figure 2-1.c). In the first case this effect is called fluorescence; in the second case, the term “stimulated emission” is used. In the case of stimulated emission, the fallback of the carrier is induced by a passing photon. The newly created photon has the same frequency, phase and polarisation of the photon passing by, which explains the typical properties of laser light: monochromatic and coherent.

Prior to achieving laser operation certain conditions must be fulfilled. The light has to be amplified as a result of the stimulated emission, which means that there have to be more carriers in the high energy state than in the low state. This is called population inversion. Furthermore this amplification has to be large enough to overcome the cavity losses. In other words, the actual lasing only exists after this amplification passes a certain threshold. This is expressed in the fact that the round-trip optical gain must be equal to one.

The second condition is that the light reflecting in the cavity has to have the same phase after one round-trip. This mechanism assures that a laser can only emit specific wavelengths.

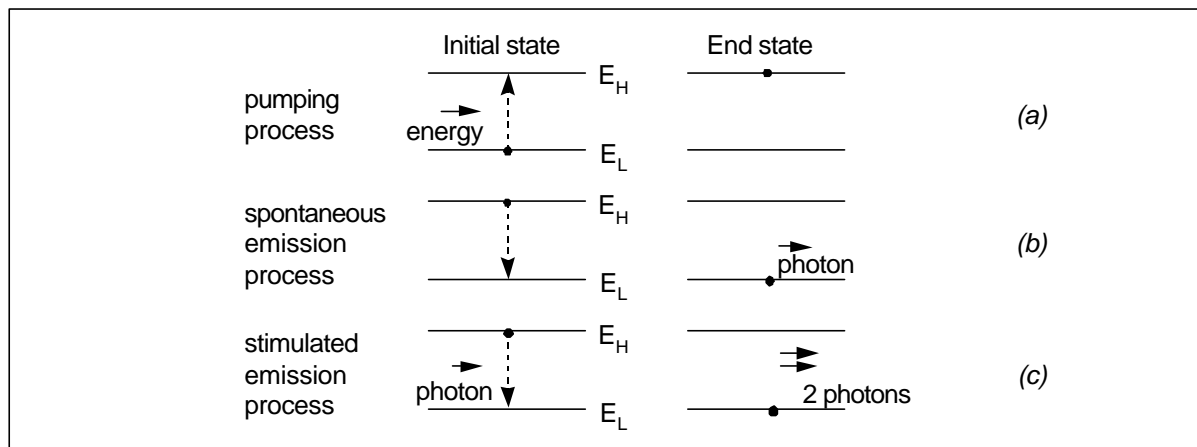


Figure 2-1: principle actions for laser operation: pumping (a), spontaneous emission (b) and stimulated emission (c)

In the case of semiconductor laser diodes, the laser medium consists of semiconductor material, mostly a combination of III-V materials such as aluminium (Al), gallium (Ga) and arsenic (As) with other materials such as indium (In) or phosphorus (P) added for doping. The material composition determines the energy levels in the semiconductor, which in turn determines the possible lasing wavelengths. In the case of telecommunication applications, materials such as InGaAsP are most frequently used because the emission wavelength (about 1550 nm, infrared light) coincides with the minimal losses of optical fibres. Systems for optical recording typically use a shorter wavelength, since it influences the size of one bit, which in turn determines the maximal data storage capacity. These applications typically use InAlGaP materials, which have an emission wavelength of around 670 nm (visible red light). A few years ago this set of materials was extended with the “nitrides” [2.1], a combination of gallium and nitrogen (GaN). These materials have emission wavelengths in the visible blue region of the spectrum and working laser diodes have been demonstrated with these materials [2.2].

In the case of semiconductor laser diodes, the waveguide is formed by using materials with a different index of refraction. This makes it possible to guide the generated light and improve the lasing operation since the light is primarily present in the regions with optical amplification. In the case of a Fabry-Perot laser diode, the mirrors of the cavity are formed by cleaving the semiconductor material. This creates a flat surface between the semiconductor and the surrounding air (the facet of the laser diode). In most cases this facet reflects 30% of the incoming light. Sometimes special coatings are applied to the surface in order to increase or decrease the amount of reflected light.

The pump mechanism for semiconductor laser diodes is achieved by injecting current into the semiconductor. The energy present in the current can pump carriers to higher energy levels, which enables stimulated emission and optical amplification. The amplification process can be enhanced by using quantum wells. This means that very thin layers of semiconductor material (only a few nm thick) are used. The small thickness creates quantum effects which confine the carriers to two dimensions instead of three. Therefore the injected current is better

controlled, which allows a more efficient pumping of the material, which in turn allows a larger optical amplification.

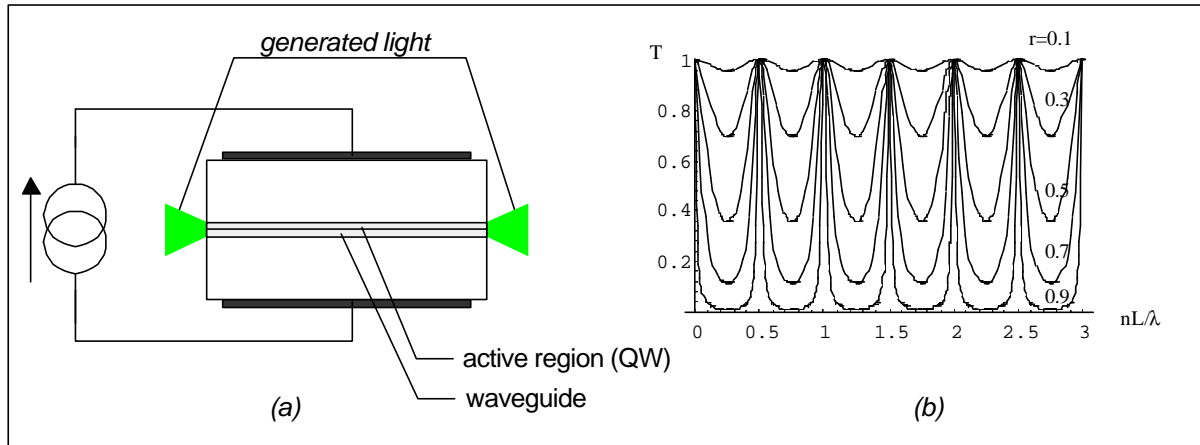


Figure 2-2: Left: cross-section of a Fabry-Perot laser diode. Right: the transmission of a Fabry-Perot cavity as a function of normalised wavelength.

In practice the semiconductor laser diodes do not emit a pure monochromatic light, although one of the lasing conditions stipulates that the phase of the light after one round-trip through the cavity must be identical. This is due to the fact that the energy levels (in between which the light generation is possible) are in fact energy bands, so that the spontaneous emission has a wide spectrum. In the case of a Fabry-Perot laser diode, the phase condition indicates that lasing operation is possible at a number of wavelengths determined by the material and the length of the cavity. Figure 2-2 shows a schematic cross-section of such a laser diode (a) and the resulting filter characteristic of the cavity (b). The ultimate lasing wavelength is determined by the combination of this filter and the shape of the optical amplification. Figure 2-3 shows an example of an optical spectrum of a Fabry-Perot laser diode used for optical recording systems.

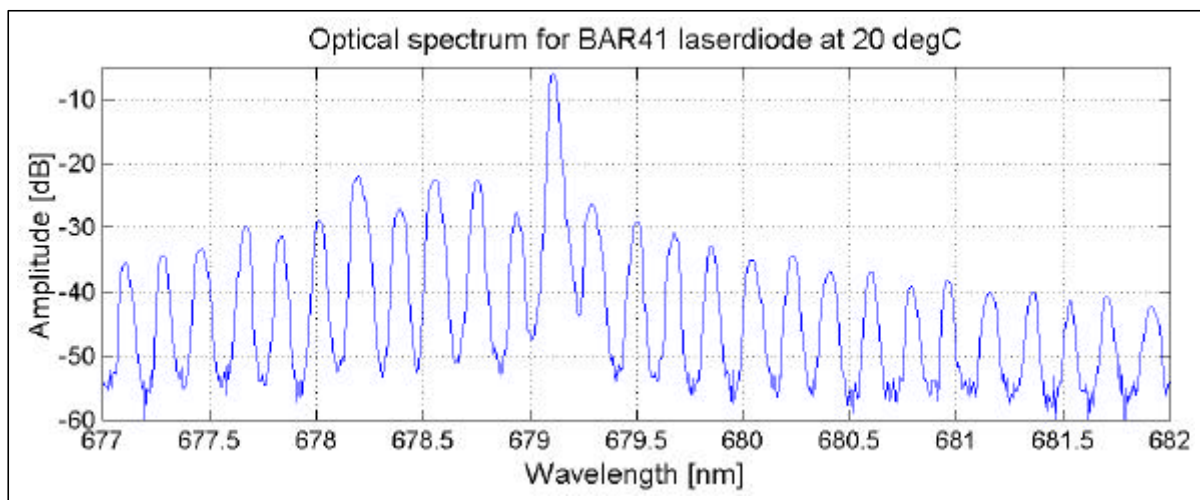


Figure 2-3: A typical example of an optical spectrum emitted by a Fabry-Perot laser diode used for optical recording.

The lasing wavelength (the mode with the maximum power) and the different cavity modes (the other peaks in the spectrum) are clearly visible. The cavity modes are possible lasing modes where the optical gain is not large enough to get above the threshold condition.

Recent developments in telecom are using WDM techniques, which stands for Wavelength Division Multiplexing. This technique modulates different signals on separate wavelengths and sends the combined signal through a single optical fibre. At the other side the signal is split according to wavelength and each signal is decoded. The technique can only work if the light emitted by the laser diode is sufficiently stable and pure.

Fabry-Perot laser diodes, such as in Figure 2-3, have a reasonable amount of power in the non-lasing modes due to the rather bad filtering characteristic of the cavity. This problem has given rise to a number of more complex laser diode designs which produce purer optical spectra. The DBR laser diode (“*Distributed Bragg Reflector*”), in which one facet mirror has been replaced by a Bragg-grating, is an example of such a laser diode (cf. Figure 2-4). The periodic structure of the grating causes a specific wavelength to reflect., which makes the filtering characteristic of the cavity more wavelength specific. Thus resulting in a more monochromatic laser light. A similar technique is used in the DFB laser diode (“*Distributed Feedback*”), though in this case the diffraction grating is present in the same waveguide as the active region, where it causes a wavelength-specific coupling between the forward and backward propagating waves.

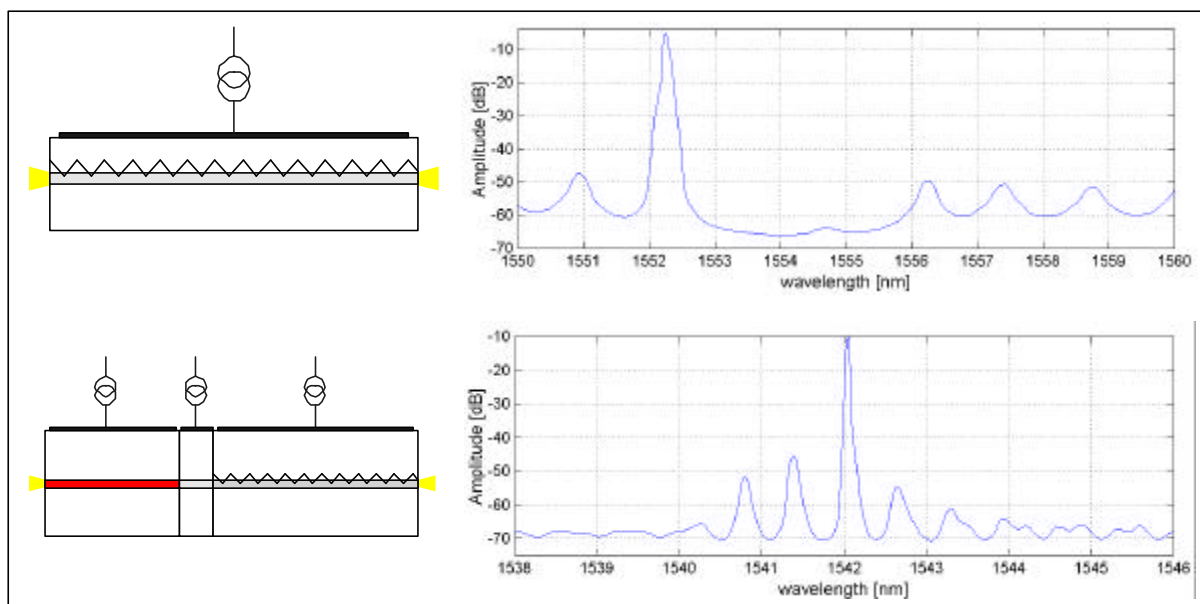


Figure 2-4: Cross-section of a DFB (top) and a DBR (bottom) laser diode, with an example of the optical spectrum for each diode.

Due to the breakthrough of WDM techniques, there has been an increase in the demand for and research activities on tuneable laser diodes. These laser diodes have certain advantages. First, if a tuneable laser diode is used as backup diode, it can replace the laser diode for all channels. If a regular (fixed wavelength) laser diode is used, the system manufacturer has to provide a backup diode for each wavelength channel. Secondly, in the case of wavelength routing (i.e. the wavelength of the signal determines its destination) the wavelength of the transmitter has to be switched, which is more easily accomplished when

tunable laser diodes are used. All this can only work if there are laser diodes with sufficiently large tuning ranges.

To realise this tuning range, new laser diodes have been proposed. In essence they replace the mirrors by complex structures containing diffraction gratings. The reflection wavelength of these structures can be modified using variable current injection. The most important examples of such laser diodes are the SSG-DBR (“*Super Structure Grating-DBR*”) [2.3], the SG-DBR (“*Sampled Grating-DBR*”) [2.4] and the GCSR laser diode (“*Grating assisted Coupler with Sampled Reflector*”) [2.5]. The research is aimed mainly at covering the large tuning range (already up to 100 nm [2.6], [2.7]) and filling the 30-40 nm wide communication range of erbium doped fibre amplifiers [2.8].

Figure 2-5 shows the cross-section of a SG-DBR laser diode and its complex wavelength tuning characteristic. The figure shows how the laser wavelength (vertical axis) varies as a function of the two currents through the mirrors. The grey scale indicates the purity of the laser light. Only the pale (almost white) areas are useable in WDM systems.

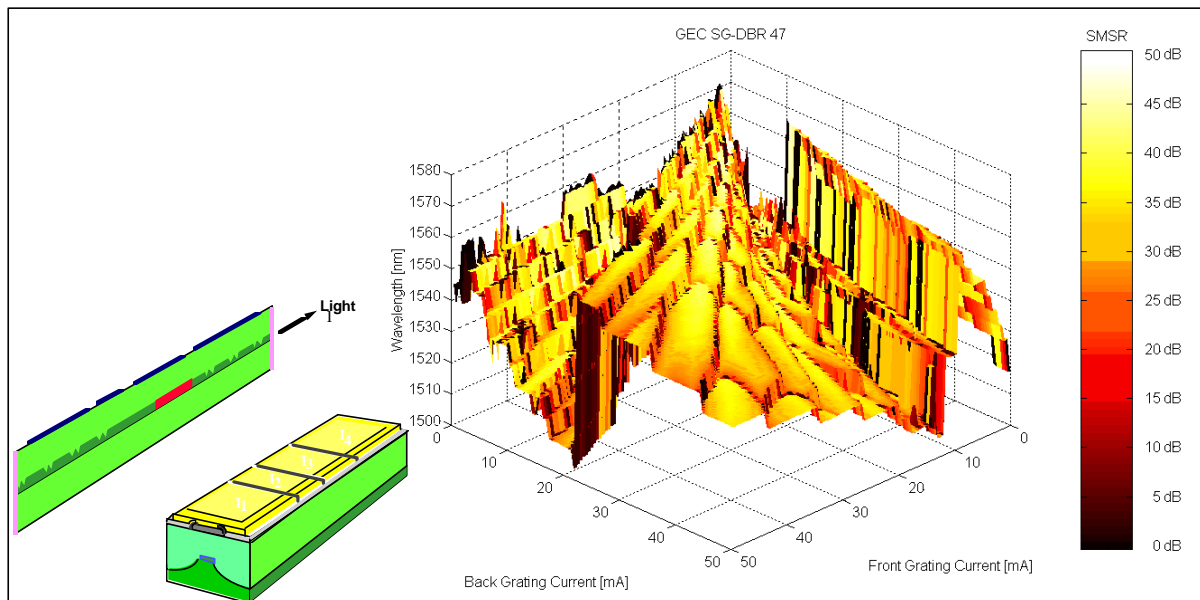


Figure 2-5: Left: the cross-section of a SG-DBR laser diode. Right: the tuning behaviour of the peak wavelength as a function of the current through the two mirrors (front and rear section). The grey scale indicates the purity of the emitted light.

2.3 Characterisation of components

2.3.1 Characterisation based on parameter extraction

Each characterisation process starts from measurements performed on the component. Usually this does not result in specific parameters but rather in a large set of results which is very often unpractical to use due to the size. In order to reduce this information to more reasonable proportions there are three possibilities: data reduction by fitting to mathematical models, data reduction by fitting to physical models or data reduction by combining the two previous methods.

The first method, the fitting to mathematical models, is data reduction in a pure form: it does result in a smaller amount of data but it does not change the usability of the data and neither does it change its interpretation; the parameters do not have any real significance with respect to the component. Such methods are not really useful for the component manufacturer or designer, who is mainly interested in the physical parameters and their influence on the component's behaviour. On the other hand this method does result in a component specification which can be used for further simulations, such as the simulation of a telecommunication link based on the component.

The second method, the fitting of physical models, also results in data reduction, but in this case the emphasis is more on the parameters (information transformation) than on the data reduction. A good knowledge of the parameters realised can provide insight into the operation of the component. Or to put it in other words: this knowledge can tell the manufacturer why the component does not perform as designed. This can only be so if the physical models used are sufficiently accurate.

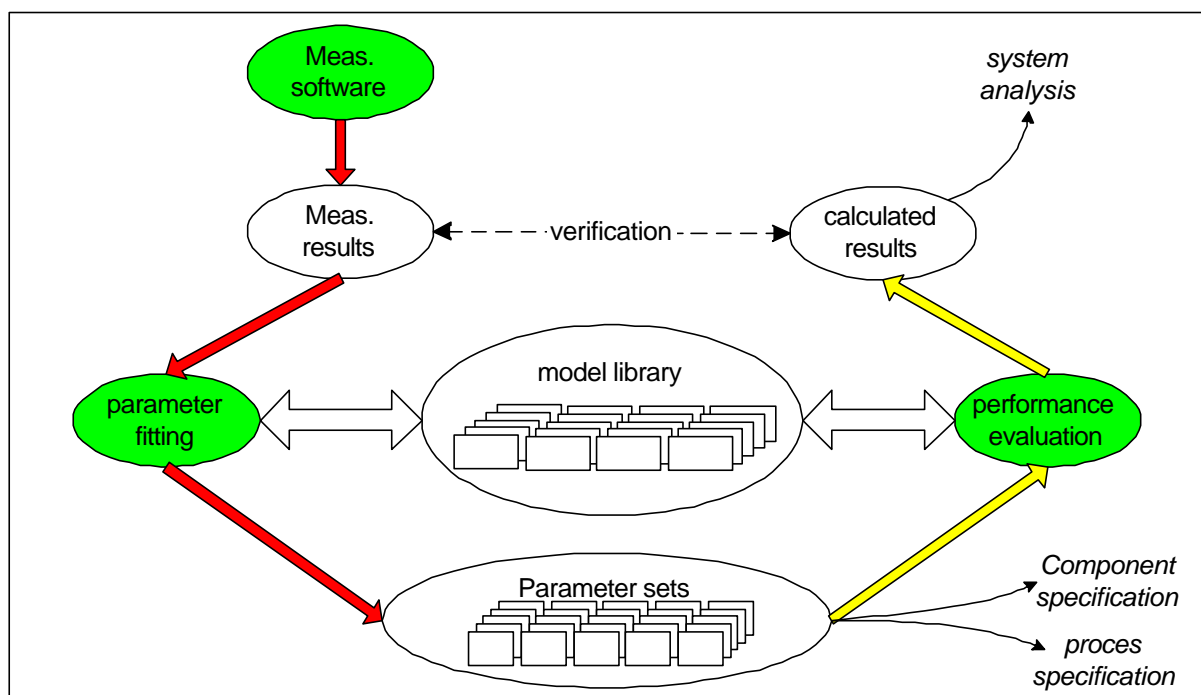


Figure 2-6: Schematic of a general characterisation strategy.

Figure 2-6 gives a schematic overview of such a characterisation strategy: by means of the measurement software a number of results are obtained for the component. These measurement results are transformed into parameters (left hand side of the figure) by means of several models (whether physical or not). This information in the form of parameters can be used by the manufacturer to characterise the component or the fabrication process itself. Once the parameter set is known, it can also be used to calculate characteristics based on the previously used models. These characteristics can in turn be used for further system simulations and system analysis.

The calculated characteristics can also be used to verify the consistency of the parameter set. The ultimate test for such a set is to predict a property of the component and to verify it by measuring the predicted characteristic. If this is possible, it can be concluded that the parameter set of the component is fully consistent and can be fully trusted.

2.3.2 The benefit of physical parameters versus mathematical values

2.3.2.1 For the component manufacturer

The benefit of physical parameters for the component manufacturer is rather obvious: the parameters used to design the component are physical parameters. If it is possible to determine the physical parameters of the particular manufactured component and compare them with the design values, valuable information on the production process can be obtained. Of course this all relies on the fact that the models used for the design and the parameter extraction are sufficiently accurate.

2.3.2.2 For the user of the component

As already mentioned, the parameter extraction will be used for data reduction. Which is necessary, especially when complex components are involved and when these components are typically used only at a few settings. For example, widely tuneable laser diodes are only used at the specific wavelengths required by the WDM grid. The solution involving storage of all measured points in a huge wavelength-current table is not very attractive from the production point of view. Furthermore this approach has the disadvantage that when the component behaviour (e.g. laser wavelength) changes due to ageing, then all points need to be recharacterised. Since the number of points is large, this is no sinecure and it will cause a long downtime for the component. The system user will either have to replace the component or he will have to accept the long downtime. Even when the component is replaced, this is not a favourable solution: the long characterisation time will result in high recalibration costs.

However if the knowledge of the component behaviour is based on physical parameters, the settings can be calculated by means of the corresponding model. The table option, as used in the pure mathematical data reduction option, can still be used, so it is up to the system manufacturer to compare the computing cost to the memory cost. But when ageing is taken into account the difference between physical and mathematical parameters becomes clear: certain physical parameters vary only very little with time or are even unaffected by the ageing process. For example, the grating period will not change during the life span of the component. This means, in the case of physical parameters, that it must be possible to do the recalibration with a shorter measuring cycle which will only determine the parameters that are affected by

ageing. The result will be that the downtime of the link, the recalibration time of the component and the associated cost will be reduced.

2.4 Measuring opto-electronic components

2.4.1 Direct measurements and indirect measurements

As with all components, a number of measurements are possible in the case of opto-electronic components. In this section some of the more general aspects of measurements and parameter extraction are discussed on the basis of a few examples. The specific situations for a number of laser diodes are presented in Chapters 4 and 5.

The measurements can be categorised according to complexity and according to information content. Measurements which at the same time are simple to perform and contain much information are most interesting when full characterisation is required.

With the currently existing measurement instruments, a large number of measurements can be classified as “simple”. Not really because the actual task is trivial but mostly because the constructors of the instruments have built good instruments with which even complex measurements can be accomplished at the push of a button. Measuring an optical spectrum or the relative intensity noise of a laser diode are examples of such measurements. Measurements that require the coupling of a (modulated) signal to the cavity of the component can be considered as “complex”. This is the case for electrical RF signals as well as for optical coupling of light into the laser diode.

The information content and the number of possible parameters to extract can vary a great deal. For example, the threshold current is a parameter which is very easy to extract (a linear fit performed on a power vs. current curve), but the relationship between the threshold current and the physical laser parameter is not straightforward. For this reason the threshold current will never be used for parameter extraction but will very often be used for the validation of a parameter set.

Other measurements such as relative intensity noise (RIN) and amplified spontaneous emission (ASE) are easy to perform (due to the available instruments) have a high information content, and at the same time lend themselves excellently for use in the extraction of physical parameters. The extraction methods used in this case are more complex but are quite feasible under certain conditions. In the case of the RIN measurements, the spectrum is a non-linear function of the physical parameters which can be reduced to a set of linear equations. In the case of the ASE, the extraction is done by fitting an analytical (non-linear) expression with a large number of parameters (typically ten or more) to the measurement results.

2.4.2 Intelligent methods for measuring

In the case of opto-electronic components with multiple sections the number of measurements increases drastically, especially when a full characterisation is required. However this is not always needed nor wanted in an industrial context. If the recalibration in case of ageing is not considered it can be a lot faster to measure only the “interesting” points. For example, only the points where the emitted light is pure enough are relevant in the case of laser diodes for optical telecommunication links. In other words it is possible to largely reduce

the characterisation time by determining the interesting points by means of a quick and simple measurement and perform the more complete characterisation only in those points.

In the case of a DBR laser diode it is possible to determine the position of the mode hops by measuring the optical output power as a function of the current through the active and Bragg sections. The theory on these devices teaches us that the interesting points for telecommunication applications (i.e. where the side mode suppression ratio (SMSR) is maximum) can be found in the centre between two mode boundaries. So once the mode hops and their boundaries are known the interesting points can be calculated and the full characterisation (accurate wavelength, linewidth, SMSR, RIN, etc.) can be performed in the limited number of points.

2.4.3 Combination of measurements as “aurea mediocritas” (golden mean)

Besides determining the measurement points in a clever way, the parameter extraction can use measurement combinations instead of depending on only a single measurement. As indicated in Section 2.5, the end result of a fitting algorithm and the time needed for reaching the optimum is a function of the quality of the starting values of the parameters used for optimisation. Choosing these values carefully is therefore a matter of great importance and can be done by using the results from other measurements. Because even if these results are only known within a large margin of uncertainty, they are probably better than a wild guess for the parameter value.

2.4.4 Combination of components as an extra possibility

In order to obtain a more complete image of a process, multiple variants of an opto-electronic component can be used since certain physical properties are only determined by parts of the opto-electronic component, such as the optical gain and the optical losses of the active layer. If the component variants originate from the same wafer they will have an identical active structure. Hence the simplest component (e.g. a Fabry-Perot laser diode) can be used to determine the properties of the active layer. The values can then be used for parameter extraction on more advanced or complex components such as DFB laser diodes.

2.5 Parameter extraction for opto-electronic components

2.5.1 Parameter extraction or fitting is a process with pitfalls

The process of parameter extraction or the fitting of models to measurement results with optimisation algorithms is a general problem and has been used in many disciplines for quite some time. In the literature the method of the least squares [2.9] is most often used for parameter extraction. All algorithms are based on an iterative process (often based on a gradient) to determine the parameter values that minimise an error expression (the cost function).

The actual fitting seems a simple task: it is “only” a matter of combining the appropriate mathematical model and the number of start parameters, and then starting the algorithm. The reality is less simple: the starting values of the parameters can also affect the

efficiency of the entire process and furthermore there is no guarantee that the solution found is “the correct” solution to the problem.

Optimisation problems in multi-dimensional spaces have a number of local optima and most of the algorithms used are local optimisation algorithms, which results in the fact that they will get stuck in some local optimum. More advanced methods, the so-called global optimisation algorithms, have a better chance of reaching the optimum but will require more iteration steps than the strictly gradient methods. These global methods work with a number of intermediate solutions [2.10], allow a increase in the cost function under certain conditions[2.11] or they try to enclose the optimum with a simplex (an N-dimensional volume) [2.12].

Furthermore finding the optimum (local or global version) does not mean that the correct physical solution to the problem has been found. For example, it is quite possible to find a reasonably good fit while the solution found is not realistic. This is due to the fact that the method does not optimise the parameters but rather the mathematical expression of the cost function. This function expresses a certain relationship between the parameters, the model and the measurement. Deviation of the mathematical model with respect to the reality can be recognised by the optimisation algorithm as an “optimum” and can lead to an incorrect solution.

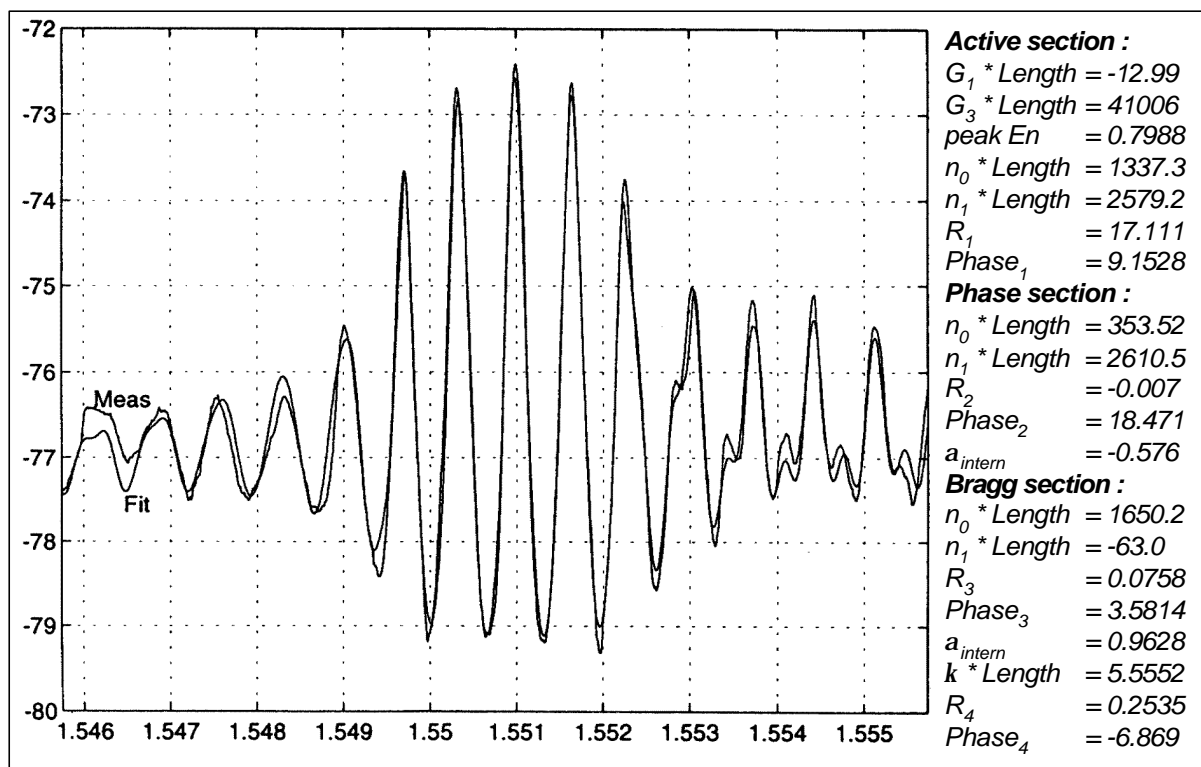


Figure 2-7: Measured and fitted amplified spontaneous emission spectrum for a DBR laser diode (intensity [dBm] versus wavelength [nm]). The parameter values used for the model are shown on the right.

Figure 2-7 shows such an example. After optimisation of the model for a DBR laser diode, the optimisation program realised a seemingly perfect fit. Inspection of the parameter values found, more specifically the value 17 for the reflection coefficient of the front facet (sixth parameter from the top), shows that the solution found is not physical. Such a value for the reflection coefficient is not possible (should be less than one) and can only be interpreted in

the physical sense that light from an external source has to be coupled into the laser cavity. A reflection coefficient of 17 indicates that more light is coming from the facet than there originally was going to the facet. Since this was not the case for the measurement, the only possibility is to conclude that it is a non-physical solution.

2.5.2 Physical parameters contain more information

To avoid mathematical pitfalls like Figure 2-7, some changes have to be made with respect to the optimisation algorithm. Since the model is dealing with physical parameters which are only realistic between specific boundaries (e.g. the reflection coefficient between zero and one), specific optimisation algorithms can be used. These methods discard all solutions found outside specified boundaries for the parameters. Although this method works, it does not use all information. In the case of the reflection coefficient, the information content is higher than the physical notion “between zero and one”. Since the reflection coefficient is a property of the physical transition of semiconductor material to air, possibly with an extra coating, the manufacturer can give a realistic value for the parameter (including an uncertainty margin on that value). It would be very inefficient not to use this available information.

In order to provide a general mechanism for adding such a priory information to an optimisation algorithm without having to develop a new algorithm each time, the cost function can be modified. Instead of only the traditional sum of the squared errors, extra terms are added. These convert the probability of a parameter to a certain cost value. Figure 2-8 shows an example of how to transform a known probability into a cost value. Other methods based on Gaussian expressions or other probability distributions are possible

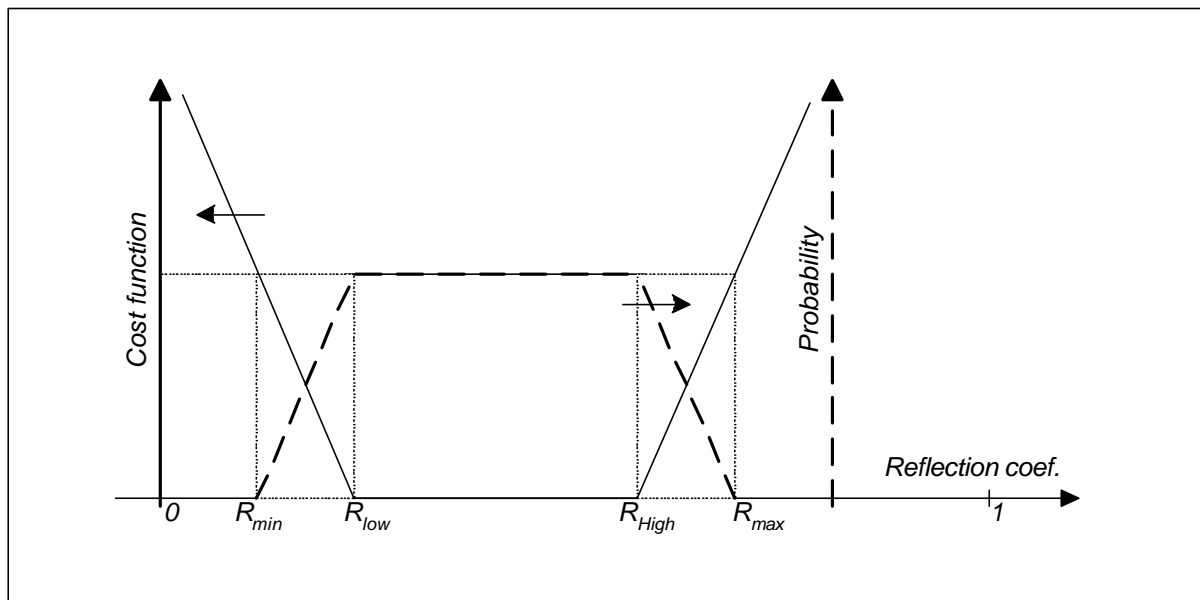


Figure 2-8: An example of a cost term based on a priori knowledge.

2.6 Consequences and goals for the measurement environment

2.6.1 Automation and good software design are needed

The picture presented of the measurement and characterisation of opto-electronic components (Sections 2.4.1 through 2.4.4) clearly shows that there is a need for advanced measurement applications. The amount and the complexity as well as the combination of the different measurements, makes automation essential.

Already in the design stage of the measurement software, a number of aspects have to be taken into consideration. It does not pay just to write measurement software. In order to combine the different results, the software components need to be designed carefully such that they can interact in a structured fashion. Furthermore the measurement software has to be designed such that it is almost independent of the instruments used. If this is not realised at the beginning of the software effort, the end result will be a number of fully functional components. However most parts will have to be modified, or even rewritten, every time an instrument is replaced by a similar instrument of a different manufacturer.

Section 2.4.2 showed that measuring an opto-electronic component with multiple sections is mainly a matter of repeating a measurement as a function of a varying condition (e.g. measuring the threshold current of a DBR laser diode as a function of the current through the Bragg and phase sections). The measurement software developed has to be adapted from the start to these kinds of conditions such that a certain measurement does not have to be implemented several times, each time as a function of a different parameter. Each measurement application (e.g. threshold current) has to be able to be used both as a stand alone application and as a plug in module in another application (e.g. one that varies a number of currents).

The discussion of the parameter extraction process (Section 2.5) showed that the software components used for this task will also have to be designed carefully. It is not acceptable that a new program should have to be developed for each combination of model, algorithm and cost function. Ideally an environment should be developed in which it is possible to replace or modify one component independently from the other. It must be possible to add an extra term to a cost function without modifying the algorithm or the laser model. The design should even go one step further: the user should be able to add a component (e.g. a model) without needing an in depth knowledge of the implementation details of the other components.

2.6.2 Requirements of a flexible environment

In order to realise the proposed goals for characterisation and parameter extraction and at the same time allow the flexibility needed for research situations the following parts are needed:

A strategy for characterising laser diodes, which can function as a roadmap to indicate how a full characterisation can be accomplished.

A multi-functional mechanical measurement set-up that makes it possible to perform the different and varied measurements on several laser diodes in all possible packaging shapes.

A good software environment and software strategy which will make it possible to develop measurement applications in a structured manner. These applications will be equipped with a graphical user interface (GUI).

A general strategy for instrument driver development which allows the implementation of measurement applications that are independent of the instruments used.

A general strategy for parameter extraction software which will make it possible to combine models, cost functions and optimisation algorithms in a simple and flexible fashion, preferably by graphical editing.

The strategy for laser diode characterisation is treated from a general viewpoint in Chapter 4, and more specific in Chapter 5 where the personal contribution to this strategy will be presented. The specific requirements from this strategy and the implementation of the measurement set-up developed are described in Chapter 6.

The software aspects with respect to the applications, the instrument drivers and the parameter extraction are presented from a theoretical point of view in Chapter 3. The applications and the implementation aspects are discussed in Chapter 7. The final evaluation of all these components is treated in Chapter 8, where they are applied to a number of practical situations.

2.7 Conclusion

This chapter has presented a short introduction to the operating principles of semiconductor laser diodes and recent developments in the field. The principles of component characterisation have been presented and applied to the specific case of opto-electronic components. Special attention has been given to the utilisation of parameter extraction for the characterisation of opto-electronic components.

A number of possible problem situations arising from the mathematical procedures have been illustrated. To avoid these mathematical though non-physical solutions, extra terms in the cost function have been proposed.

Finally, the most important requirements for a multi-functional and flexible environment for measuring and parameter extraction have been formulated.

-
- [2.1] Shuji Nakamura, Takashi Mukai, Masayuki Senoh, "Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes.", *Applied Physics Letters* 64, pp. 1687, 1994.
 - [2.2] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto, H. Kiyoku, "Room Temperature CW Operation of InGaN MQW Structure Laser Diodes." *Applied Physics Letters* 69, pp. 4056, 1996.
 - [2.3] Y. Tohmori, Y. Yoshikuni, H. Ishii, F. Kano, T. Tamamura, Y. Kondo, and M. Yamamoto, "Broad-range wavelength-tunable superstructure grating (SSG) DBR lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1817-1823, 1993
 - [2.4] V. Jayaraman, Z.M. Chuang, and L.A. Coldren, "Theory, design and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1824-1834, 1993

-
- [2.5] M. Öberg, S. Nilsson, K. Streubel, L. Bäckbom, and T. Klinga, "74 nm wavelength tuning range of an InGaAsP/InP vertical grating assisted codirectional coupler laser with rear sampled grating reflector," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 7, pp. 735-738, 1993
 - [2.6] Y. Tohmori, Y. Yoshikuni, H. Ishii, F. Kano, T. Tamamura, and Y. Kondo, "Over 100 nm wavelength tuning in superstructure grating (SSG) DBR lasers" *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 4, pp. 352-354, 1993
 - [2.7] P.-J. Rigole, S. Nilsson, L. Bäckbom, T. Klinga, J. Wallin, B. Stålnacke, E. Berglind, and B. Stoltz, "Access to 20 evenly distributed wavelengths over 100 nm using a single current tuning in a four-electrode monolithic semiconductor laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 11, pp. 1249-1251, 1995
 - [2.8] A.M. Gulisano, D.J. Robbins, P.J. Williams, P. Verhoeve, "Widely tunable sampled-grating DBR lasers to address 100 channels over 40 nm for WDM applications", *ECIO97*
 - [2.9] D. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters", *SIAM J. Appl. Math.*, Vol. 11, pp. 431-441, 1963.
 - [2.10] D. E. Goldberg, "Genetic algorithms in search, optimisation and machine learning", Addison-Wesley, 1989
 - [2.11] E. Aarts, J. Korst, "Simulated annealing and Boltzmann machines", John Wiley & Sons, 1989
 - [2.12] J.A. Nelder, R. Mead, *Computer Journal*, Vol. 7, pp. 308-313, 1965

CHAPTER 3

The abstract approach to the software design

3.1 Introduction

The term “measurement application” is traditionally used to indicate the software controls instruments, requests data and processes that data prior to saving the end result to disk. In the context of this thesis, the term “measurement application” has to be viewed in a larger perspective. For example, an application which takes data (from a file or a database) and performs parameter extraction on that data has to be seen as a measurement application, even though there is no measurement hardware involved.

Prior to examining these applications (both for controlling hardware and performing parameter extraction) this thesis will examine the general aspects of measurement applications. Indeed, a general strategy has to be defined for all components, if a general framework is envisaged. This will make it possible for all components to work together seamlessly.

This chapter will treat the software structures needed for classical measurement applications with emphasis on the communication aspects. These are instrument communication (Section 3.4) and the communications with other applications (Section 3.3). The last part of this chapter will explain the design of a general object model for parameter extraction software (Section 3.6).

3.2 General measurement software

A general measurement application can be considered as an “object” that has its own behaviour, state and structure. Furthermore it interacts or communicates with its environment. Communicating is more than the obvious communication with instruments (hardware) or data files (local or remote); a measurement application should also be able to communicate with another measurement application. If an advanced measurement (e.g. the linewidth of a laser diode) has to be performed as a function of certain parameters, it would be a waste of effort if it had to be implemented a number of times. It is quite imaginable that the linewidth of a laser diode has to be measured as a function of the bias current. This can be done by scanning through a range of currents or by measuring the linewidth in a specific number of bias conditions. If both applications (the scanning and the discrete setting) are able to communicate with the linewidth measurement application, it will not be necessary to implement the actual linewidth measurement multiple times. This method is currently not used. The common practice is to

implement each application separately (“linewidth”, “scan and measure linewidth”, “set and measure linewidth”, etc.).

Each measurement application must have two modes of operation: a stand-alone mode (i.e. the measurement on its own) and a plug-in mode (i.e. being used by another application).

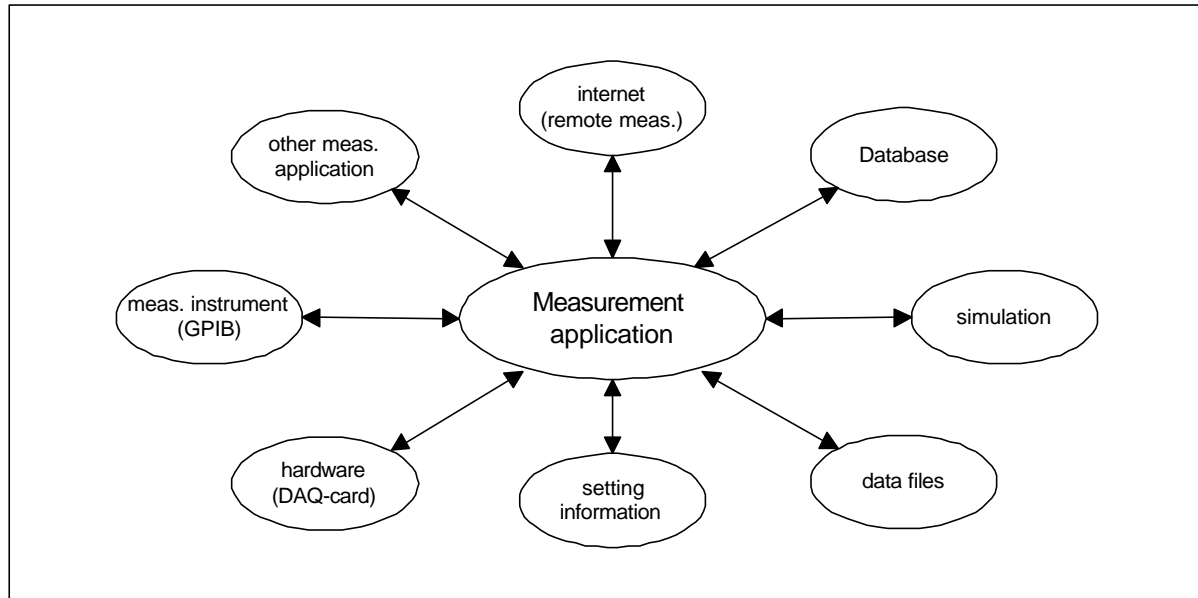


Figure 3-1: A number of possible ways to exchange information between measurement applications

Figure 3-1 gives an overview of a number of possible ways to exchange information between measurement applications. The centre of the picture represents the measurement application and the arrows indicate the information exchange. The current measurement world makes a difference between files, the Internet and databases, contrary to the classical software ideas, where they are considered to be identical and are called “data persistence”. For reasons of clarity, the options have been put separately on the figure. All the options shown in Figure 3-1, except three, have been investigated and realised in the course of this thesis. Only the DAQ hardware, the pure simulation and the database option were not realised.

This thesis classifies the possibilities from Figure 3-1 in two categories: communication with instruments (GPIB, DAQ, etc.) and communication with other applications (measurement applications, simulations, Internet and database). The storage of the data in a file on a hard disk is put in the second category, since a file can be seen as a very primitive database.

Communication with measurement instruments is hardware dependent and cannot be abstracted on first sight. Nevertheless some standards exist with respect to the actual communication between instruments, e.g. GPIB-bus, RS232 and RS485. From the software point of view this communication consists of calling a number of functions which will transmit the proper commands to the instruments. The implementation of the protocol itself is done in hardware and belongs to the responsibility of the GPIB-card manufacturer.

For this thesis it is assumed that the GPIB-bus is the only form of instrument communication. This assumption can be made since the GPIB-bus is the most widely spread instrumentation bus in the high-tech measurement world. Furthermore the assumption is valid, since the principles developed are extendible to the other communication protocols. Recently there have been a number of initiatives (under impulse of National Instruments) to implement a

common interface to the different protocols. This interface has been called “VISA” (“*Virtual Instrument Software Architecture*”) and allows the user to call uniform functions to send and receive information. The actual protocol (GPIB, serial, VXI, etc.) is only defined when the communication is initiated.

Although the communication cannot be abstracted because of the hardware definition, it is possible to define an abstraction on the instrument level, as will be explained in Section 3.4.

Communication between different applications and the storage of results or setting information is mainly a software issue and is therefore a good candidate for abstraction. By specifying a uniform inter object communication mechanism and specifying the corresponding software structures, the software framework can be armed against the unknown future. Furthermore abstraction will reduce the total software effort, since each application has to have only one interface to the common mechanism instead of a separate interface to all relevant applications. The common mechanism for inter application communication will take the same place as the GPIB-bus does for the hardware communication. Figure 3-2 shows a schematic overview of such a situation: to the end user nothing changes, even when he wants to realise a remote measurement or use a simulation tool instead of the measurement set-up.

This inter application communication has been realised by developing an uniform information structure that fulfilled the demands. The structure received the name ODIF (“*Opto-electronic Data Interchange Format*”) and was initially tested by the European project COST240.

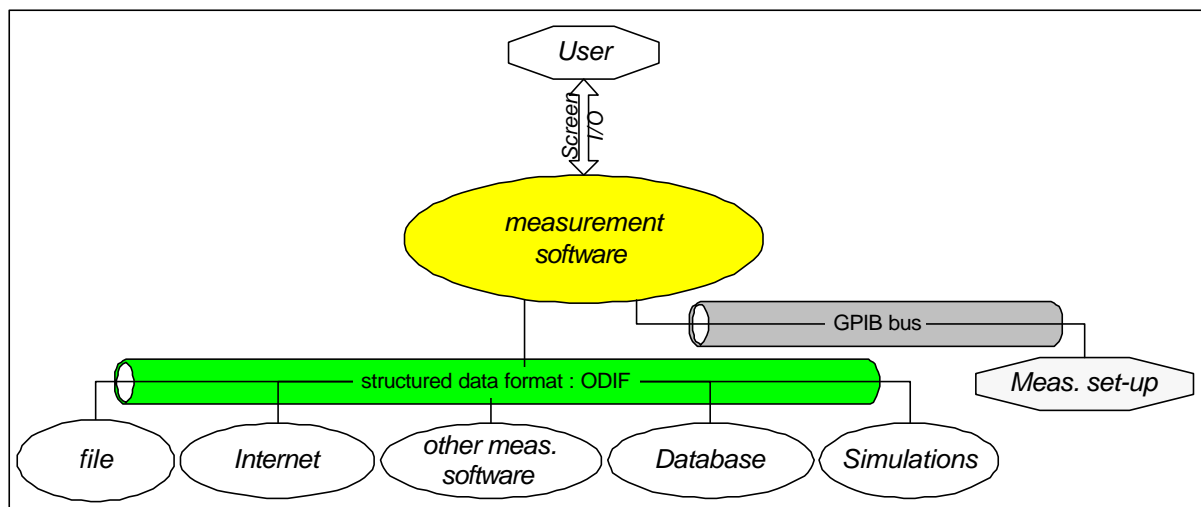


Figure 3-2: The principle of a uniform communication structure

3.3 Communication between applications

3.3.1 General principle of operation

Each measurement application has to be able to store its data (results of measurements or calculations) and preferably it has to be able to read the stored data at a later date for

inspection. Furthermore, it would be useful to store and read the information about the instrument settings and the (measurement) conditions. This would not only save the conditions (e.g. instrument settings, surrounding temperature, step size of numerical models, etc.) for later use, but it would also make it possible to perform the measurements or calculations at a later date under identical conditions.

In most cases, the setting information and the results are stored in separate files since they are considered to be two different kinds of information. This results very often in the loss of the link between the condition information and the results. Which in turn drastically decreases the practical use of storing the extra information.

If a structure can be defined that makes it possible to store the seemingly different items in a hierarchical manner, the link between the results and the setting information becomes almost unbreakable. Hence the practical use of these settings will increase enormously. Furthermore this approach will at the same time solve the inter application communication problem. The situation of “using another application” can always be reduced to the exchange of setting information and results. If two applications can exchange these things in a general and structured fashion, the inter application communication mechanism will be realised.

The same mechanism can also be used to realise remote measurements. The client measurement application sends a request to an Internet server which will pass it on to an identical server measurement application, which will perform the measurement and send the results back through the same mechanism (cf. bottom left on Figure 3-3). During the course of this thesis, measurements have been realised according to this mechanism. A user located in Brussels performed a measurement through the Internet on a laser diode that was located on the measurement set up in Gent.

Even one step further, performing a virtual measurement, is possible through this mechanism. The user sends a request and will get the result as an answer. In the case of virtual measurement the results are not acquired by performing a real measurement on a real set-up but they are obtained by performing certain calculations using simulation tools, probably coupled to a database for more realistic results (cf. bottom right on Figure 3-3).

The mechanism also reduces the number of applications: a measurement application can be used as client as well as server and the Internet communication kernel is common to all measurement applications. This results in the fact that not $5N$ applications (stand-alone, Internet client/server, database client/server) have to be developed to realise N measurements, but only $N+2$ (the actual measurement applications and the Internet/database kernel).

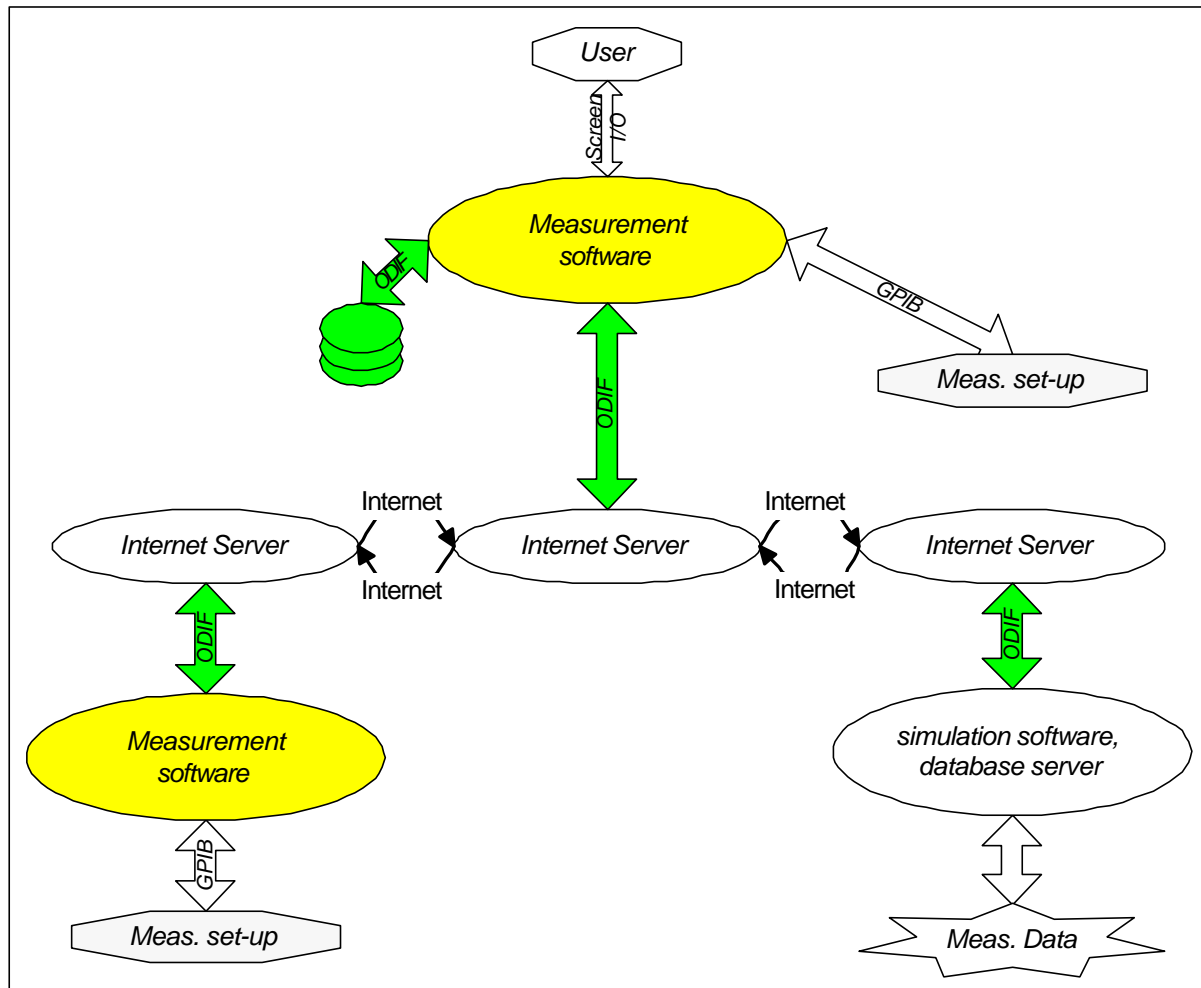


Figure 3-3: The communication structure for measurement applications

3.3.2 ODIF, a hierarchical information structure

This section will describe the principle and the formal definition of the hierarchical information structure. The structure has been developed in the context of this thesis and has been initially tested by the COST240 project. More elaborate information on the subject (with a description of all levels and examples) can be found on the ODIF information website [3.1] and in the final report of the European COST240 project [3.2], of which appendix A gives a detailed overview of the structure. For the clarity of this work, the appendix of that book has been duplicated as appendix A of this thesis; an electronic copy of the Internet site can be found in appendix D.

3.3.2.1 The principle of a formal syntax description

Formulating a general structure which allows different applications to communicate and has guarantees for the future can only be done by defining the structure in a formal way. This technique can describe a strict structure without loose from any software considerations, which would compromise the realisation of an at the same time strict and flexible structure.

The formal description offers a structure wherein the information can be organised, similar to the syntax description of a programming language which offers a method for writing

down programs. The formal syntax does not describe the information in the file nor does it describe methods to match the data onto the structure. This is similar to programming languages where the syntax does not describe which programs can be implemented.

Just like there are several ways to implement an algorithm in a programming language, there are several ways to store identical information inside the formal information structure. For example, a user can consider the environment temperature to be a setting point where another user will think of the temperature as a value measured. One user can use the letter “L” to indicate the length of a component where others might prefer the word “length”.

The application of the formal syntax description for files used by specific applications has to be looked at separately in each specific case. This implies that the user has to watch out for inconsistencies over the entire set of applications. For example, if one application assumes that “T” stands for a temperature, an another application assumes that it stands for a time indication, misinterpretation of the information is possible and errors can be made.

3.3.2.2 *The general structure of ODIF*

The proposed syntax is in essence an ASCII based hierarchical structure to store information. The structure of ODIF starts from the point that information can be classified in blocks, which are stored in a hierarchical structure.

The information can be divided in two main categories: information about the component (i.e. the semiconductor laser diode under test) and information obtained from experiments (i.e. measurements, modelling calculations of results from parameter extraction). Inside ODIF the first category leads to a “*parameter block*” where the second category will respectively lead to a “*measurement block*”, a “*model block*” and an “*extraction block*”.

The category parameters contains the data directly in a structured way, organised in the form of lines with numbers of tables. The blocks of the second category (measurement, model and extraction) contain the results and information about the settings. The results are appearing under the form of lines or tables, as it is the case for the parameter blocks.

The similar internal structure of the blocks results in the fact that the syntax is relatively simple (only very few rules) while at the same time being powerful enough to cope with possible future extensions. A recent example of this extension is the usage of ODIF to describe layer structures of laser cavities.

3.3.2.3 *Introduction to the formal notation*

The formal notation uses a meta language which describes the format using a top down approach. This method (originally presented by Wirth [3.3]) describes the syntax in an abstract way by using “non-terminal” symbols, i.e. symbols that do not appear in the resulting file. These non-terminal symbols are expanded in several steps until the “terminal” level is reached where the actual symbols are defined as they appear in the files (cf. appendix A).

To express the resemblance between the different blocks in the syntax and to keep the formal notation compact, the non-terminal symbols have received a formal parameter which is noted as an index. To make the difference between the symbols and the formal parameter very clear, the formal parameter is noted in *italics*.

The formal notation is based on the following rules:

- non-terminal (abstract) symbols are printed in bold face (e.g. **file**)
- terminal symbols are denoted between double quotes (e.g. “begin”)
- the succession of symbols is denoted by juxtaposition
- if the syntax allows a choice the different symbols are separated by a vertical line (e.g. “a” | “b” means that “a” is allowed, “b” as well but not “ab”)
- a symbol enclosed by square braces can appear once or zero times. (e.g. [“a”] indicates that nothing or “a” is valid, but that “aa” is not allowed)
- something enclosed by curly braces can appear zero, once or multiple times (e.g. {“a”} means that nothing, “a”, “aa”, “aaa”, “aaaa”, etc. are valid).
- conditional expressions are denoted using the following convention:

parameter	! value 1	?	result 1 ;
	! value 2	?	result 2 ;
			default result

3.3.2.4 The formal syntax description of the highest levels

Although the actual syntax description defines the symbols down to the lowest level (e.g. the specification of **Text**, **Table**, **Name**, etc.), this section will only treat the higher levels. “Higher” has to be interpreted as the levels which form the actual structure to contain the information.

Class = “File” | “Global” | “Parameter” | “Model” | “Measurement” | “Extraction” | “Setting” | “Data”

File = **Block** “File”

Block_{Class} = “@” *Class* “.” **Begin**_{class} *Name*_{class} **Newline**
Body_{Class}
 “@” *Class* “.” **End**_{class}

Body_{Class} =
Class ! “File” ? { **Set**_{“Global”} } ;
 ! “Data” ? { **Comment** } (**Table** | { **EntryLine** }) ;
 ! “Setting” ? { **SettingLine** | **SourceLine** | **Comment** } { **Set**_{Setting} } ;
Content_{Class} **Set**_{Class}

Set_{Class} = **Block**_{Class} | **Include**_{Class} | **Comment**

Content_{Class} =
Class ! “Global” ? { **Set**_{“Parameter”} } { **Set**_{“Model”} | **Set**_{“Measurement”} | **Set**_{“Extraction”} } ;
 ! “Parameter” ? ({ **SettingLine** | **SourceLine** } | **Set**_{“Data”}) ;
 { **Set**_{“Setting”} } { **Set**_{“Data”} }

The definitions for **Begin**_{Class}, **Name**_{Class}, **End**_{Class} en **Body**_{Class} are dependent on the formal parameter and have to be interpreted for the case *Class* = “File”. The appropriate rules are indicated by the grey background:

```
Beginclass = Class ! “File” ? “Title:” ;
“Begin”
```

```
Nameclass = Class ! “File” ? Text ;
! “Data” ? DataEnum RefName ;
! “Setting” ? LabName RefName ;
[RefName]
```

```
Endclass = Class ! “File” ? “End” ;
“End” [Comment] Newline
```

```
BodyClass =
Class ! “File” ? { SetGlobal } ;
! “Data” ? { Comment } ( Table | { EntryLine } );
! “Setting” ? { SettingLine | SourceLine | Comment } { SetSetting } ;
ContentClass SetClass
```

According to the last definitions, the content of the “File-Block” is given by a succession of “Global Sets” which translate into a “Global-Block” according to the assumptions made at the start of this example. Figure 3-4 shows how the file looks like at the highest level. It should be noted that although the syntax rule describes the “name” of a file as “text”, it is the intention of the syntax that this text has the function of a title. This means that it should give a short description about the contents of the file. This intention however cannot be imposed by a formal syntax.

```
@File.Title: This is an example
    <here comes the information in a "global Block">
@File.End
```

Figure 3-4: The highest level of the example file

The description of the “Global-Block” can be derived from the same rules but this time the formal parameter *Class* has the value “Global”.

```
Beginclass = Class ! “File” ? “Title:” ;
“Begin”
```

```

NameClass = Class ! "File" ?      Text ;
                ! "Data" ?      DataEnum RefName ;
                ! "Setting" ?    LabName RefName ;
                [RefName]

```

```

EndClass = Class ! "File" ? "End" ;
                "End" [Comment] Newline

```

```

BodyClass =
  Class ! "File" ?    { Set"Global" } ;
                ! "Data" ?    { Comment } ( Table | { EntryLine } );
                ! "Setting" ? { SettingLine | SourceLine | Comment } { SetSetting } ;
                ContentClass SetClass

```

The content of **Body**^{"Global"} is in this case defined by a new rule:

```

ContentClass =
  Class ! "Global" ? { Set"Parameter" } { Set"Model" | Set"Measurement" | Set"Extraction" } ;
                ! "Parameter" ? ( { SettingLine | SourceLine } | Set"Data" );
                { Set"Setting" } { Set"Data" }

```

In other terms, a "Global Block" consists out of a "Parameter Block", followed by one or more "Model", "Measurement" or "Extraction Blocks". Under the assumptions of the example, made for simplicity and clarity, this means that only a "Model Block" is present. This does not harm the validity of the example since a "Model", "Measurement" and an "Extraction Block" have an identical structure, which can be derived from the fact that there is no specific rule for a "Model", "Measurement" or an "Extraction Block" in the definition of a **Block**_{Class} nor is there one in the definition of the **Content**_{Class}. The blocks are defined by the default rule which is identical for the three blocks. Figure 3-5 shows the content of the example file after interpretation of the rules specifying the begin and end lines of the "Parameter Block" and the "Model-Block".

```

@File.Title: This is an example
  @global.Begin
    @Parameter.Begin
      <parameter content>
    @Parameter.End

    @Model.Begin
      <Model content>
    @Model.End
  @Global.End
@File.End

```

Figure 3-5: The information structure of the example file

The content of a “Parameter-Block” is again specified by the same definition, but this time the formal parameter *Class* takes the value “Parameter”:

```

ContentClass =
  Class ! “Global” ? { Set“Parameter” } { Set“Model” | Set“Measurement” | Set“Extraction” };
  ! “Parameter” ? ( { SettingLine | SourceLine } | Set“Data” );
  { Set“Setting” } { Set“Data” }

```

The content of a “Parameter-Block” consists of either a number of information lines (**SettingLine** of **SourceLine**) or it consists of a **Set**^{“Data”}. The first option contains the information under the form name, value and unit (cf. appendix A for more details); the second option is defined through the **Set**_{Class}, the **Block**_{Class} and eventually the **Body**_{Class} definition.

```

BodyClass =
  Class ! “File” ? { Set“Global” };
  ! “Data” ? { Comment } ( Table | { EntryLine } );
  ! “Setting” ? { SettingLine | SourceLine | Comment } { SetSetting };
  ContentClass SetClass

```

In other terms, a “Data-Block” can consist out of either a table with data or a number of lines with information. The further definition and interpretation of the lower levels is available in appendix A.

The content of the “Model-Block” is also given by the following rules: **Set**_{Class}, the **Block**_{Class}, the **Body**_{Class} and eventually the **Content**_{Class}, where the formal parameter *Class* has the value “Model”.

```

BodyClass = Class ! “File” ? { Set“Global” };
  ! “Data” ? { Comment } ( Table | { EntryLine } );
  ! “Setting” ? { SettingLine | SourceLine | Comment };
  ContentClass SetClass

```

```

ContentClass =
  Class ! “Global” ? { Set“Parameter” } { Set“Model” | Set“Measurement” | Set“Extraction” };
  ! “Parameter” ? ( { SettingLine | SourceLine } | Set“Data” );
  { Set“Setting” } { Set“Data” }

```

The rules indicate that each “Model”, “Measurement” or “Extraction Block” consists out of a number of “Setting Blocks”, followed by a number of “Data Blocks”. These “Data Blocks” have per definition an identical structure with respect to the “Data-Blocks” which are used inside the “Parameter-Blocks” and the “Setting-Blocks” are again defined through the **Body**_{Class} rule.


```

BodyClass = Class !“File” ? { SetGlobal };
                !“Data” ? { Comment } ( Table | {EntryLine } );
                !“Setting” ? { SettingLine | SourceLine | Comment };
                ContentClass SetClass

```

The end result is shown in Figure 3-6.

```

@File.Title: This is an example
  @global.Begin
    @Parameter.Begin
      Length      300      um
    @Parameter.End

    @Model.Begin
      @Setting.Begin [MyEx] <calc_set>
        MaxIter    1000    -
      @Setting.End
      @Data PI <Power_calc>
        I          P
        mA         mW
        0.0        0.0
        1.0        0.3
        2.0        1.5
      @Data.End
    @Model.End
  @Global.End
@File.End

```

Figure 3-6: The end result of the ODIF file example

3.4 Communication between applications and instruments

3.4.1 The classical approach: the instrument driver

Each measurement application has to collect measurement data by communicating with the measurement instrument used, that can take multiple forms. The measurement instrument can be an in house made piece of hardware, it can be a commercially available instrument or even a combination of different instruments. Despite the changing appearance of the instrument used, all communication can be reduced to a “request” from the measurement application to perform a task (a measurement, passing the results, etc.) followed by an answer from the instrument.

The software which takes care of sending the proper commands to the instrument (using the correct protocol) is called the instrument driver. In most case such a driver contains detailed knowledge of the complicated question-answer procedure for the instrument and will use general communication software to send the information over the physical hardware busses (e.g. GPIB).

3.4.2 *The principle of the functional instrument driver*

The concept of the instrument driver needs to be revised, in order to safeguard a measurement application from the ever changing market of measurement instruments and to ensure that an instrument replacement or buying a new instrument does not cause a large number of software modifications for the applications. Instead of communicating with the instruments through an instrument driver, the application will use an abstract instrument driver (cf. Figure 3-7). This abstract instrument driver can be seen as a “*general instrument driver*” for a certain kind of instrument (e.g. optical spectrum analysers, current sources, etc.). In other terms it will create an interface between the measurement application and the different instruments in an abstract way. The terms “*instrument driver interface*” or “*interface instrument driver*” could also be used instead of “*general instrument driver*”. To make the link with the measurement world and the physical instruments more clear, the term “*functional instrument driver*” (FID) was proposed. The other alternative “*general instrument driver*” gives the impression that it not only groups a certain kind of instruments (e.g. current sources) but that it groups “all” instruments. The term “*functional instrument driver*” does not do this and has as major advantage that it links the driver concept with the functionality of the instrument.

By introducing the functional instrument driver, the implemented applications are decoupled from the instrument drivers, thus also coupled loose from the actual used hardware. For example, measurement application can use an abstract current source and set a specific current where in reality a voltage source with resistor or even a data acquisition card is used. All this without the need that the measurement application even knows any details on the specific hardware.

Together with the decoupling the functional instrument driver creates the situation that adding or modifying the instrument hardware does not affect the measurement application software. In the case of the functional instrument driver only the FID for that specific kind of instrument needs to be updated, not all measurement applications which use that instrument.

Furthermore it can be interesting to use the functional instrument driver to provide intelligence, besides taking care of the abstraction of the functions and the storage of the address information for each instrument. If the functional instrument driver keeps track of which settings are performed, it can decide not to execute unnecessary settings and save valuable measurement time. For example, a functional current source can decide not to execute the “current on” command when the current is already flowing. This will improve the execution speed of inefficiently programmed applications. Such intelligence in instrument drivers is also called “*state caching*” and commercial companies like National Instruments are currently investigating whether it is possible to incorporate similar structures in their commercial packages.

Through this mechanism, the functional instrument driver makes it possible for less experienced programmers to create measurement applications that are instrument independent and that contain a certain amount of intelligence to increase execution speed. Especially in a research environment this is a major advantage since in that case most of the programmers are occasional programmers. Primarily they just want a working implementation, contrary to the more traditional software world where besides the aspect of “working” also attention is spent to aspects of efficiency, maintenance and reusability.

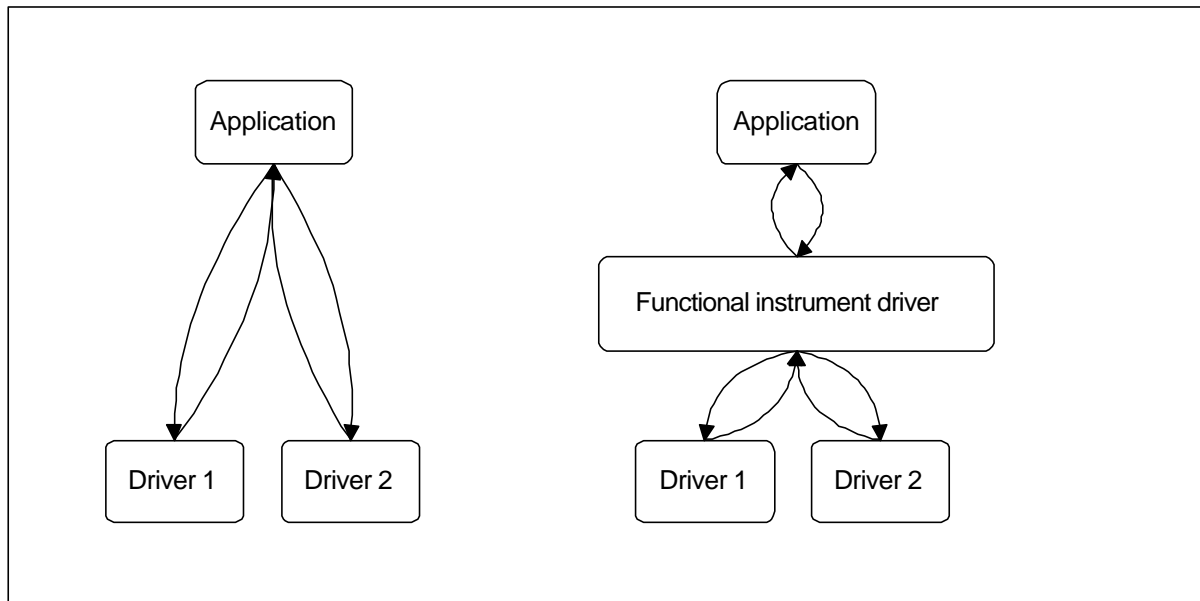


Figure 3-7: The principle of the functional instrument driver

3.4.3 The functional instrument driver: the object model

In a first approach the functional instrument driver can be seen as a collection of functions, that are called by the measurement applications. The functional instrument driver will convert these general function calls to a specific function call for a specific instrument driver which will perform the specific GPIB communication with the instrument.

But the functional instrument driver is more: when the abstraction of the instrument has to be as large as possible, the application should not be bothered with technical details such as the GPIB address or the co-ordinates of the module in a modular instrument. It is up to the functional instrument driver to provide a translation from the instrument reference used by the application to the necessary address information for the specific instrument driver. Furthermore the design has to be done such that only one version of a specific instrument driver needs to be implemented. This even when more instruments of the same type are being used (each with a different GPIB address).

Each of the mentioned properties will lead to an object when the object model is drawn for the functional instrument driver. The main part of the object model is the *FIDinterface* class which will take care of the function abstraction by providing a set of uniform functions for each task. The specific implementation for each instrument type are the derived classes: *SpecificInstrument*.

To store the GPIB addresses and co-ordinates of a module, a generic class *InstrLocation* is being used. The *FIDinstrument* class is derived as an extension from the generic class, it will contain the specific instrument attributes. For example, time-out, delay, maximum value, etc.

Since the *FIDinterface* class has to be able to take care of multiple instruments at the same time, it will not be used directly. The *FIDinstrument* class will be contained in a *InstrMemory* class, which will make sure that multiple *FIDinstrument* objects can be stored in one *FIDinterface* object. Figure 3-8 shows the entire object model according to the notation method formulated by Rumbaugh [3.4], [3.5].

The implementation of this object model is treated in Chapter 7.

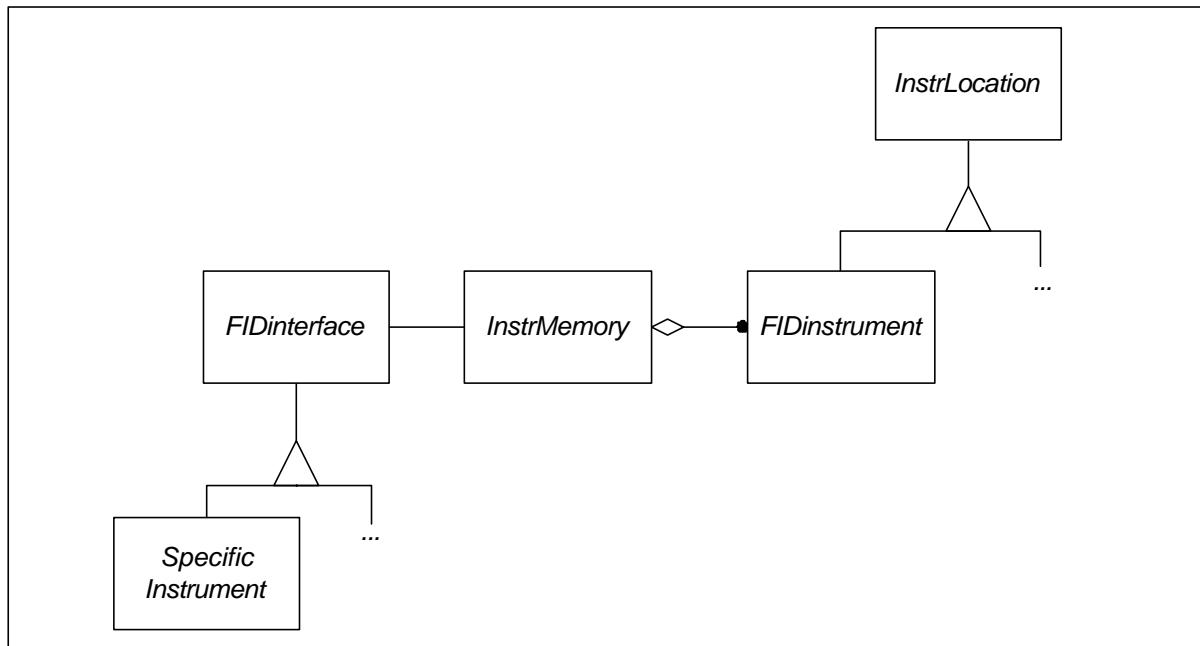


Figure 3-8: The object model for the functional instrument driver

3.5 Short introduction to the notation method of Rumbaugh

This thesis chose for the notation method of Rumbaugh to write the object models. Without trying to be complete, this section will give an overview of some syntax elements that are being used in this text. A more complete description can be found in the original book by Rumbaugh [3.4] or a more recent publication by Martin and Odell, where Chapter 25 gives an overview of several methods [3.5].

The method denotes the different objects as rectangles which are connected by lines to indicate the different relations between them. The ends of these lines can have several symbols to express certain aspects of the relationship. In the context of this work two symbols are used: a circle and a rhombus. An overview of the used combinations is given in Figure 3-9.

A black circle indicates that the relationship has “one or more” multiplicity, a white circle indicates that the relationship is optional (“zero or one”) and no circle indicates that the relationship means “exactly one”.

The use of the rhombus indicates that it is not only a relationship but that the object (on the side of the rhombus) contains the other object. The rhombus can be combined with the circle to indicate the multiplicity of the relationship. A typical example is the cost function which will always contain one or more cost terms.

The third symbol used to describe a relationship between two objects is the triangle. This indicates the object connected with the bottom of the triangle is an extension of the object connected to the top of the triangle. This is used to express inheritance, the bottom object is derived from the object on top.

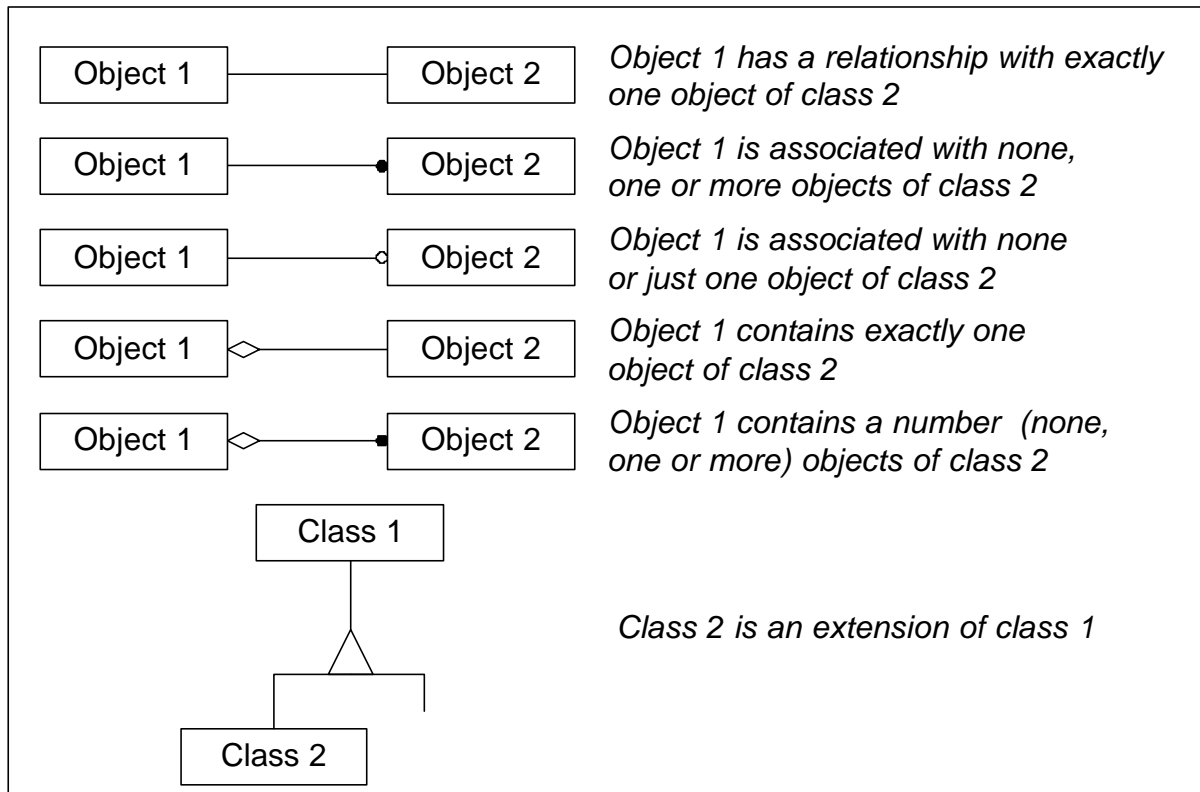


Figure 3-9: Used conventions for object models

3.6 An object model for parameter extraction

3.6.1 The classic functional approach to parameter extraction

In its basic form each parameter extraction can be seen as the combination of a mathematical model (possibly analytical), an amount of measurement data, an optimisation algorithm and an expression of the error between the calculated and measured data. The optimisation algorithm will propose a new parameter set, evaluate the error and define another parameter set according to the error expression. When the error is sufficiently small or when too much iteration steps have been taken, the algorithm will stop. In the first case there is conversion to the solution in the second case not.

Traditionally the optimisation algorithm uses the cost function (the error expression) and the model is built into that expression. The consequence of this approach is that a separate program has to be written for each combination of a model, cost function and optimisation algorithm. This situation is not interesting for the comparison of several combinations and each user has to be an expert to make changes to the program.

3.6.2 The first approach to an object model

The main purpose of this object approach to parameter extraction is to make sure that a new combination or a new model/optimisation algorithm does not imply changes to the rest of

the application. Furthermore the object model has to allow changes to the program without requiring full detailed knowledge about the entire application. If possible some of the implementation tasks should even be accomplished by code generators. For example, adding a new laser model should only be a matter of specifying its properties (name and parameters) and completing the automatically generated code with the actual calculation code.

In order to propose an object model for parameter extraction the strong intermixing between the three components (model, cost function and optimisation algorithm) has to be destroyed. Under the assumption that the optimisation algorithm, the laser model and the cost function will be separate objects, the parameters will be attributes of the laser model. This is in contradiction to the functional approach where the parameters are considered to be an input for the cost function. In other terms the parameters belong to the laser model and the outside world (i.e. the optimisation algorithm) can only access their value by means of a specific interface. On the other hand it can be stated that the parameters which are being optimised belong to the optimising algorithm, as well as they belong to the laser model. Figure 3-10 shows how the evaluation of the cost function is changed in the object approach. Instead of passing the proposed parameter values through the cost function and getting the result (left hand side of the figure), the object approach will evaluate the cost function in two steps (right hand side of the figure). First it will pass the values of the parameters to the model and subsequently it will calculate the cost function, which will evaluate the model. Please note that no laser model parameters are involved in the actual interaction between laser model and cost function.

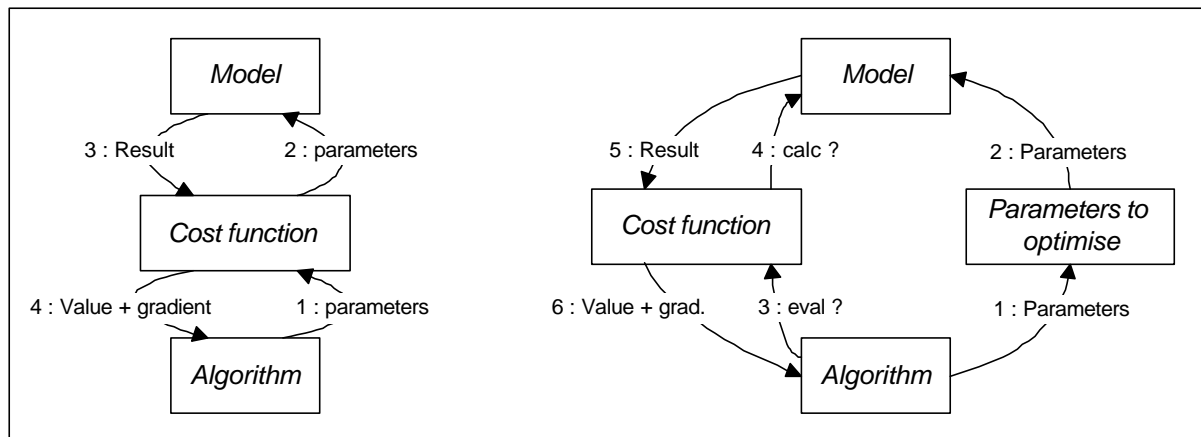


Figure 3-10: Traditional look at parameter extraction (left) and an object approach (right)

3.6.3 The relationship of the laser model to the optimising algorithm

The relationship between the laser model and the optimising algorithm is given by the parameters which have to be updated during the execution of the algorithm. The relationship is used for two purposes: on one side it will indicate which parameters are to be optimised, on the other side it will make sure that the values of the parameters can be passed in two directions (algorithm to model and vice versa).

This means that the optimisation algorithm has to get access to the internal parameters of the laser model while at the same time the object model has to be designed such that the optimisation algorithm has no knowledge on the internal structure of the laser model. The laser model has to “give” its parameters to the outside world, without having any information on the

structure of that outside world. In other terms an abstract mechanism will have to be designed to solve this issue.

The solution is to define two classes, one to export the value of the parameter, and a second one to access the value of the parameter. These classes were called respectively “*ExportParam*” and “*AccessParam*”. The result of the object modelling for this relationship is shown in Figure 3-11. In the literature this construction matches the “impedance mismatch” problem [3.6], a problem that typically arises when two systems have a different view on the same thing.

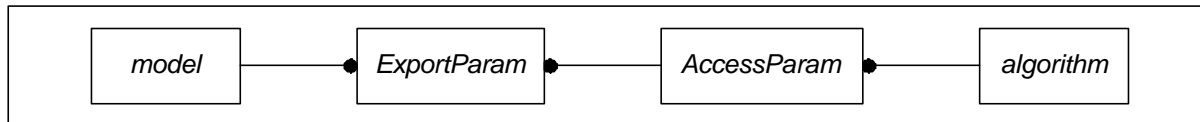


Figure 3-11: Model for the relationship between laser model and optimising algorithm

The proposed model does not only solve the abstraction, it also allows to solve the multiplicity issue, a problem that arises when multiple laser models are optimised at the same time. In that case it is possible that the models have shared parameters. Each laser model has its own *ExportParam* object for the shared parameter but the optimising algorithm will only have one parameter value to optimise and thus have only one *AccessParam* object. An example of this situation is shown in Figure 3-12.

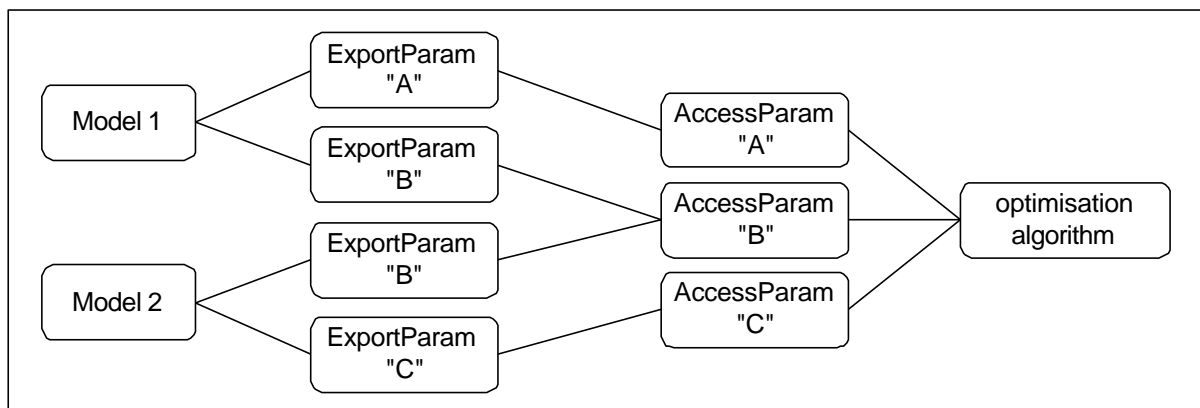


Figure 3-12: Implementation example of an optimisation situation with the multiplicity problem

In practice this solution is not sufficient. When optimisation algorithms are used, it is better to make the parameter values used by the algorithm of the same order of magnitude. This increases the numerical stability of the optimisation algorithms. Such scaling factors could be built into the laser models but this would make the laser models dependent on the used optimisation algorithm which is not the purpose of the this object model. It is better to model these scaling factors by modifying the relationship of the laser model to the optimisation algorithm: a new class will be defined, as an extension to the *AccessParam* class. This *OptimPar* class will not only implement the access features (inherited from *AccessParam*) but it will also implement the scaling factor. The end result of the relationship modelling can be seen in Figure 3-13.

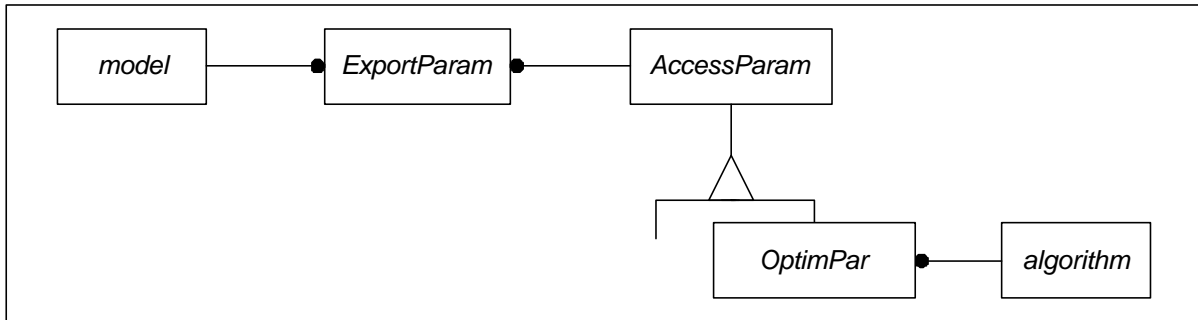


Figure 3-13: The end result of the object modelling for the relationship between the laser model and the optimising algorithm.

3.6.4 The optimising algorithm

A further refinement of the object model with respect to the optimising algorithm is required to guarantee the generality of the design. Like the case of the functional instrument driver an abstract class will be designed to provide the common properties of optimisation algorithms. These are: maximum number of iterations, initialisations of the algorithm, performing the optimisation, keeping track of the parameters to optimise. The abstract optimisation class will provide a uniform interface combined with a generic functionality. The specific implementations, which take care of the actual calculations (propose new parameters) will be implemented in the derived classes.

Besides creating the uniform structure, the optimisation objects will use the objects for the cost function and the parameters to optimise. Each of those results in a separate object, as can be seen in Figure 3-14.

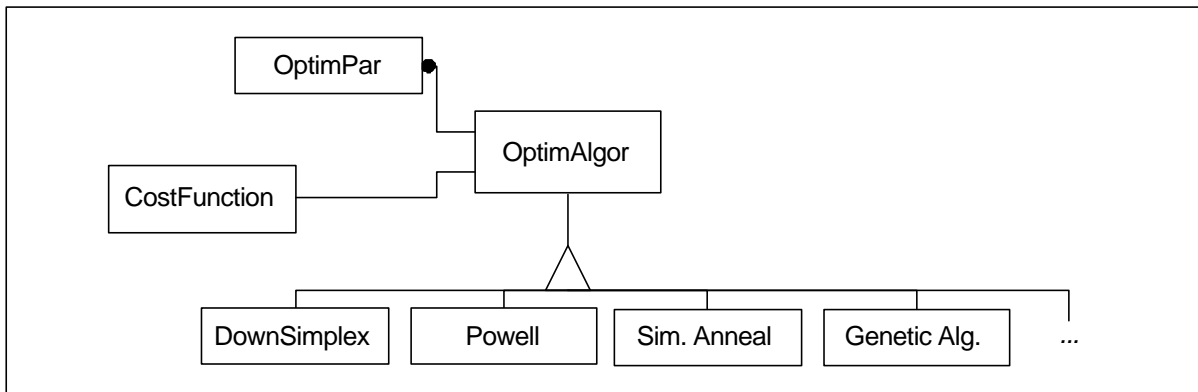


Figure 3-14: The object model for the optimisation algorithm

3.6.5 The laser model

As in the case of the other refinements, this refinement will create an abstract class to group the common aspects of the laser models. However these common aspects can be divided into two categories. One category is based on the observation that all models contain parameters. The second category is a grouping based on the signature of the calculation: a single point, an array, an array of complex numbers, a multi dimensional array, etc.

The first abstract class (*ParamRegister*) is designed to organise the collection of *ExportParam* objects. This list of objects can be searched by other objects which need access to a specific parameter value. The implementation of this object should make sure that the entire process of registering and searching is transparent for the user. This will result in the fact that the complex object structure will remain hidden and that the user is left with a simple and practical tool.

Secondly a number of classes will be derived from this *ParamRegister* class to group the different laser models according to their calculation signature. Each of those classes will in turn have derived classes to implement the actual calculation algorithms for the laser models. The result of this modelling is shown in Figure 3-15. In the frame of this thesis has the only *SpectModel* class been implemented.

It has to be noted that the object model also provides a recursion of the *ParamRegister* class, as can be seen in Figure 3-15. This recursion makes it possible that laser models can use other (laser) models. For example, an amplified spontaneous emission spectrum (ASE) model could use models for the calculation of the effective index and the optical gain spectrum. If this recursion was not possible, each ASE model should have to re-implement the calculations for the effective index and the optical gain.

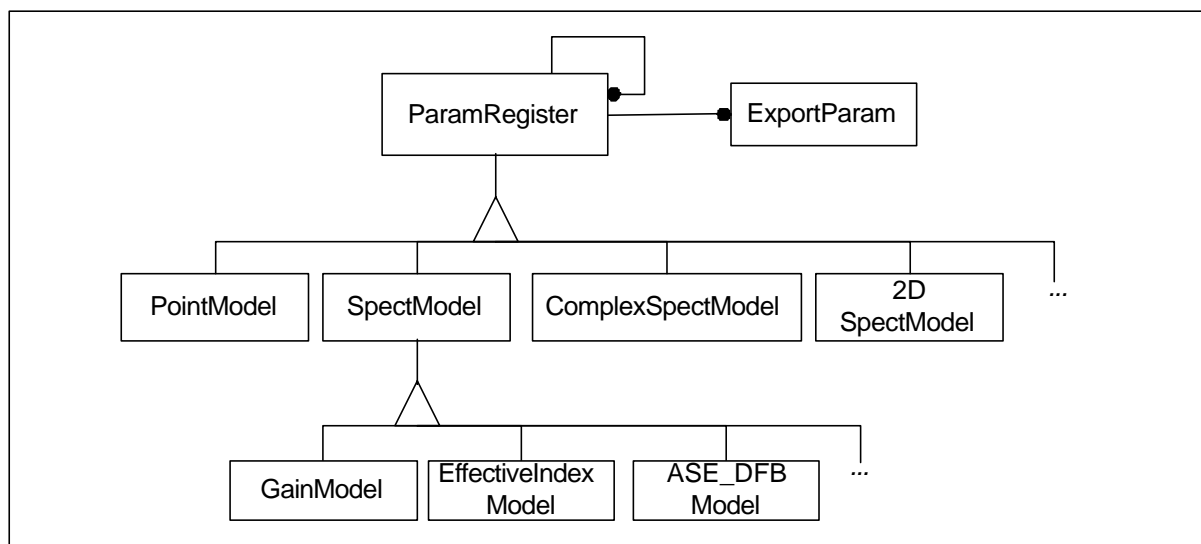


Figure 3-15: Details on the object model for (laser) models.

3.6.6 The cost function

The cost function is the expression of the error between the model and the measurement but it can be more than only the difference between the measurements and the calculated results. As indicated in Chapter 2 it can also be used to express a priori knowledge. The well known expression for the sum of the squared error is an example of a cost term based on the difference between calculated laser model and measured results. A priori knowledge can be transformed to a cost value by means of a known (expected) value of a parameters and a probability distribution for that value which is transformed into a value for the cost function.

The general shape of the cost function will consist of a number of terms, which will determine the overall cost value. The different terms are calculated separately and will be

added, possibly weighted. The cost terms can come in two forms: terms based on the models and terms based on parameters.

In object terms this leads to an abstract *CostTerm* class, of which two classes are derived to group the different kinds of cost terms. As always, the specific implementations of these terms will be realised in the derived classes. (cf. Figure 3-16). The “group” classes will implement the necessary structures for the model evaluations (*SpectModelTerm*) or the parameter values (*ParameterTerm*) by respectively using the *SpectModel* and the *AccessParam* class.

For example, the *SumSQETerm* object will use the “calc” method of the associated laser model to calculate the laser model evaluation before it will compare that result with the measurement results it contains. An *aPrioriTarm* will use the *AccessParam-ExportParam* combination to request the value of a certain parameter before it will calculate the cost value based on the internal a priori knowledge.

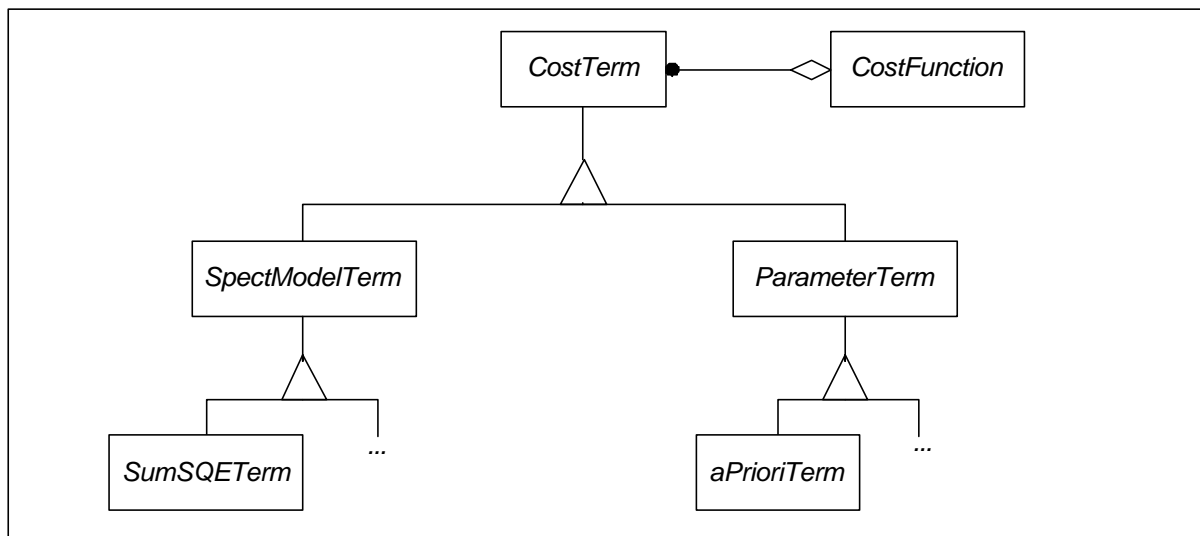


Figure 3-16: Details of the object model for the cost function

3.6.7 The complete object model for the parameter extraction problem

When all sub models discussed are combined and another abstract class (*NamedParam*) is introduced to group the common properties and functionalities of the *ExportParam* and the *AccessParam* objects, the complete object model for parameter extraction can be drawn. The result is given in Figure 3-17.

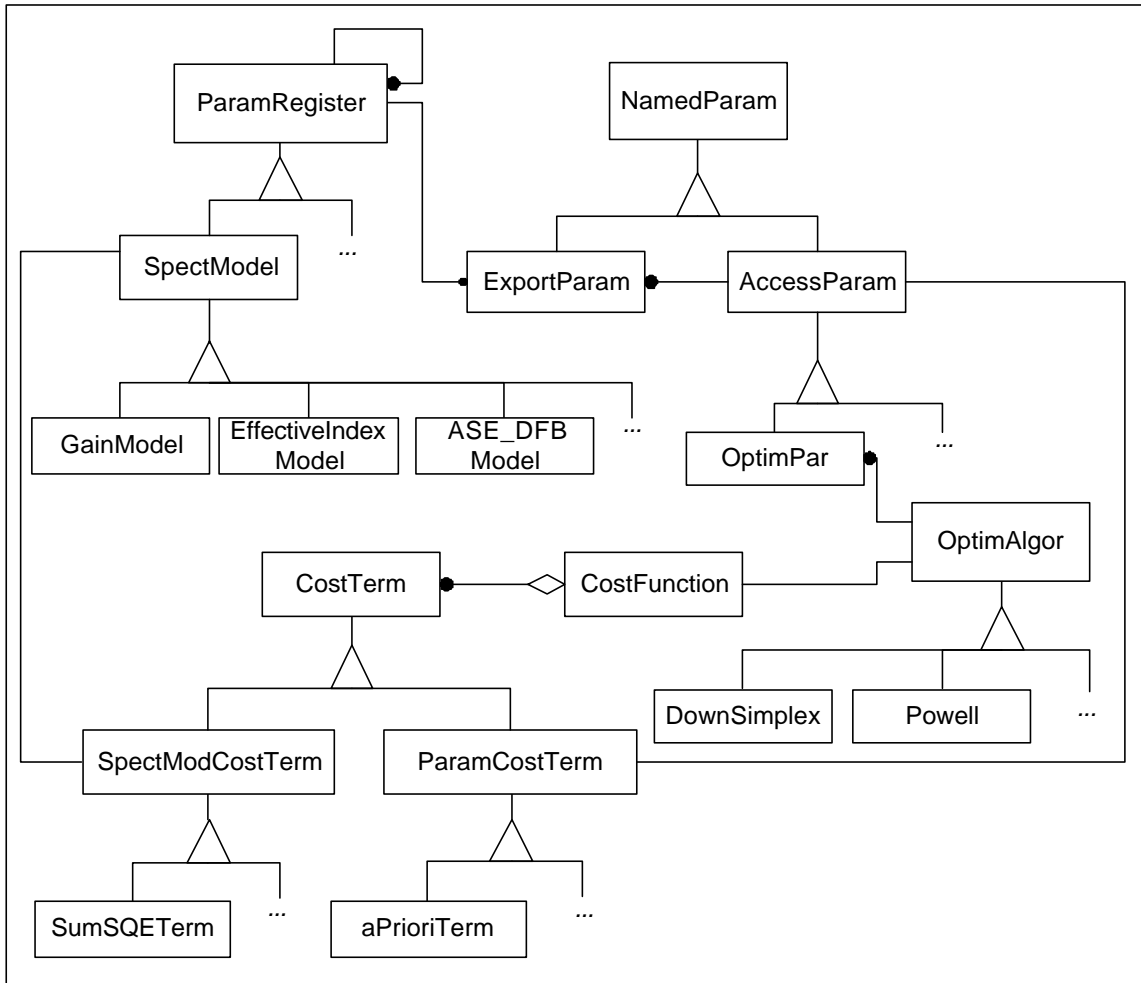


Figure 3-17: An overview of the developed object model for parameter extraction

3.7 Conclusion

This chapter has explained the software foundations that were developed within the context of this thesis. Two communication schemes have been developed, based on the general idea that measurement applications are software components that interact with instruments and with each other. The inter application communication is needed to enable several measurement applications to co-operate; the instrument communication is needed to make interaction with measurement equipment possible.

To realise the inter application communication in a generic style, a formal syntax (ODIF) has been designed within the scope of this work. This hierarchical information structure makes it possible to store and read information about measurement results, calculations and instrument settings.

The interaction between measurement applications and instruments has been investigated from the classical viewpoint of today's measurement world. To solve the observed needs, an abstraction was developed on the level of the measurement instrument (the "functional instrument driver"), thus making it possible to implement measurement applications independent from the equipment used. Due to this approach, measurement applications can be protected from the changing instrumentation market.

In the third part of the chapter a software model has been developed to realise a flexible environment for parameter extraction applications. It has been done by analysing the relationships between the optimising algorithm, the laser model and the cost function in an abstract way and modelling the relationships by means of object oriented techniques. The resulting objects make it possible to modify or add the separate components (laser models, terms in the cost function and optimisation algorithms), without any need for a detailed knowledge of the entire application.

-
- [3.1] P. Verhoeve, "ODIF Information Site", <http://www.intec.rug.ac.be/Research/Groups/optoMC/odif/>
 - [3.2] P. Verhoeve, "An Optical Data Interchange format", appendix A from the book : "How to model and measure PHOTONIC DEVICES. Experiences from a European collaboration", G. Guekos (Editor), Springer Verlag GmbH (Berlin), 1998
 - [3.3] N. Wirth, "What can we do about the unnecessary diversity of notation for syntactic definitions ?", Communications of the ACM, vol. 20, 11, 1977.
 - [3.4] J. Rumbaugh, M. Blaha, W. Premerlani, F. Eddy, W. Lorensen, "Object-oriented modelling and desing", Prentice Hall, 1991
 - [3.5] J. Martin, J. Odell, "Object oriented methods, a foundation", Chapter 25, Prentice Hall 1995
 - [3.6] P. Heinckiens, "Building Scaleable Database Applications: Object-Oriented Design, Architectures and Implementation", Addison Wesley Longman, 1998

CHAPTER 4

Parameter extraction on laser diodes

4.1 Introduction

This chapter gives an overview of certain physical laser parameters and the parameter extraction methods used to determine them on the basis of measurements. The parameters can be divided into four categories: waveguide properties, static properties, noise properties and dynamic properties.

The overview is restricted to the most commonly known and most frequently used methods in the literature. The more advanced parameter extraction methods which have been studied in detail during the course of this work are presented in the next chapter.

4.2 Properties of the waveguide

Each semiconductor laser diode consists of a waveguide with specific properties. These properties can be described by a number of parameters. A detailed knowledge of these parameters and the behaviour of the waveguide is of great importance.

The most important properties of a waveguide are: the optical gain, the internal loss, the effective index of refraction, the group index and the reflection coefficients of the facets (the ends of the waveguide). Sometimes a diffraction grating is put inside or near the waveguide to influence its wavelength behaviour. Each of the parameters mentioned is discussed in the following sub-sections: a brief description is given, together with one or more methods for measuring the parameter.

4.2.1 The optical gain and related parameters

4.2.1.1 The optical gain

The optical gain indicates how much the light is amplified when it passes through the material. Hence, it is a fundamental property of the waveguide. The techniques to determine the optical gain have been available from the early days of semiconductor laser diodes. Already in 1973 a method was presented by B. Hakki and T. Paoli [4.1]. This method is still frequently used and forms a basis for measurement methods developed at later dates. It is based on the spectral properties of a Fabry-Perot cavity and calculates the average optical gain (in a certain wavelength interval $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$) starting from the power ratio of the neighbouring peaks P_{\max}

(λ_{max}) and valleys P_{min} (λ_{min}). The resulting expression is given as (4.1). In this expression L represents the length of the cavity and R_L (R_R) represent the power reflection coefficients of the left (right) facet. The formula was initially presented as a waveguide measurement, thus requiring external light coupled into the waveguide. However, the same formula is obtained in the case of a Fabry-Perot laser diode, where the light is generated inside the waveguide. The only restriction is that the optical spectrum has to be measured below threshold.

$$G = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{\sqrt{P_{\text{max}}} - \sqrt{P_{\text{min}}}}{\sqrt{P_{\text{max}}} + \sqrt{P_{\text{min}}}} \right) + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_L R_R} \right) \quad (4.1)$$

The calculated modal optical gain G is a function of the optical gain of the material (g), the confinement factor (Γ) and the optical loss of the waveguide (a) as shown in expression (4.2).

$$G = \Gamma g - a_i \quad (4.2)$$

Hence, the values of the material parameters can only be determined if the internal loss (and the confinement factor) are known. In the literature several solutions to this problem have been presented. Some methods are based on the use of the transparency wavelength (i.e. the wavelength where the optical gain is equal to the internal loss). At this wavelength light can travel freely through the waveguide and does not interact with it [4.2]. Another method to determine this transparency point is by measuring the TM and TE polarisation of the optical gain, at transparency they are equal [4.3]. A combination of both methods has also been presented in the literature [4.4]. The accuracy of the combination is good enough to measure the temperature dependency of the optical gain [4.5].

4.2.1.2 The differential optical gain

The second important parameter related to the optical gain is the differential optical gain. Once the laser diode is above threshold, the nominal value of the optical gain is fixed due to the clamping of the carrier density. If the laser diode is modulated (small signal behaviour), the small changes (in other terms the derivative) of the optical gain with respect to the carrier density, will determine the modulation response of the laser diode. Thus, if the differential optical gain is larger, the stimulated emission will change faster, and the laser diode can be modulated up to higher frequencies.

The symbol “ g_0 ” is sometimes used to represent the differential optical gain. To prevent any confusion with the optical material gain, this thesis will use the explicit notation of the derivative (cf. expression (4.3)).

$$\text{Differential optical gain: } \frac{\partial G}{\partial N} \quad (4.3)$$

4.2.1.3 The non-linear gain

When the laser diode is driven a currents much larger than the threshold currents, the equilibrium of the carries will be distorted for short periods of time, a phenomenon known as spectral hole burning [4.6]. Since the carriers determine the amount of stimulated emission, this effect will modify the optical gain properties of the material. The influence of this phenomenon can be calculated by means of the rate equations and can be interpreted as a gain suppression

factor “ e ” or a non-linear gain. The relationship of this parameter with respect to the optical gain is given in (4.4) [4.7].

$$g(N, E, S) = \frac{g(N, E, 0)}{1 + eS} \quad (4.4)$$

The parameter can be determined in two ways: by means of a parameter extraction procedure performed on the relative intensity noise spectrum or by means of the amplified spontaneous emission spectrum measured above threshold [4.8]. The first method can be applied to all laser diodes and is treated in detail in the next chapter. The second method requires a special construction of the laser diode since the amplified spontaneous emission spectrum above threshold has to be measured perpendicular to the cavity of the laser diode.

4.2.2 The internal optical loss

Since the modal optical gain is determined by the internal loss, all measurement methods for the optical gain can be used to determine the internal loss of the waveguide. The main difficulty is to be able to distinguish between both phenomena. This can be done in two ways: finding a point where the net optical gain (i.e. gain minus loss) is zero or finding a limit situation where the gain is almost zero. In that case the measured value is the loss of the waveguide.

The methods depending on the transparency points have been discussed in the section about the optical gain, the methods depending on the limit situation will be discussed in this section.

The oldest and most commonly used method to determine the internal loss of a set of laser diodes is based on the observation that the inverse efficiency ($1/\eta_{\text{ext}}$) plotted versus the length of the cavity results in a straight line (cf. Figure 4-1), under the assumption that the Fabry-Perot laser diodes are identical except their length [4.9], [4.10]. The theory gives expression (4.5) as formula of that line.

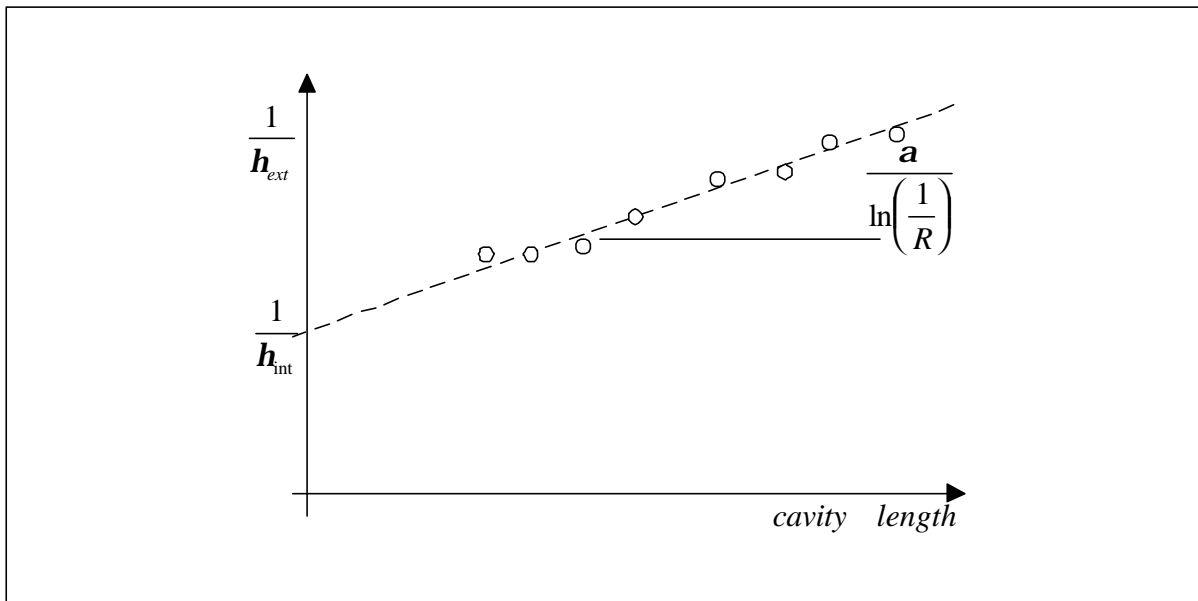


Figure 4-1: Determination of the internal loss by means of the efficiency for nominal identical laser diodes of varying cavity length.

$$\frac{1}{h_{ext}} = \frac{1}{h_{int}} \left(1 + \frac{a_i L}{\ln\left(\frac{1}{R}\right)} \right) \quad (4.5)$$

In other terms, the slope of the line corresponds with the internal loss and the intercept with the Y-axis gives the internal efficiency. Although this method is often used, it has a major disadvantage: it can only determine the value for an “average” laser diode and not for the individual laser diodes.

The below bandgap method of Ketelsen [4.11] relies on the fact that the optical gain is small for large wavelengths (i.e. energies lower than the bandgap). For those wavelengths the material gain contribution to the measured modal gain can be neglected.

The main advantage of this method is that it can obtain a value for an individual laser diode instead of an “average” laser diode. Furthermore this method can also be applied to DFB laser diodes since the wavelength regions away from the Bragg wavelengths have a Fabry-Perot behaviour. However, if the DFB laser diode has been provided with any AR coating, the method cannot be applied since the presence of an AR coating will destroy the Fabry-Perot behaviour.

The method of Ketelsen assumes that the internal loss is not wavelength dependent. The internal loss is determined at a wavelength different from the lasing wavelength. The method has a practical disadvantage since the optical power at the high wavelengths is rather small, which makes the measurement difficult due to the small signal.

4.2.3 Group index - effective index of refraction

The effective index of refraction and the related group index are also important parameters of a waveguide. The relationship between the effective index and the group index is given in expression (4.6).

$$n_g = n_e - \frac{1}{n_e} \left(\frac{dn_e}{dn} \right) \quad (4.6)$$

It is not possible to determine the effective index directly from a measurement on a waveguide. However it is possible to determine the group index in the case of a Fabry-Perot cavity. The distance between the Fabry-Perot modes can be measured and the group index can be calculated with expression (4.7).

$$n_g = \frac{L^2}{2L\Delta L} \quad (4.7)$$

4.2.4 Reflections at the facets

The reflections at the facets of a waveguide are forming the mirrors which determine the cavity for the laser diode. Contrary to the simplicity of the phenomenon, the determination of the reflection coefficients is a complicated matter. When it is a “regular” transition from semiconductor material to air, the reflection coefficient can be calculated if the refractive indices are known. However if a coating has been put onto the facet, the value can not be calculated directly. The technology used to apply such coatings is far from trivial. Hence the

fabrication process can only specify an upper limit for the reflection coefficient or a value with a large error margin.

Since the value of the reflection coefficients is used in the previously mentioned methods to determine the optical gain and the internal loss, the same methods can be used to determine the reflection coefficients; assuming that the other parameters are known. For example, it is possible to combine the information of a number of devices with identical structure but varying reflection coefficients (e.g. AR and non-coated) in order to determine the reflection coefficients.

4.2.5 Properties of the built in diffraction grating

In order to create laser diode with a specific wavelength characteristic, a diffraction grating can be built into the laser diode. This grating will reflect a specific wavelength (or a number of wavelengths if gratings are superimposed) in a distributed fashion. This can enhance the wavelength stability of the laser diode, as it is the case for a DFB laser diode.

The properties of the grating are defined by its period (i.e. known from the fabrication process), the index of refraction (i.e. the waveguide) and the coupling coefficient indicating the strength of the interaction between the grating and the light in the waveguide. Expression (4.8) indicates that the wavelength where the reflection of the grating reaches a maximum value is determined by the combination of the grating period (Λ) and the effective index (n_{eff}) of the waveguide.

$$I_B = 2\Lambda n_{eff} \quad (4.8)$$

Measuring the coupling coefficient of a diffraction grating is not trivial. Ideally the situations with and without the grating should be compared. However this is not possible since the diffraction grating is a part of the waveguide. The only way to determine the influence of the grating is to use indirect measurements. These will determine the coupling coefficient based on the behaviour of the amplified spontaneous emission spectrum of the laser diode.

In the literature several methods are published to determine the coupling coefficient for DFB laser diodes. For those diodes, the presence of a diffraction grating is visible as a stopband. This is a “hole” in the optical spectrum: the distance between the two modes on each side of the lasing mode is larger than the distance between the other modes in the spectrum. The determination of the coupling coefficient can be done based on the size of this stopband [4.12], [4.13] and [4.14]. This is shown in expression (4.9), which combines the grating period, the effective index and the size of the stopband.

$$k = \frac{pn_{eff} \Delta I_{stopband}}{I_B^2} = \frac{p}{4} \frac{\Delta I_{stopband}}{n_{eff} \Lambda^2} \quad (4.9)$$

However the coupling coefficient can also be determined by the ratio of the power present in the two modes on each side of the stopband [4.15].

A more general though more complex method to determine the coupling coefficient is to use a (non) analytical expression to model the amplified spontaneous emission spectrum. This expression is fitted to the measurement results, thus extracting the parameter values. The main disadvantage of this method is the fitting process which is difficult due to the large number of parameters. However the important advantage is that it can be applied to all kinds of laser diodes.

4.3 The static laser properties

4.3.1 Threshold current

The threshold current of a laser diode is defined as follows:

“The current at which the laser would start lasing, if no spontaneous emission were present”.

Although the threshold current is considered as one of the most simple characteristics of a laser diode, the correct definition is often not well known and several calculation methods are used. All these methods result in the same value (within the error margins) if they are used carefully. The three methods are given in this section. In most practical situations and for all results presented in this thesis the first method has been used because of its simplicity and because of its most direct relationship with the actual definition of the threshold current.

4.3.1.1 Method one: the intersection with the X-axis

The first method to determine the threshold current (shown in Figure 4-2) is based on its definition. By extrapolating the lasing characteristic the theoretical starting point of the lasing operation can be determined.

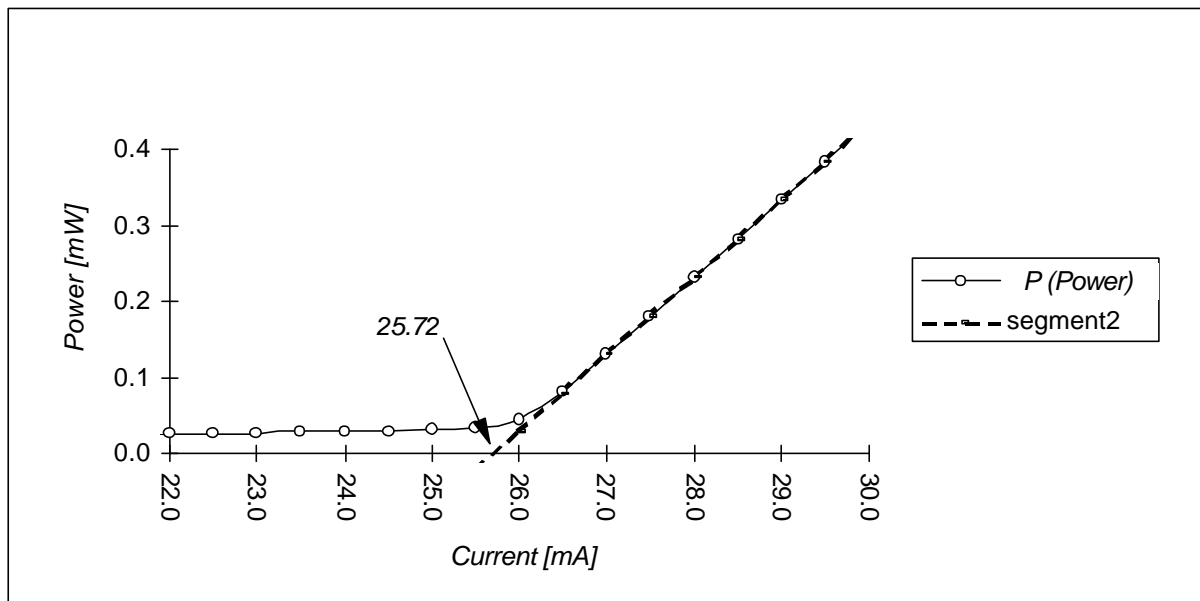


Figure 4-2: Intersection method to determine the threshold current

The points used for the linear regression have to be chosen carefully. If the laser diode is affected by thermal effects (i.e. the slope of the power curve decreases at high bias currents), the measured threshold current will be too small.

4.3.1.2 Method two: the inflexion point of the power curve

The second method determines the inflection point of the measured power curve and uses the corresponding current value as threshold current. The motivation for this choice is that the inflection point can be interpreted as the practical transition point between spontaneous emission and laser light. Starting from that current, the laser can be used as a laser instead of a LED.

This method appears more simple than the previous method: calculating a derivative twice is more simple than applying linear regression. However the reality is somewhat different. The derivation process is very sensitive to noise which makes the results of the calculation less reliable. The method is also very dependent on the distance between the measured current points. Since the second derivative can only be calculated in the measured points (due to the numerical properties), the threshold current (i.e. the maximum of the second derivative) will always be found in a measured point. Hence the error margin of the calculation is equal to half of the distance between the measured points.

Furthermore, care should be taken when calculating the derivatives. Besides calculating the differences of the Y-axis, it should be checked if the X-axis of the calculated derivative should not be shifted. If this is not done, the calculated threshold current can have an offset of a measurement point, thus giving an incorrect result.

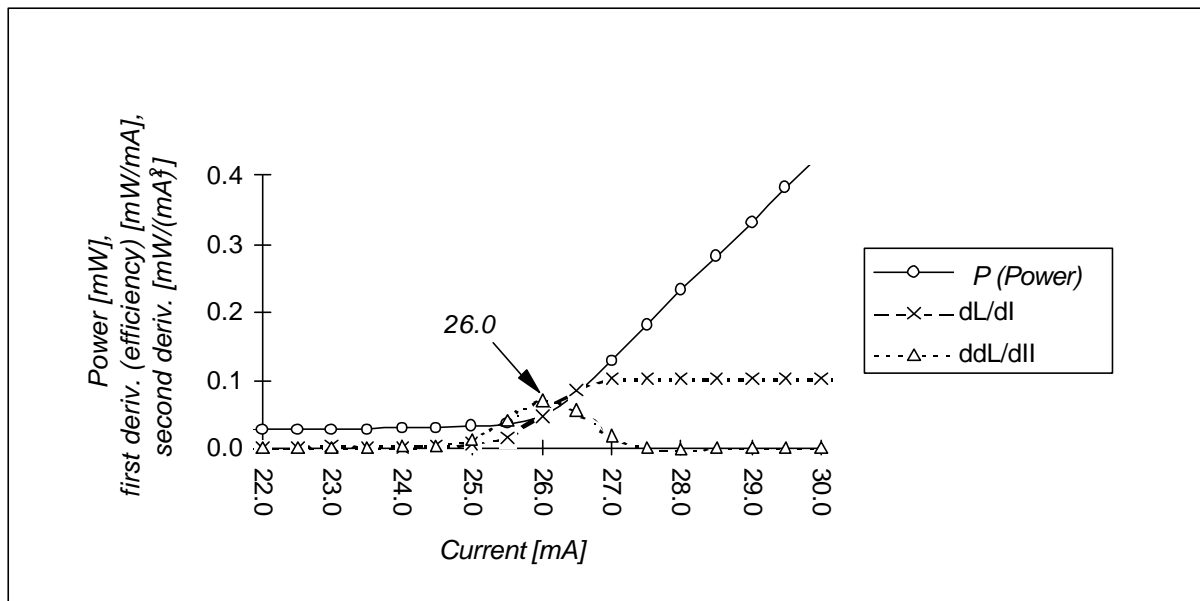


Figure 4-3: The inflection point as threshold current

4.3.1.3 Method three: intersection of the spontaneous emission and the lasing operation

The third method determines the threshold current by calculating the intersection of two straight lines as shown in Figure 4-4. The first line represents the spontaneous emission and the second line represents the lasing operation. Both lines are determined by linear regression.

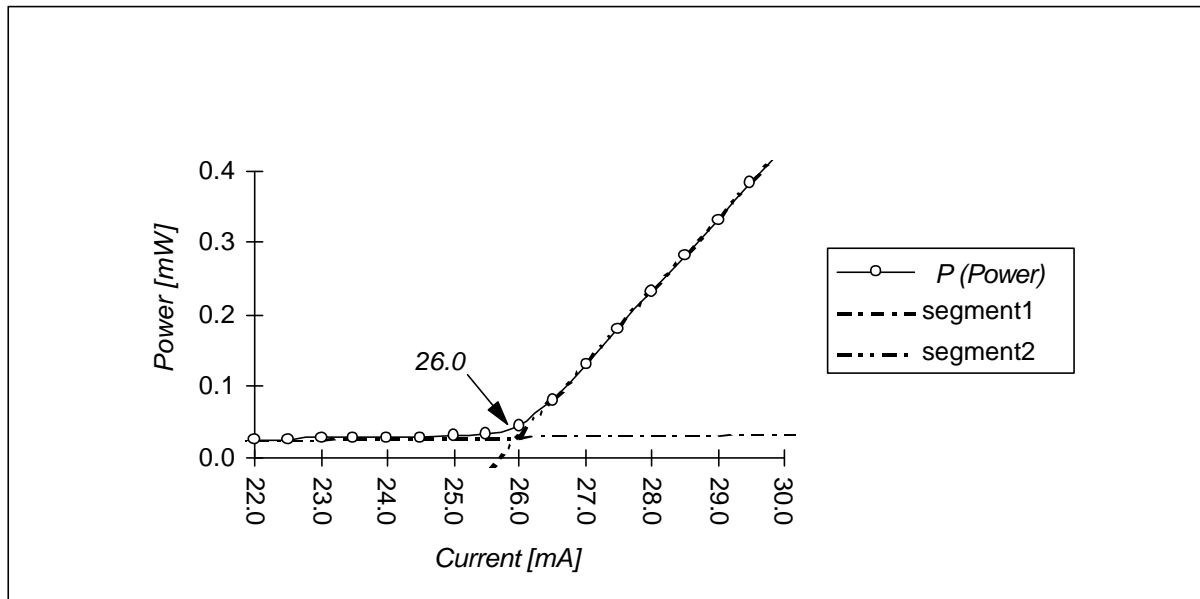


Figure 4-4: The intersection of the spontaneous emission and the lasing operation

Like the previous method, an attempt is being made to get a more accurate estimate of the actual current where the lasing operation becomes more powerful than the spontaneous emission. Since the method is using linear regression, the result is no longer depending on the distance between the points measured. Assuming that there are enough points to make linear regression possible and if both phenomena (spontaneous emission and lasing operation) are sufficiently linear.

4.3.2 Series resistance

As all resistances, the series resistance of a opto-electronic component is measured by observing the voltage over the device as a function of the current. When measurements are available on multiple identical components with a different length, the contact resistance can be extracted. This contact resistance remains constant for varying length, the series resistance decreases with length (cf. Figure 4-5).

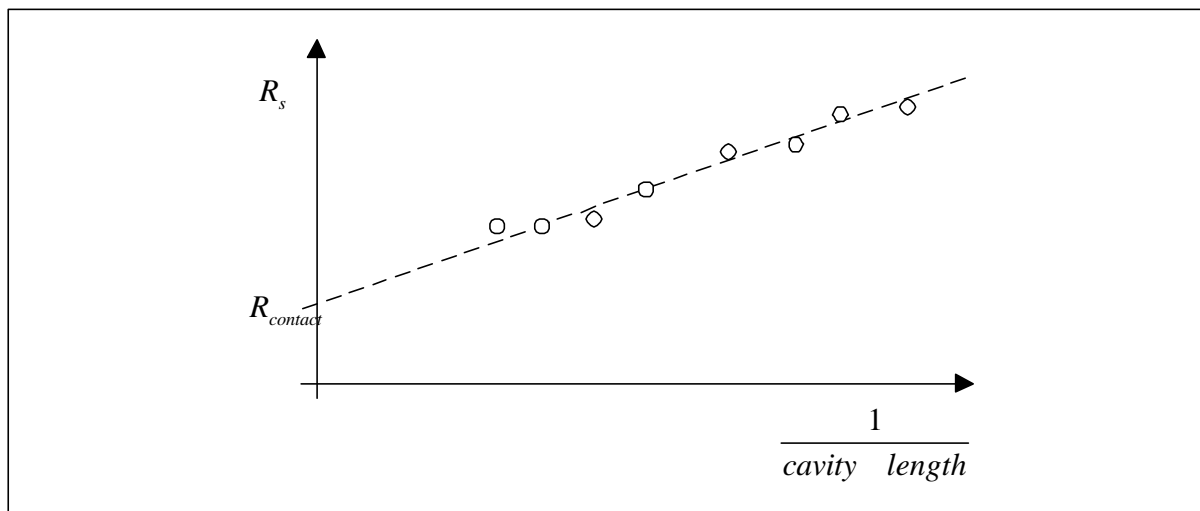


Figure 4-5: Series resistance as a function of the inverse cavity length

4.3.3 The peak wavelength and the spectral purity

The peak wavelength of a laser diode is the dominant wavelength in the optical spectrum, hence the alternative name: lasing wavelength. Two parameters are used to express the spectral purity of the light emitted by a laser diode: the side mode suppression ratio (SMSR) and the linewidth. The side mode suppression ratio is mainly determined by the structure of the laser diode and is briefly discussed in this section. The linewidth is determined by the noise present in the laser diode and is treated in Section 4.4.3.

The side mode suppression ratio is defined as the ratio of the power at the dominant wavelength (mode) with respect to a nearby wavelength (mode) which has slightly less power, as shown in Figure 4-6. In the case of “simple” laser diodes, the side mode suppression ratio is determined by the longitudinal modes (i.e. the different cavity modes). In the case of complex laser diodes, such as widely tuneable laser diodes (WTLs) the side mode suppression ratio can be determined by either the longitudinal modes (Figure 4-6, right hand side) or it can be determined by the nearby super mode (Figure 4-6, left hand side). In practice the smallest value of both possibilities is taken as “the” side mode suppression ratio of the laser diode.

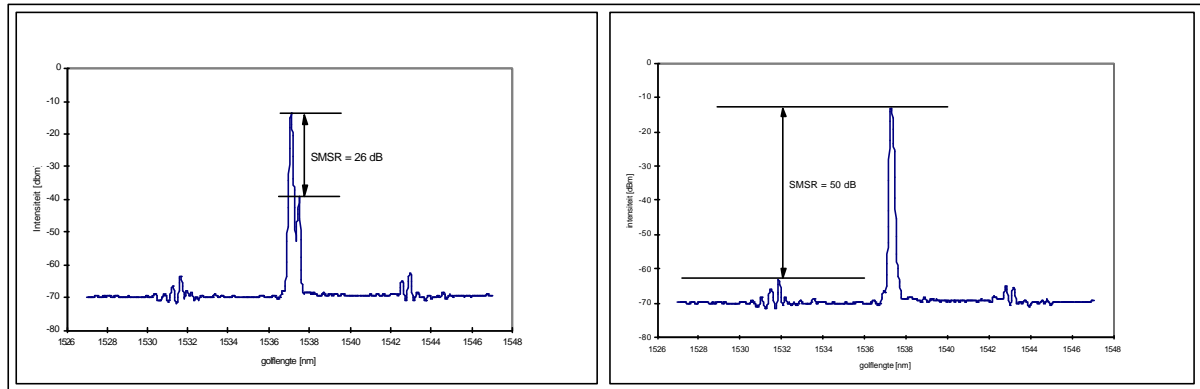


Figure 4-6: The side mode suppression ratio due to longitudinal modes (left) and due to super modes (right). Both situations have been measured on the same widely tuneable laser diode.

The peak wavelength and the side mode suppression ratio are extracted from the optical spectrum measured with an optical spectrum analyser. The instrument used needs to have a sufficiently high dynamic range and is preferably a double pass optical spectrum analyser. The longitudinal modes are very close on the wavelength scale, hence the filtering characteristic of the optical spectrum analyser used needs to be sufficiently good to measure the modes separately. A typical value for the dynamic range needed is 50 dB at a distance of 0.5 nm from the dominant wavelength.

When only the peak wavelength is required, a single pass optical spectrum analyser (typical dynamic range of 35 dB at a distance of 1 nm) can be used. If the side mode suppression ratio is large enough a wavelength meter can be used. This instrument offers a larger wavelength resolution (1 à 10 ppm, which is 10 MHz or 1 pm at 1550 nm).

4.3.4 Characteristic temperature: T_0

The characteristics of a laser diode are temperature dependent, since the processes in a laser diode are influenced by a change in temperature. The optical loss [4.16], [4.17], [4.18],

the leakage currents [4.19] and the optical gain are the most important factors which determine this temperature dependence [4.20], [4.21].

The temperature dependence can be easily observed through an increase of the threshold current and a decrease of the efficiency of the laser diode (when the temperature increases). The temperature dependency of the threshold current can be described by an exponential function:

$$I_{th} = I_0 e^{\frac{T}{T_0}} \quad (4.10)$$

In other terms, a higher characteristic temperature T_0 results in a laser which is less temperature dependent. The extraction of the characteristic temperature is done by fitting the exponential expression to a set of threshold currents measured at different temperatures.

Recently a more accurate expression has been presented [4.22]. The expression (4.11) shows the relationship between the threshold current density and the temperature dependency.

$$J_{th} = \left(\frac{P}{C} (T_{max} - T) \right)^{\frac{1}{P}} \quad (4.11)$$

In this expression C stands for a temperature independent constant, determined by the layer structure of the active region, P is about 0.5 and T_{max} represents the characteristic temperature.

4.3.5 *The near field and the far field*

The near field of a laser diode expresses how the light is distributed at the facet of the laser diode. The measurement of that information is not easy since both the amplitude and the phase of the light are to be measured. Furthermore the near field is not an important parameter for specifying the behaviour of a laser diode. So in the scope of this thesis, the near field is not treated.

The far field of a laser diode corresponds with its emission pattern and is very relevant to system applications. The shape of this pattern determines how efficiently the light of a laser diode can be coupled to optical fibre. The optical fibre is a circular waveguide and the far field of a laser diode has normally an elliptical shape due to technological restrictions. The measurement of the far field and the determination of the related alignment tolerance is highly relevant information, especially if the laser diodes are equipped with integrated structures to enable a better coupling to optical fibre [4.23], [4.24], [4.25].

4.3.6 *The optical spectrum*

The optical spectrum of a laser diode is determined by the combination of many waveguide properties. Hence it is a interesting source of information. However the combination of the parameters results in a difficult distinction between them and it is difficult to determine the individual parameters based on the optical spectrum. A possible solution to this problem is to determine the parameters using indirect methods. These methods use advanced techniques such as the fitting of a numerical model to a measurement. In most cases such methods are used to extract information based on the amplified spontaneous emission spectrum of the laser diode. In the scope of this thesis this method has been explored and is treated in more detail in the next chapter.

It is also possible to use other (more complicated) measurements to determine parameters using the amplified spontaneous emission spectrum. For example it is possible to determine the dispersion using a Michelson interferometer with the device under test in one arm [4.26]. This method determines the group delay dispersion and the optical gain.

4.4 Noise properties of laser diodes

4.4.1 Introduction

Due to the non-perfect optical gain and the presence of spontaneous emission, noise is present in the laser diodes. Figure 4-7 indicates that the influence of the spontaneous emission on the complex field can be observed in two ways. Firstly the length of the field vector is changing, which results in amplitude variations. Secondly the angle of the field vector is also changing, which results in a phase variation of the stimulated emission [4.27].

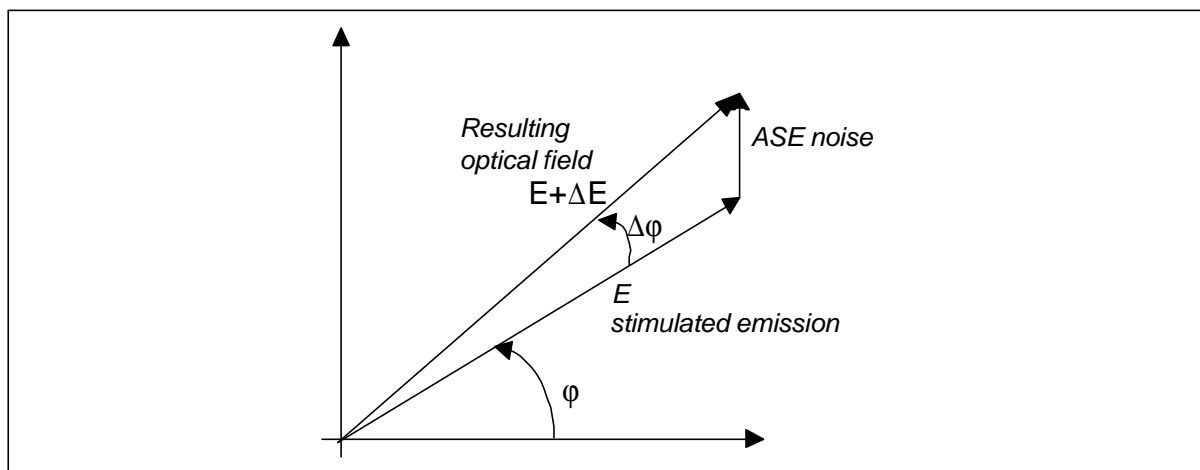


Figure 4-7: The influence of the spontaneous emission on the complex field.

The amplitude variations result in a noise component of the emitted power, the phase variations result in a broadening of the laser line (i.e. it does not emit at a single wavelength). Both phenomena can be measured, the amplitude variations are expressed as relative intensity noise (unit dB/Hz), the phase variations are expressed as a linewidth (unit kHz).

4.4.2 Amplitude noise: the relative intensity noise

In the case of optical telecommunication the absolute amount of noise is not really relevant. However the relative amount of noise with respect to the signal is of great importance. Therefore the intensity noise of a laser diode is normally expressed relatively to the average output power emitted by the laser diode. This can be interpreted as a signal-to-noise ratio (SNR), with the signal replaced by the constant light power. A relationship between the relative intensity noise and the signal-to-noise ratio can be expressed and is given in the next chapter.

Since the relative intensity noise is a property which can be measured at a constant bias current and since the measurement contains dynamic information about the laser diode, the relative intensity noise measurement has been thoroughly studied in the scope of this thesis. The results are discussed in the next chapter (Section 5.3).

4.4.3 Phase noise: the linewidth

As mentioned before, the linewidth of a laser diode is a measure for the spectral purity of the laser diode. Due to the phase variations of the different noise contributions the optical frequency of the laser light is changed. This change is called the linewidth. Theoretically it can be proven that the linewidth has a Lorentzian distribution when written as a function of the optical frequency. The linewidth can be expressed (4.12) as a function of the laser parameters [4.27]. The first part of this expression (the fraction) is called the Schawlow-Townes linewidth. The second part, $(1+a^2)$, expresses the fact that the measured linewidth is larger than the theoretical prediction in the case of semiconductor laser diodes. This phenomenon was first identified in 1981 by Henry [4.28]. It can be explained by a coupling between the phase and amplitude variations of the optical field. The parameter α is called the linewidth enhancement factor.

$$\mathbf{dn} = \frac{v_g^2 h n R_{sp} g a_m}{8 p P} (1 + a^2) \quad (4.12)$$

The linewidth enhancement factor is determined by the ratio of the variation of the real part of the index of refraction with respect to the variation of the imaginary part of that index. When both variations are expressed as relative variations with respect the carrier density, the linewidth enhancement factor can be written as the ratio of the AM modulation with respect to the FM modulation (cf. expression (4.13)).

$$\mathbf{a} = \frac{\frac{\mathcal{I} \operatorname{Re}(n)}{\mathcal{I} \operatorname{Im}(n)}}{\frac{\mathcal{I} \operatorname{Re}(n)}{\mathcal{I} \operatorname{Im}(n)}}} = \frac{\frac{\mathcal{I} \operatorname{Re}(n)}{\mathcal{I} N}}{\frac{\mathcal{I} \operatorname{Im}(n)}{\mathcal{I} N}} = \frac{AM}{FM} \quad (4.13)$$

The linewidth of a laser diode is a very important parameter for applications in the field of optical telecommunications. Hence, the measurement of linewidth has received a lot of attention in the past and is still being investigated. The most direct method to measure the linewidth is to use an optical filter with sufficiently narrow characteristics (e.g. a Fabry-Perot etalon [4.29] or a Mach-Zehnder interferometer [4.30]). However these methods can not be used for the very small linewidth of recent laser diodes. In 1980 the use of coherent methods was added to the measurement possibilities for the linewidth. These techniques are based on the heterodyne principle. The laser light under investigation is mixed with light originating from a laser with slightly different wavelength and an extremely small linewidth. The mixing product is converted into an electrical signal by means of a detector and it is measured with an electrical spectrum analyser. The method can be simplified due to the limited coherence length of the laser light. If the light of the laser under test is sufficiently delayed (e.g. by sending it through a longer optical fibre) the light can be considered as coming from a different laser. Figure 4-8 shows the basic heterodyne set-up [4.31] and a more evolved version using a fibre loop [4.32]. Due to this loop several mixing products can be measured thus resulting in a more accurate linewidth measurement. If an optical amplifier is put inside the fibre loop [4.33], it is possible to measure linewidth down to a few hundred Hz.

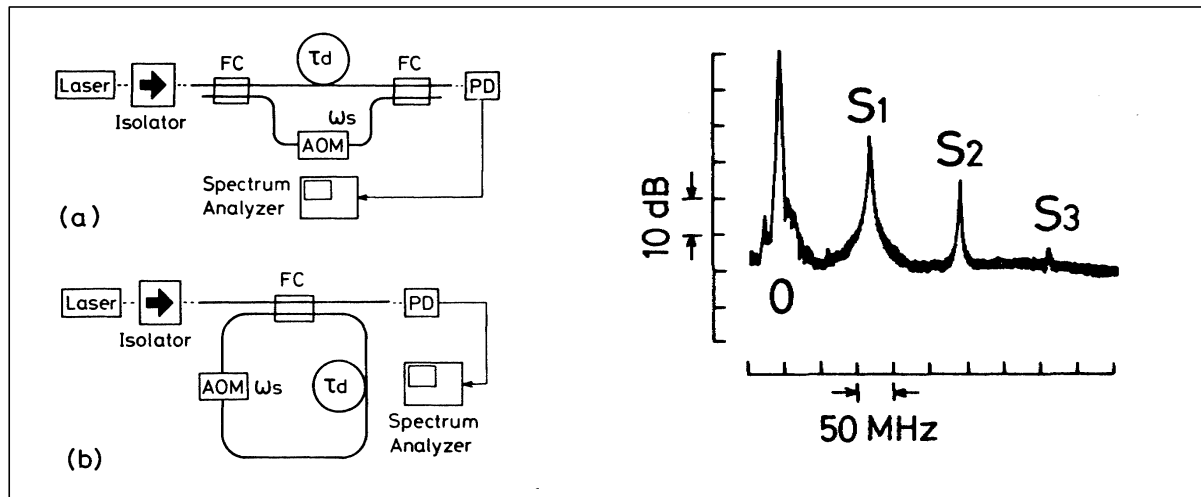


Figure 4-8: Evolution of the self heterodyne technique to measure linewidth. On the right an example of an electrical spectrum measured with set-up (b)

The acousto-optical modulator can be removed from the heterodyne set-up, thus converting it into a homodyne set-up. This approach has a disadvantage: the electrical spectrum analyser used has to be of high quality since the mixing product of a homodyne set-up is centred around 0 Hz. However such homodyne set-ups are commercially available (including the measurement software).

Recently measurement methods based on sub coherence delays have been published. In that case the measured electrical spectrum is no longer the linewidth but a special function. The theoretical expression for the measured spectrum can be derived and it can be fitted to the measured spectrum. This technique makes it possible to realise accurate measurement set-ups without involving several km of optical fibre to measure a very small linewidth. The so called short delay line technique can be performed on a heterodyne [4.34] and on a homodyne measurement set-up [4.35]. The latter has the advantage of being very simple due to the absence of the acousto-optical modulator.

During the course of this thesis the extraction procedure for the short delay line homodyne measurement set-up has been implemented. In that case the expression (4.14) can be written for the signal measured by the electrical spectrum analyser. The last term of the expression can be neglected, which results in a very simple two dimensional optimisation problem. The delay of the interferometer (t_d) is known from the construction of the set-up. The expression is fitted using a logarithmic scale.

$$S(f) = \frac{\Delta n}{p(f^2 + (\Delta n)^2)} \left[1 - e^{-2pt_d \Delta n} \left(\cos(2pft_d) + \frac{2p\Delta n}{f} \sin(2pft_d) \right) \right] + d(f) e^{-2pt_d \Delta n} \quad (4.14)$$

4.5 The dynamic laser properties

4.5.1 Introduction

Although the dynamic properties are indeed important parameters for a laser diode, the direct measurement methods will not be treated in detail in the scope of this thesis. From the beginning of this work, the emphasis has been put on “simple” measurement and physical laser

parameters instead of system parameters. Modulation experiments cannot be categorised as “simple” since a high frequency (several GHz) signal has to be coupled to the laser diode, which is difficult from an electrical point of view. Furthermore, the information about physical parameters available from a modulation experiment can also be extracted from the relative intensity noise measurement.

4.5.2 AM modulation

In the current context of telecommunication, where all optical communication is based on intensity or amplitude modulation, the determination of the modulation bandwidth is important. The concept of the bandwidth measurement is simple: the current driving laser diode is modulated and the response of the laser light is measured. However due to the high bandwidth of the laser diodes, it is of great importance to build the set-up carefully such that the measurement result is not determined by the parasitic influences of the set-up instead of by the laser diode. Feeding a current modulated up to tens of GHz to a laser diode without generation of electrical reflections is not an easy task.

The rate equations describing the processes inside a laser diode can be used to derive an expression (4.15) which represents the small signal modulation response of the laser diode [4.36]. The factor containing f_{par} expresses to what extent the modulation properties of the active layer are limited by the parasitic influences of the laser structure.

$$|M(f)|^2 = \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_{par}} \right)} \right) \left(\frac{f_r^4}{(f_r^2 - f^2)^2 + \left(\frac{g}{2p} \right)^2 f^2} \right) \quad (4.15)$$

Since the main objective of this thesis is the determination of the laser parameters using “simple” measurement and since the information content with respect to the physical parameters corresponds to the information content of the relative intensity noise measurement, no further attention is given to the modulation measurements.

4.5.3 FM modulation

The optical frequency of laser diodes can also be modulated. The FM modulation techniques are mainly used in coherent communication systems. These systems are currently less used due to the arrival of the WDM techniques. Hence, no further attention is given to these measurements in the scope of this text.

4.5.4 AM FM coupling

In the case of laser diodes the coupling between the AM and the FM modulation is as important as the separate properties. As mentioned in the section on noise phenomena, a coupling mechanism exists between the amplitude and phase variations of the emitted light. This results in chirp, a change of optical frequency when the intensity of the light is modulated. The chirp is characterised by the linewidth enhancement factor α which has been defined in the section on linewidth (Section 4.4.3).

The measurement of the chirp and the linewidth enhancement factor can be realised in several ways. As expression (4.13) indicates, it can be determined from the measured AM and FM response, but other methods are possible. For example based on the use of dispersive optical fibre combined with numerical transmission models [4.37] [4.38], or based on an interferometric etalon [4.39], or based on a Mach-Zehnder structure [4.40]. Due to the coupling between AM and FM modulation it is even possible to determine the two modulation parameters and the coupling at the same time [4.41].

4.6 Conclusion

This chapter has given an overview of the most important parameters of a laser diode and the methods used to determine their values. This has been done in three steps: the parameters of the waveguide, the parameters describing the static behaviour and the parameters describing the dynamic behaviour.

-
- [4.1] B.W. Hakki T.L. Paoli, "CW degradation at 300 K of GaAs double-heterostructure junction lasers. II Electronic gain", J. Appl. Phys, 44-9,1973, pp 4113-4119
 - [4.2] P.A. Andrekson, N.A. Olsson, T. Tanbun-ek, R.A. Logan, D. Coblentz, H. Temkin, "Novel technique for determining internal loss of individual semiconductor lasers", Ell. Lett., vol 28, 1992 pp 171
 - [4.3] E.A. Avrutin, I.E. Chebunina, I.A. Eliashevitch, S.A. Gurevich, G.E. Shtengel, "TE and TM optical gains in AlGaAs/GaAs single QW lasers", Semicond. Sci. Technol., 8-1, 1993, pp. 80-87
 - [4.4] G.E. Shtengel, D.A. Ackerman, "Internal optical loss measurements in 1.3 um InGaAsP lasers", Ell. Lett., 31-14, 1995, pp. 1157-1159
 - [4.5] D.A. Ackerman, G.E.Shtengel, M.S. Hybertsen, P.A. Morton, R.F. Kazarinov, T. Tanbun-Ek, R.A. Logan, "Analysis of gain determining T0 in 1.3 semiconductor lasers", J. of selected topics in QE, 1-2, 1995, pp. 250-263
 - [4.6] M. Asada, Y. Suematsu, "Density-matrix theory of semiconductor lasers with relaxation broadening model-gain and gain suppression in semiconductor lasers", JQE, 21, 1984, pp. 434-442
 - [4.7] G. Morthier, P. Vankwikelberge, "Handbook of distributed feedback laser diodes", Artech House, inc., 1997]
 - [4.8] F. Girardin, G.H. Duan, C. Chabran, P. Gallion, M. Blez, M. Allovon, "Determination of non linear gain coefficient of semiconductor lasers from above threshold spontaneous emission measurement", Phot. techn. Lett, 6-8, 1994, pp. 894-896
 - [4.9] J.R. Biard, W.N. Carr, B.S. Reed, "Analysis of a GaAs laser", Trans. Metall. Soc. AIME, 1964, 230, pp.286-290
 - [4.10] H.C. Casey, M.B. Panish, W.O. Schlosser, T.L. Paoli, "GaAs-Al_xGa_{1-x}As heterostructure laser with separate optical and carrier confinement", J. Appl. Phys, 45-1, 1974, pp. 322-333
 - [4.11] L.J.P. Ketelsen, "Simple technique for measuring cavity loss in semiconductor lasers.", Ell. Lett., 30-17, 1994, pp 1422-1424
 - [4.12] H. Kogelnik, C. Shank, "coupled wave theory of DFB lasers", J. Appl. Physics, 1972, 43, pp. 2327-2335
 - [4.13] H. Okuda, J. Kinoshita, Y. Hirayama, Y. Uematsu, "Longitudinal mode characteristics for 1.3um InGaAsP/InP DFB lasers just below the threshold current", *ibid.*, 1983, 19, pp. 362-363

-
- [4.14] W. Streifer, D. Scifres, R. Burnham, "Coupling coefficients for distributed feedback single and double heterostructure diode lasers", *JQE*, Vol. 11, 1975, pp. 867-873
- [4.15] Y. Hirayama et al, "Determination of Coupling coefficient of DFB lasers by a newly proposed method", *Ell. Lett.*, 23-3, 1987, pp. 101-103
- [4.16] A.R. Adams, M. Asada, Y. Suematsy, Y. Itaya and S. Arai, "The temperature dependence of the efficiency and threshold current of InGaAsP lasers related to intervalence band absorption", *J. Appl. Phys*, 19, 1980, pp. 621-624
- [4.17] M. Asada, A.R. Adams, K.E. Stubkjaer, Y. Suematsu, Y. Itaya and S. Sarai, "The temperature dependence of the threshold current of InGaAsP/InP DH lasers", *JQE*, 17, 1981, pp. 611-619
- [4.18] M. Asada and Y. Suematsu, "The effects of loss and nonradiative recombination of the temperature dependence of threshold current in 1.5-1.6 μm InGaAsP/InP lasers", *JQE*, 19, 1983, pp. 917-923
- [4.19] M. Yano, H. Nishi and M. Takusagawa, "Temperature characteristics of threshold current in InGaAsP/InP double heterostructure lasers", *J. Appl. Phys*, 51, 1980, pp. 4022-4028
- [4.20] Y. Zou, J.S. Osinski, et al., "Experimental study of Auger recombination, gain and temperature sensitivity of 1.5 μm compressively strained semiconductor lasers", *JQE*, 29, 1993, pp. 1565-1575
- [4.21] D.A. Ackerman, G.E.Shtengel, M.S. Hybertsen, P.A. Morton, R.F. Kazarinov, T. Tanbun-Ek, R.A. Logan, "Analysis of gain determining T_0 in 1.3 semiconductor lasers", *J. of selected topics in QE*, 1-2, 1995, pp. 250-263
- [4.22] J.D. Evans, J.G. Simons, "New insight into the temperature sensitivity of the threshold current of long wavelength semiconductor lasers", *Proc. Of the IEEE Semiconductor laser conference*, Hawaii 1994, pp. 237-238.
- [4.23] J. Buus, W.J. Stewart, J. Haes, J. Willems, R.G. Baets, "Spot size expansion for laser-to-fibre coupling using an integrated multimode coupler", *JLT*, 11-4, 1993, pp. 582-588
- [4.24] G. Vermeire, F. Vermaerke, R. Baets, P. Van Daele, P. Demeester, "Low threshold current 780 nm InAlGaAs/AlGaAs strained QW lasers and the integration with a passive, non-absorbing tapered mode-size transformer", *ISLC94*, , 1994, pp. 129-130
- [4.25] L.N. Langley, D.J. Robbins, P.J. Williams, T.J. Reid, I. Moerman, X. Zhang, P. Van Daele, P. Demeester, "DFB laser with integrated waveguide taper grown by shadow masked MOVPE", *Ell. Lett.*, 32, 1996, pp. 738-739
- [4.26] K. Naganuma, "Semiconductor laser cavity dispersion measurement based on interferometric crosscorrelation of amplified spontaneous emission", *App. Phys. Lett*, 64-3, 1994, pp. 261-263
- [4.27] C. H. Henry, "Theory of the linewidth of semiconductor lasers", *JQE*, 18-2, 1982, pp. 259-264
- [4.28] M.W. Fleming, A. Mooradian, "Fundamental line broadening of single-mode (GaAl)As diode lasers", *Appl. Phys. Lett.*, 38, pp. 511, 1981
- [4.29] M. Fujise, M. Ichikawa, "Linewidth measurements of a 1.5 μm range DFB laser", *Ell. Lett.*, 21-6, 1985, pp. 231-232
- [4.30] J. A. Constable, I.H. White, "Laser linewidth measurement using a Mach-Zehnder interferometer and an optical amplifier", *Ell. Lett.*, 30-2, 1994, pp. 140-142
- [4.31] T. Okoshi, K. Kikuchi, A. Nakayama, "Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum", *Ell. Lett.*, 16-16, 1980, pp. 630-631
- [4.32] H. Tsuchida, "Simple technique for improving the resolution of the delayed self heterodyne method", *Optics Letters*, 15-11, 1990, pp. 640-642
- [4.33] J.W. Dawson, N. Park, K.J. Vahala, "An improved delayed self heterodyne interferometer for linewidth measurements", *Phot. techn. Lett*, 4-9, 1992, pp. 106-1066

-
- [4.34] L.E. Richter, H.I. Mandelberg, M.S. Kruger and P.A. McGrath, "Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times", *JQE*, 22-11, 1986, pp. 2070-2074
 - [4.35] M. Okai, T. Tsuchiya, A. Takai and N. Chinone, "Factors limiting the spectral linewidth of CPM-MQW-DFB lasers", *Phot. techn. Lett*, 4, 1992, pp. 526-528
 - [4.36] R. Nagarajan, T. Fukushima, J. Bowers, R. Geels and L. Coldren, "High speed InGaAs/GaAs strained multiple quantum well lasers with low damping", *Appl. Phys. Lett*, 58-21, 1991, pp. 2326-2328
 - [4.37] A. Røyset, L. Bjerkan, D. Myhre, L. Hafskjaer, "Use of dispersive optical fibre for characterisation of chirp in semiconductor laser", *Ell. Lett. Vol. 30*, 1994, pp. 710-712
 - [4.38] R. Srinivasan and J. Cartledge, "On using fibre transfer functions to characterise laser chirp and fibre dispersion", *Phot. Tech. Lett. Vol. 7*, 1995, pp. 1327-1329
 - [4.39] S. Tammela, H. Ludvigsen, T. Kajava, M. Kaivola, "Time-resolved frequency chirp measurement using a silicon-wafer etalon", *Phot. Techn. Lett.*, Vol. 9, 1997, pp. 475-477
 - [4.40] A. Saavedra, R. Passy, J.P. Von der Weid, E. Manganote, A. Bordeaux, "Measurements of chirp and linewidth enhancement factor of DFB-semiconductor lasers using a self-homodyne interferometric system", *IEEE Int. Microwave and Opto-electronics conference*, 1997, Natal-Brazil
 - [4.41] U. Krüger, K. Krüger, "Simultaneous measurement of the linewidth, linewidth enhancement factor and FM and AM Response of a semiconductor laser", *JLT*, Vol. 13.1995, pp. 592-597

CHAPTER 5

Advanced parameter extraction for laser diodes

5.1 Introduction

This chapter treats the more advanced methods for parameter extraction applied to laser diodes. Contrary to the methods discussed previously, the advanced methods use results from measurements that are relatively simple but which have a high information content. Hence, a complex parameter extraction and fitting procedure is needed to convert the measurement results into physical parameters.

The first part of this chapter will treat the parameter extraction by means of the amplified spontaneous emission spectrum. The general description of the procedure will be illustrated with examples for Fabry-Perot and DFB laser diodes. The parameter extraction based on the amplified spontaneous emission spectrum in the case of a DBR laser diode will be treated in Chapter 8. The second part of the chapter treats the parameter extraction based on the relative intensity noise spectrum.

Once the parameter extraction methods are given for a single laser diode, the third part of the chapter will examine the combined situation. First, the method of combining different results obtained on a single laser diode will be described. Secondly, a method will be presented to combine the information obtained on a specific set of laser diodes.

5.2 Extraction on amplified spontaneous emission spectra

The shape of the amplified spontaneous emission spectrum of laser diodes is determined by the entire laser cavity. Hence, it contains a lot of information on that cavity. However it is not possible to determine the information on the corresponding physical parameter directly from the amplified spontaneous emission spectrum. Due to the complex combination of the many parameters, parameter fitting is the only possible solution.

Firstly a number of general aspects of the parameter fitting process for an amplified spontaneous emission spectrum will be presented, secondly certain practical issues will be illustrated with the DFB laser diode example. Finally the example of a Fabry-Perot laser diode will illustrate that mathematical pitfalls are not always clearly visible.

5.2.1 *General aspects of fitting on amplified spontaneous emission spectra*

5.2.1.1 *The models*

In order to use fitting as a method for parameter extraction, an analytical model is needed to describe the amplified spontaneous emission spectrum of a laser diode. In theory it is possible to use a non-analytical model, but these models normally have longer evaluation times, which reduce their usability in the case of fitting procedures. Furthermore it is possible for most laser diodes to write such an analytical model based on the transfer matrix method. This method has been used several times in the past to derive models for DFB [5.1], [5.2], [5.3] and DBR laser diodes [5.4].

In general these models have a larger number of (physical) parameters than can be fitted. For example the models are based on the modal gain, which is always expressed as a combination of the material gain, the confinement factor and the internal loss (as indicated in expression (4.2) of the previous chapter). This implies that only the combination of those parameters can be determined and not their separate values. Another example in the case of a DFB laser diode, is the combination of the period of a diffraction grating and the effective index. Only the combination of these two is determining the reflection spectrum of the grating. These and a few other examples are illustrated with the examples in this chapter and in Chapter 8

Besides the combinations of parameters, there are also mathematical phenomena which can lead to a good fit result while the parameters do not form a realistic physical solution. The example of the Fabry-Perot laser diode will show such an example.

5.2.1.2 *The fitting process*

To accomplish a fit successfully, it is important to choose the start values for the models with great care. If these start values are near to the solution to be found, the chances of reaching that solution will increase and the calculation time needed will decrease.

As mentioned in Chapter 2 (Section 2.5) extra terms can be added to the cost function in order to increase the chances of finding a physical solution.

5.2.1.3 *The reliability and the accuracy of the solution*

The many dimensions, the complexity of the model and the method of operation of the optimising algorithm make it almost impossible to use the resulting value of the cost function as a quality or accuracy indicator for the solution found. The fitting is merely a mathematical process which is stopped at a certain time. However the quality of the solution found is depending on the interpretation of the values obtained.

It is still possible to get some indication of quality and accuracy. Since the models are describing physical processes and since the measurements are done on real devices, a second fit can be realised under slightly different conditions for the laser diode. For example a second amplified spontaneous emission spectrum can be measured with a different bias current going through the laser diode. A fit on this spectrum will result in a new set parameters of which certain values should correspond with the values obtained in the first fit. Parameters such as the coupling coefficient or the period of the diffraction grating are invariant to the bias current. Other parameters such as effective index or optical gain should vary in a specific way as a function of current (e.g. the optical gain should increase with increasing current). If the

parameters obtained from the different fits show the right trends, the parameter values can be found more reliable.

Another method to determine accuracy and reliability is to check if a certain model (or a certain cost function to be more exact) can or cannot determine a certain parameter. Since all parameters have a different mathematical relationship to the end results, an identical variation can have very different effects to the end result. For example a small change in the value of the effective index will cause the reflection spectrum of the Bragg grating to shift to a different wavelength. This will drastically change the appearance of the calculated spectrum. In the case of a DFB laser diode, such a sensitivity analysis has been realised during the course of this work. The results have been published in [5.5].

A possible method to get an indication on the overall accuracy of the parameters is to check whether or not a solution can be found by varying the parameter. The parameter under investigation is slightly changed and the fitting process is applied. During the optimisation, all parameters can be varied by the algorithm, except the one under investigation. In other terms, the algorithm is trying to compensate the variation by changing the values of the other parameters. Once the newly found solution (its cost function) deviates a certain amount from the originally found solution, the error margin for the parameter under investigation has been found. The main drawback of this method is that for each parameter a large number of fitting procedures have to be executed, which renders the overall process very cumbersome and time consuming. Furthermore it is not entirely certain that the value of the cost function is indeed the proper way to compare the different solutions.

5.2.2 ASE based extraction for DFB laser diodes

In the case of a DFB laser diode, a diffraction grating is incorporated into the cavity to stabilise the wavelength. So the model will contain extra parameters besides the normal cavity parameters such as the confinement factor (G), the optical gain (g), the internal loss (a_i), the effective index (n_{eff}), the length (L) and the reflection coefficients (r_1 en r_2). These extra parameters are the grating period (L) and the coupling coefficient (k), which describes the strength of coupling between the forward and backward propagating waves.

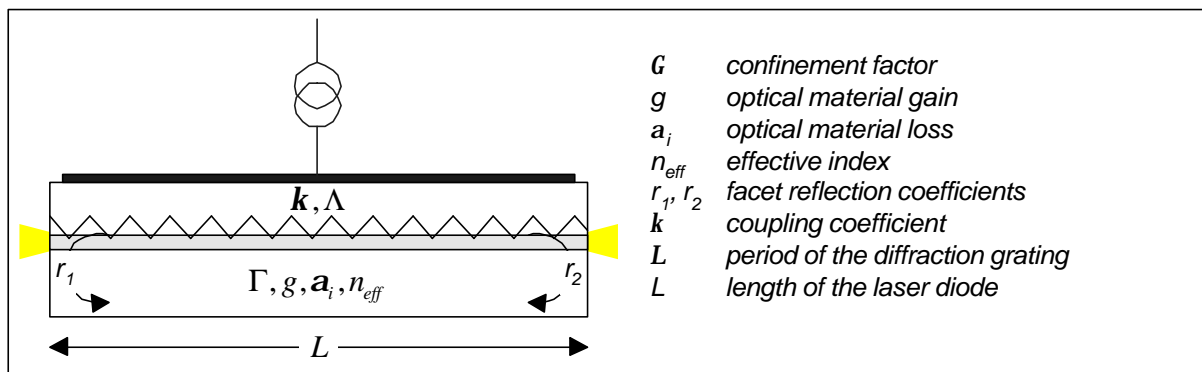


Figure 5-1: Schematic representation of a DFB laser diode and the parameters of the corresponding model.

The coupling between both waves through the diffraction grating is possible since the effective index is periodic due to the presence of the grating (index coupling). If the grating is also (partly) present in the active region of the waveguide, the optical gain will also become

(partly) periodic. Hence, gain coupling between both waves will occur. The amplified spontaneous emission spectrum model is based on calculus with complex numbers. This method expresses effects relating to the effective index as imaginary numbers and effects relating to the optical gain are expressed as real numbers. Hence the coupling coefficient will be a complex number, the index coupling and the gain coupling will be represented respectively by the real and imaginary part of the number.

5.2.2.1 The amplified spontaneous emission spectrum model

This thesis uses the model originally proposed by T. Makino and J. Glinski [5.6], as the analytical model for a DFB laser diode. The model calculates the amplified spontaneous emission spectrum by means of the transfer matrix method. The deduction of the expression (5.1) can be found in the reference but nevertheless it is relevant to interpret the expression in this section.

$$P_{ASE}(I) = C(1 - |r_2|^2) \frac{\int_0^L (|F_L|^2 + |F_R|^2) dz}{|RNT|^2} \quad (5.1)$$

where:

$$\begin{aligned} F_L &= a_{22} + r_1 a_{21} \\ F_R &= a_{12} + r_1 a_{11} \end{aligned} \quad (5.2)$$

and

$$RNT = a_{22}(L) + r_1 a_{21}(L) - r_2 a_{12}(L) - r_1 r_2 a_{11}(L) \quad (5.3)$$

The coefficients of the transfer matrix (a_{11} , a_{12} , a_{22} , a_{21}) are given by:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \left(\cosh(\mathbf{d}z) - j\Delta\mathbf{b} \frac{\sinh(\mathbf{d}z)}{\mathbf{d}} \right) e^{-j\mathbf{b}_g z} \\ a_{12} &= j\mathbf{k} \frac{\sinh(\mathbf{d}z)}{\mathbf{d}} e^{-j\mathbf{b}_g z} \\ a_{22} &= \left(\cosh(\mathbf{d}z) + j\Delta\mathbf{b} \frac{\sinh(\mathbf{d}z)}{\mathbf{d}} \right) e^{+j\mathbf{b}_g z} \\ a_{21} &= -j\mathbf{k} \frac{\sinh(\mathbf{d}z)}{\mathbf{d}} e^{+j\mathbf{b}_g z} \end{aligned} \quad (5.4)$$

In which \mathbf{d} is defined as:

$$\mathbf{d} = \sqrt{\mathbf{k}^2 - (\Delta\mathbf{b})^2} \quad (5.5)$$

and $\Delta\mathbf{b}$ is defined by:

$$\Delta\mathbf{b} = \frac{2pn_{eff}}{\mathbf{l}} - \mathbf{b}_g + j \frac{\Gamma g - \mathbf{a}_{int}}{2} \quad (5.6)$$

$$\mathbf{b}_g = \frac{\mathbf{p}}{\Lambda} \quad (5.7)$$

Before it is possible to use expression (5.1) in the context of a parameter extraction process, a model needs to be specified for the optical gain and the effective index. If it is

assumed that both temperature and dynamic effects can be neglected, it is possible to use the models as defined in (5.8) and (5.9) for respectively the optical gain and the effective index.

$$g = g_0 - g_2 \left(E - E_{piek} \right)^2 \tag{5.8}$$

$$n_{eff} = n_0 + n_1 \mathbf{l} \tag{5.9}$$

5.2.2.2 Evaluation of the ASE spectrum model of a DFB laser diode

A. PARAMETER COMBINATIONS

As it is the case for all amplified spontaneous emission spectrum models, the numerical model for the DFB laser diode only allows to extract certain parameters. The expression (5.6) shows that (as for all laser models) the material optical gain (g), the internal loss (\mathbf{a}_i) and the confinement factor (\mathbf{G}) are always combined, thus preventing a separate extraction. The confinement factor and the internal loss can be seen respectively as a scaling factor and an offset with respect to the material gain.

Since the DFB laser diode uses a built in diffraction grating, only the combination of the period of the grating and the value of the effective index is important, as indicated by expressions (5.6) and (5.7). In other terms, a wrongly estimated grating period results in a good fit by changing the effective index value. Such an example can be seen in Figure 5-2 and in Figure 5-3. The results shown in both figures are obtained by fitting on the same amplified spontaneous emission spectrum. Only the value of the grating period is different. In both cases the Bragg wavelength is $1.554 \mu\text{m}$ ($\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda$). As expected the difference in grating period (0.240 en $0.241 \mu\text{m}$) is fully compensated by a difference in effective index. At the Bragg wavelength these values are respectively 3.2371 and 3.2239 .

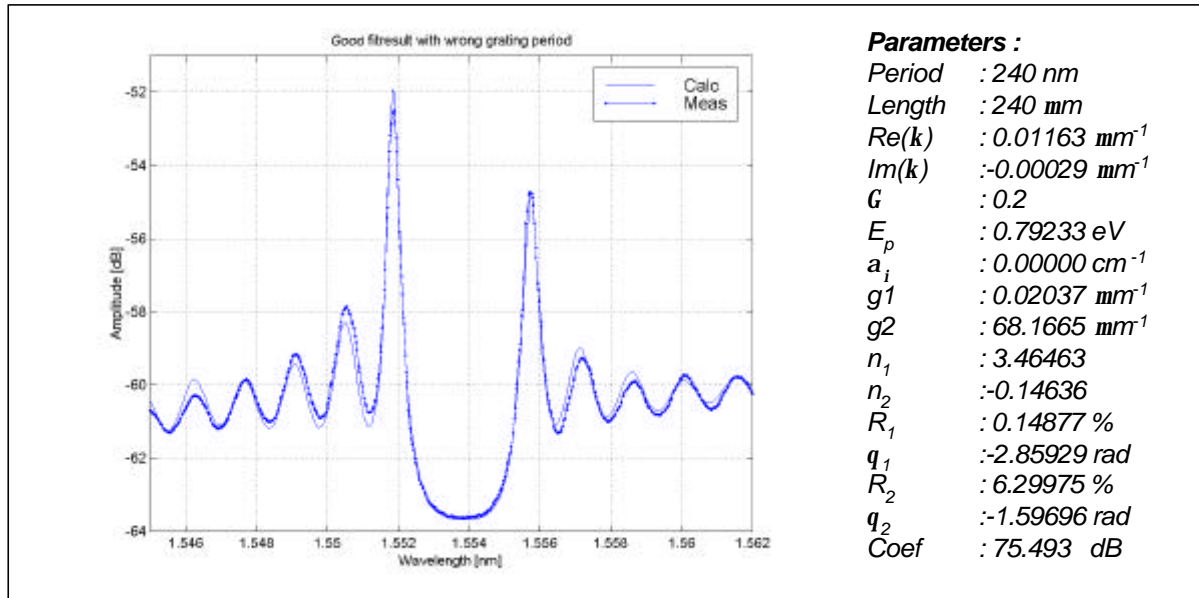


Figure 5-2: An example of a “good” fit result, although an incorrect value has been specified for the grating period.

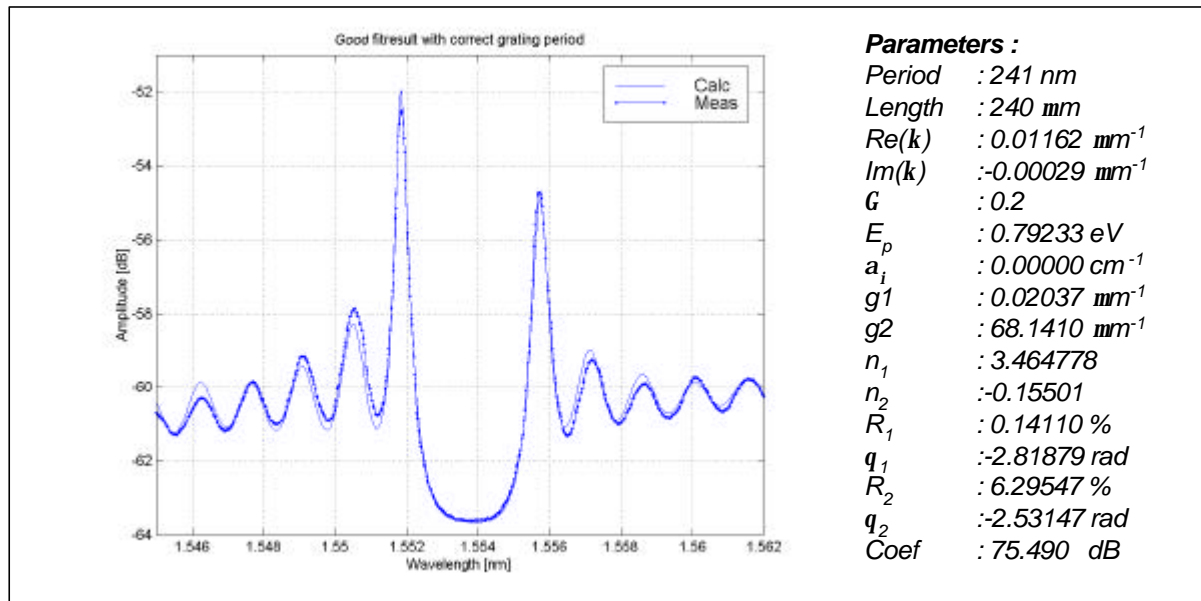


Figure 5-3: An example of a “good” fit, this time a correct value has been used for the grating period.

B. SENSITIVITY OF THE COST FUNCTION TO ITS PARAMETERS

In order to study the sensitivity of the cost function to its parameters, the values of the parameters were varied for a given solution (obtained by a fitting process). Each parameter was varied over an identical range of -20 up to +20 % and for each variation of each parameter the change in cost function was calculated and expressed as a relative difference (%) with respect to the original value of the cost function. The results are shown in Figure 5-4.

The figure clearly indicates that the sensitivity of the cost function is different for each parameter. The period of the diffraction grating (L) and the effective index (on the figure its wavelength independent component, n_1) have a similar influence on the cost function. This is logical since it is the combination of both that determines the spectral properties of the Bragg diffraction grating. Already a small change in their parameter values shifts the reflection peak to a different wavelength and the value of the cost function increases enormously. Once the reflection peak is outside the wavelength range calculated, the cost function does no longer vary. In that case the calculated spectrum resembles the amplified spontaneous emission spectrum of a Fabry-Perot laser diode which means that the grating period no longer influences the calculated spectrum. The effective index causes the Fabry-Perot modes to shift hence causing a periodic effect in the cost function.

This behaviour of the cost function with respect to the effective index and the grating period, explains why a good start value for these parameters is needed. Once the effect of the Bragg grating is outside the calculated range due to the parameter values (or more specifically their combination), the cost function has not only a large value but it does not have any gradient which can steer the optimisation algorithm towards a correct solution. Hence, it is not only inefficient to choose the value of these parameter at random, a bad choice and even prevent the algorithm to find any solution.

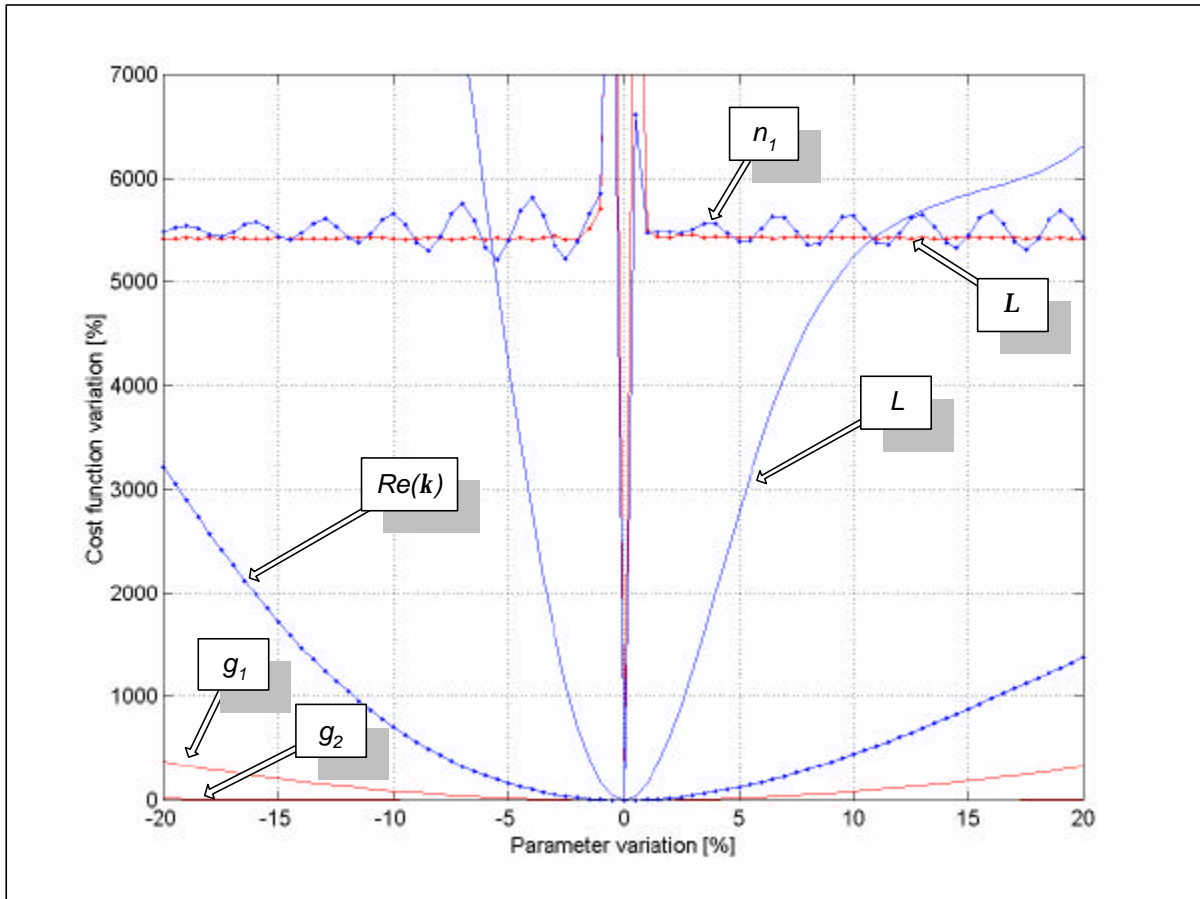


Figure 5-4: The change of the SQE cost function value (in percent) as a function of the relative change of certain parameters.

The figure seems to indicate that the coupling coefficients and the optical gain coefficients have no large effect on the value of the cost function, which would mean that they cannot be determined. However the effect of the effective index and the grating period is so large that it distorts the figure. If the graph is reduced to normal proportions as shown in Figure 5-5, it is clear that the values for the coupling coefficient and the gain coefficients can be determined. Only the value of g_2 which represents the curvature of the optical gain can be determined less accurately. This is due to the relatively small spectral range around the stop band in which the model is calculated. If this range would be chosen larger, the value of the curvature could be calculated more accurately.

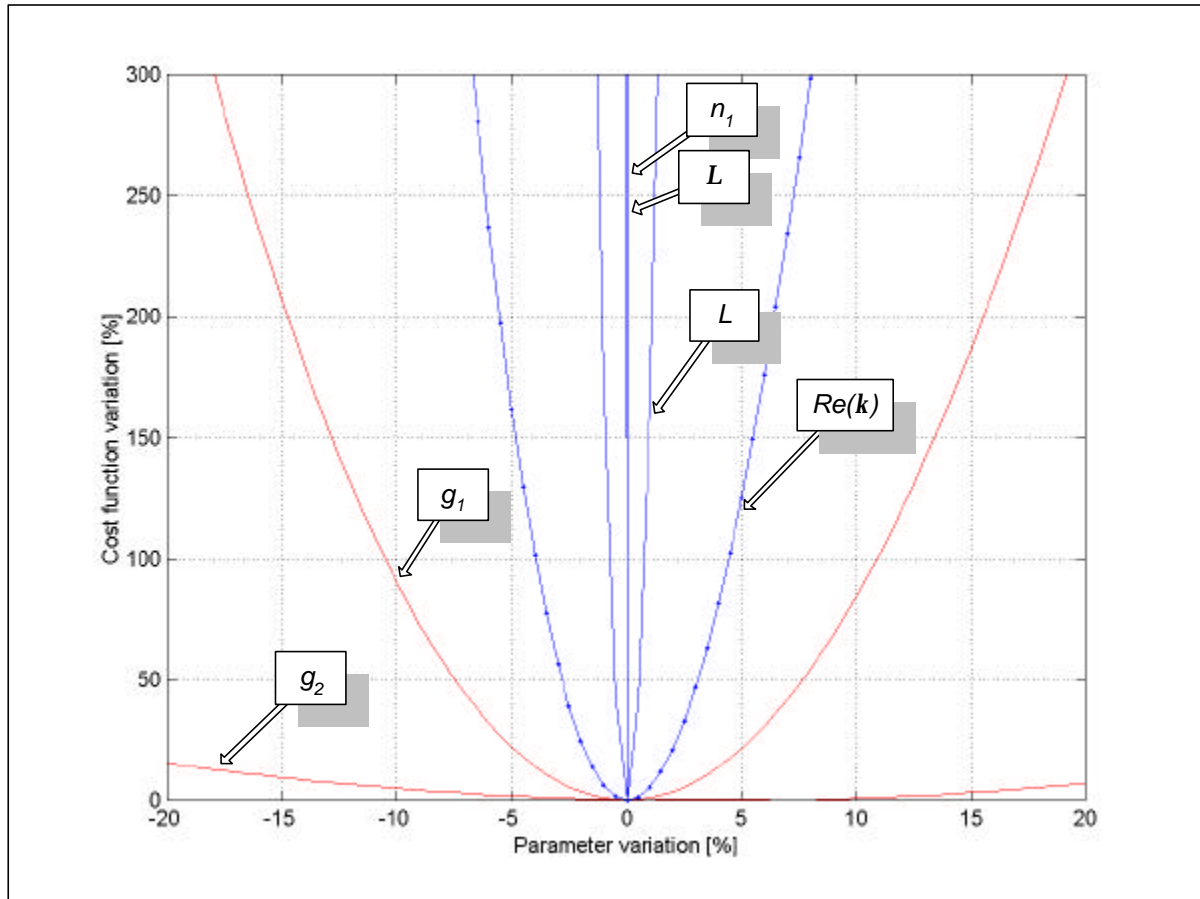


Figure 5-5: Detail of the changes in the value of the SQE cost function when changing certain parameters.

5.2.2.3 Used fitting procedure

The large number of parameters make it impossible to start from random values for the parameters and to hope that the optimisation algorithm is successful in finding a solution. Due to the many local optima it is necessary to choose the start values carefully. For example the knowledge of the Bragg wavelength and the period of the diffraction grating can be used to determine a good first approximation of the value for the effective index by means of expression (5.10).

$$l_B = 2\Lambda n_{eff} \quad (5.10)$$

Once a first fit is realised the higher orders can be added to refine the model. After finding a solution for a specific bias current, the solution can be used to initiate a fully automated procedure to apply parameter extraction on amplified spontaneous emission spectra measured at slightly different bias currents.

5.2.3 ASE based extraction for Fabry-Perot laser diodes

Due to the simple structure of a Fabry-Perot laser diode, most information can be extracted in a direct way from the amplified spontaneous emission spectrum. As mentioned previously the Hakki-Paoli method can determine the modal optical gain and the distance

between the modes can be used to determine the group index. However it is also possible to fit the spectrum to a numerical model in order to obtain the effective index and to get a better view on the different parameter combinations in the model. Furthermore, the Fabry-Perot laser diode and its model are also interesting to illustrate mathematical aspects of numerical fitting on complex models.

5.2.3.1 The amplified spontaneous emission spectrum model for a Fabry-Perot laser diode

To derive an analytical model for the amplified spontaneous emission spectrum of a Fabry-Perot laser diode, the same theory as in the case of a DFB laser diode can be used. Since a Fabry-Perot laser diode does not contain a diffraction grating, the coupling coefficient is equal to zero. Some minor calculations lead to expression (5.11).

$$P_{ASE}(\mathbf{I}) = \frac{r_1^2 e^{(\Gamma g - a_i)L} - e^{-(\Gamma g - a_i)L} + 1 + r_1^2}{(\Gamma g - a_i) \left(2r_1 r_2 + e^{-(\Gamma g - a_i)L} + r_1^2 r_2^2 e^{(\Gamma g - a_i)L} - 4r_1 r_2 \cos^2\left(\frac{2\mathbf{p}n_{eff}}{\mathbf{I}} L\right) \right)} \quad (5.11)$$

The models for the optical gain and the effective index are given by expressions (5.12) and (5.13).

$$g = g_0 - g_2 \left(E - E_{piek} \right)^2 \quad (5.12)$$

$$n_{eff} = n_0 + n_1 \mathbf{I} \quad (5.13)$$

5.2.3.2 Evaluation of the model

As in all laser models the modal optical gain is used, hence an independent fit of the material gain, confinement factor and internal loss is impossible.

Although expression (5.11) seems to indicate that the reflection coefficients r_1 and r_2 can be determined independently, the reality teaches that this is not the case. When realistic values for all parameters are entered in the model, the denominator of the expression is more or less constant. Which leaves only the nominator as the “fitting sensitive” part. In that nominator the two reflection coefficients always appear in combination, hence preventing an independent fit.

Furthermore a certain mathematical symmetry of the model exists with respect to the two parameters specifying the optical gain (g_1 en g_2). This feature of the model is illustrated in Figure 5-6, which shows the ratio between the power in the outer modes of the spectrum compared with the mode in the centre of the wavelength range calculated. The ratio is plotted as a function of the two gain parameters g_1 en g_2 . All points above the zero-plane are possibly “good” solutions, in other words solutions where the centre modes of the wavelength range have a larger amplitude than the modes on the sides. The two vertical lines in the figure represent the values of the material gain as used in the results shown in Figure 5-9 and Figure 5-8.

It should be clear that the example shown in Figure 5-9 is non physical since the gain curve has a minimum instead of a maximum. The calculated amplified spontaneous emission spectrum appears normal due to the fact that the wavelength independent parameter of the

optical gain (g_l) is large. This creates a clear curvature in the expression (5.11), thus resulting in a “good” shape of the calculated amplified spontaneous emission spectrum.

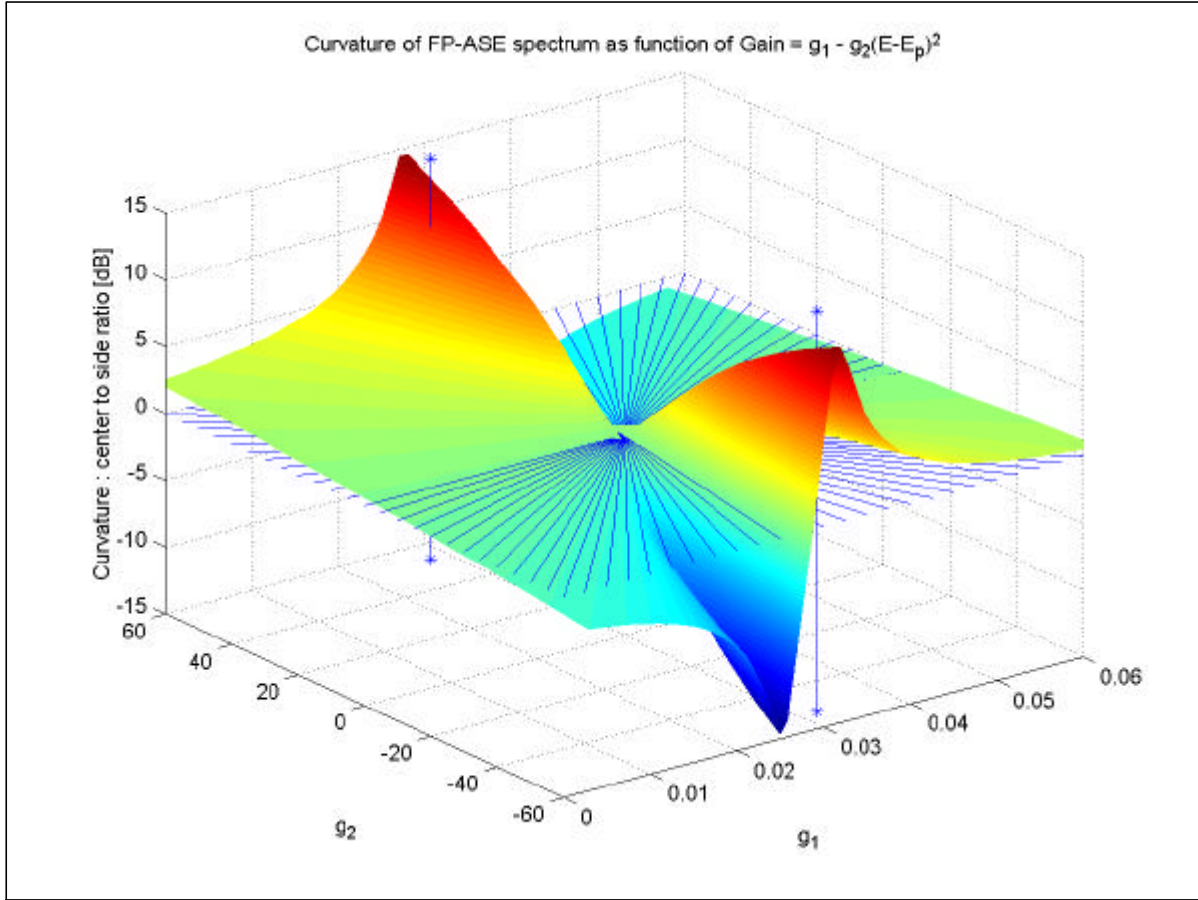


Figure 5-6: The ratio of a mode on the side of the spectrum compared with the mode in the centre of the calculated amplified spontaneous emission spectrum of a Fabry-Perot laser diode. The ratio is plotted as a function of the two material gain parameters.

This phenomenon can be explained more clearly if the expression (5.11) is rewritten in terms of complex numbers, as shown by expression (5.14). The oscillation which is visible in the amplified spontaneous emission spectrum is due to the nominator of the expression and can be interpreted as a vector rotating in the complex plane around the point (1,0). The length of the vector is determined by the reflection coefficients and the optical gain.

$$P_{ASE}(I) = \frac{r_1^2 e^{(\Gamma g - a_i)L} - e^{-(\Gamma g - a_i)L} + 1 + r_1^2}{(\Gamma g - a_i) \left| 1 - r_1 r_2 e^{(\Gamma g - a_i)L} e^{-j \frac{2p_{eff}}{I} L} \right|^2} \quad (5.14)$$

The part of the nominator between the absolute value brackets is called the round-trip optical gain. Figure 5-7 shows how this round-trip optical gain behaves in the complex plane. On the left hand side, the physical situation is represented: below threshold the round-trip optical gain is always smaller than one, resulting in an optical spectrum as shown in Figure 5-8. On the right hand side of Figure 5-7 the non-physical solution is represented: the round-trip

optical is larger than one. Since the complex origin is entirely enclosed by the “circle”, the resulting amplified spontaneous emission spectrum appears normal (cf. Figure 5-9).

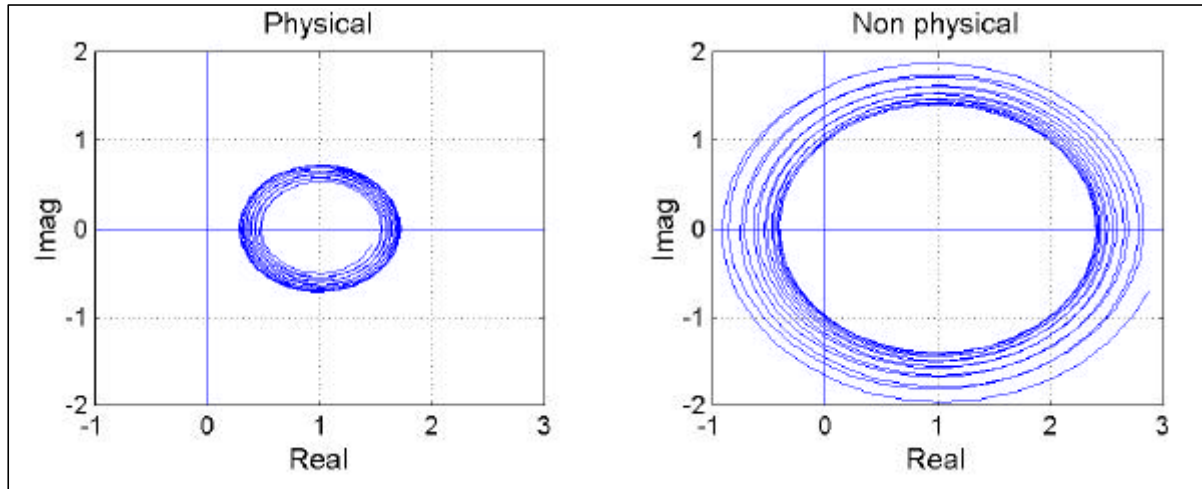


Figure 5-7: The track of the round-trip optical gain as function of changing wavelength, drawn in the complex plane. On the left hand side the amplified spontaneous emission spectrum for a physical parameter set, on the right hand side a non-physical parameter set.

This non-physical solution can be avoided by preventing a negative curvature parameter (g_2) for the material gain (e.g. by adding extra terms). Furthermore the condition that the round-trip gain has to be less than one, can be added. This results in a condition for the wavelength independent parameter g_1 , as indicated by expression (5.15).

$$g_1 < \frac{1}{\Gamma} \left(\frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{r_1 r_2} \right) + a_i \right) \tag{5.15}$$

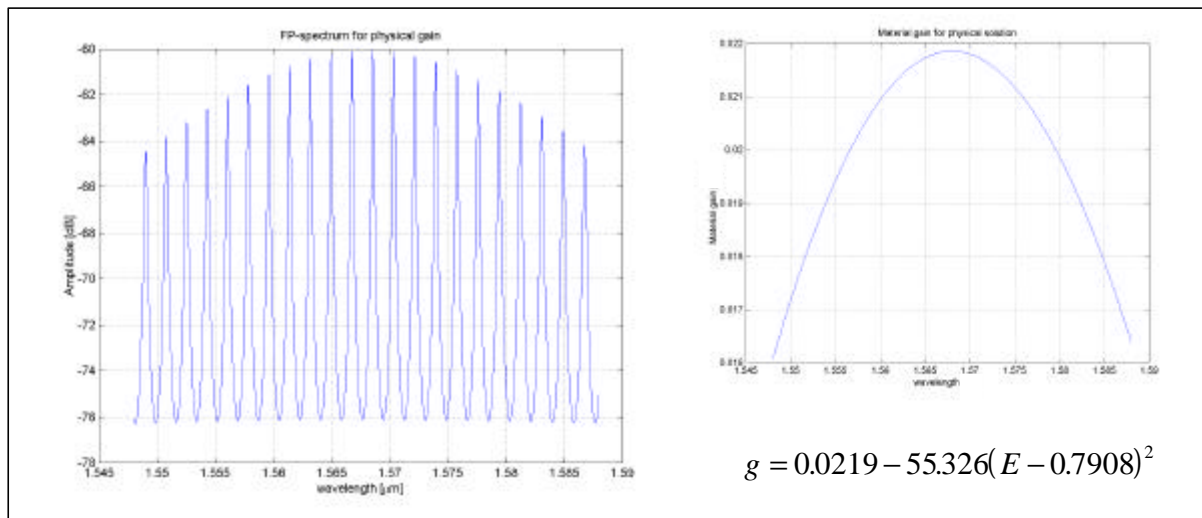


Figure 5-8: On the left, the amplified spontaneous emission spectrum for a Fabry-Perot laser diode calculated for physical values of the material optical gain (shown on the right, plotted as $1/\text{mm}$ vs. mm).

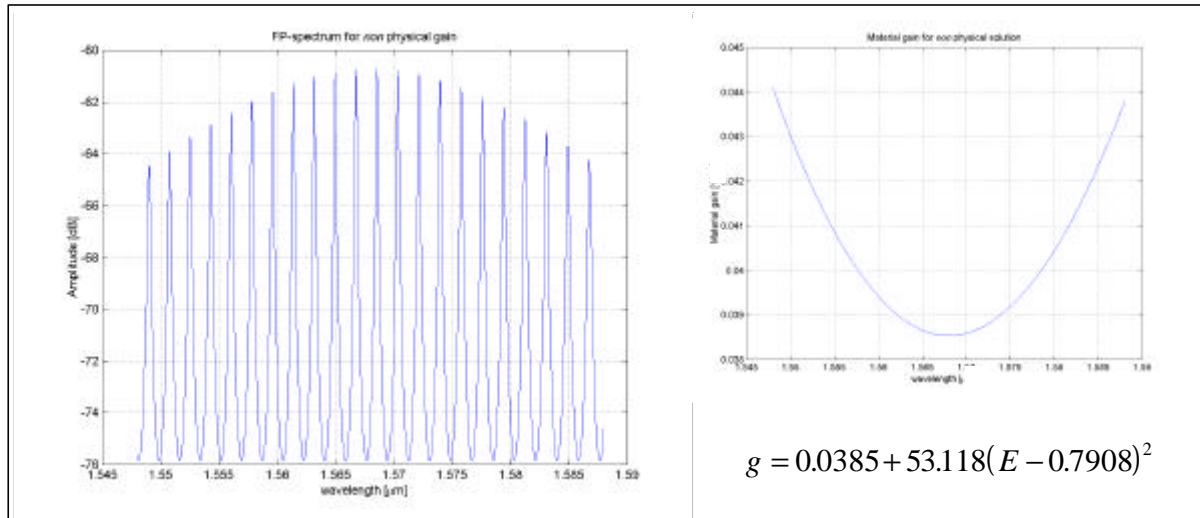


Figure 5-9: On the left a amplified spontaneous emission spectrum of a Fabry-Perot laser diode, on the right the material optical gain [1/mm] as a function of the wavelength [μm]. A non-physical situation.

5.3 Extraction from the relative intensity noise (RIN)

5.3.1 Introduction

Another factor of great importance for laser diodes in telecommunication applications (besides the optical spectrum) is the stability of the optical power. Like all physical systems the optical power emitted by a laser diode contains noise due to the fact that the optical gain is not a ideal process and due to the presence of spontaneous emission.

In the case of laser diodes this intensity noise is expressed as a ratio to the average optical power, hence the term relative intensity noise (RIN). For analogue communication a simple relationship (cf. (5.16)) exists between the modulation depth of the signal, the noise properties of the laser diode (RIN) and the signal-to-noise ratio (SNR). In other terms, laser diodes used for analogue telecommunication have preferably low RIN [5.7].

$$SNR = \frac{\langle i_{signal} \rangle}{\langle i_{noise} \rangle} = \frac{m^2}{2} \frac{\langle P \rangle^2}{\langle |\Delta P(f)|^2 \rangle} = \frac{m^2}{2RIN(f)} \quad (5.16)$$

The RIN number can also be used to evaluate the use of a laser diode in systems for digital communications. In that case the signal-to-noise ratio is not relevant, but the bit-error-rate (BER) [5.8], as specified by expression (5.17).

$$BER < 10^{-9} \Leftrightarrow \frac{1}{RIN} > (11.89)^2 \quad (5.17)$$

The relationships with respect to SNR and BER make the relative intensity noise an interesting characteristic of a laser diode. Furthermore, the RIN is interesting since the measurement is performed at constant bias conditions (no modulated signal), yet it is possible to extract information on the dynamic behaviour of the laser diode based on the relative

intensity noise spectrum. From the rate equations (including the non linear optical gain) the expression (5.18) can be calculated for the relative intensity noise spectrum [5.9].

$$RIN(f) = \frac{\langle |\Delta P(f)|^2 \rangle}{\langle P \rangle^2} = \frac{4}{P} \gamma_{v_{st}} \left(\frac{f^2 + \left(\frac{g^*}{2p}\right)^2}{(f_r^2 - f^2)^2 + \left(\frac{g}{2p}\right)^2 f^2} \right) \quad (5.18)$$

In this expression f represents the frequency, γ the damping and f_r the resonance frequency of the laser diode, δv_{ST} represents the linewidth according to the formula proposed by Schawlow-Townes [5.10]. At low output powers γ^* is equal to γ .

When this expression is compared with the expression (4.15) for the AM modulation response of a laser diode, the relationship becomes clear. The measurement of the relative intensity noise spectrum can be used to determine certain modulation properties of a laser diode. The resemblance between both expressions indicates that the noise measurement models the modulation properties of the active layer. In other terms the intrinsic bandwidth can be determined (i.e. the bandwidth of the laser diode without any parasitic effects).

5.3.2 The measurement and elementary extraction

To determine the relative intensity noise, a detector is used to convert the light into an electrical signal which is being measured with an electrical spectrum analyser. The laser diode is driven at a constant bias current (cf. Figure 5-10). In principle the measurement of relative intensity noise is quite simple since all measurement instruments are commercially available and since the laser diode is not modulated. However the practical experience teaches that the measurements are not trivial. The electrical spectrum analyser has to have a sufficiently low noise and the coupling of laser light to the optical fibre has to be very efficient. If this coupling is not sufficiently good, the noise signal gets to weak and the measurement is impossible.

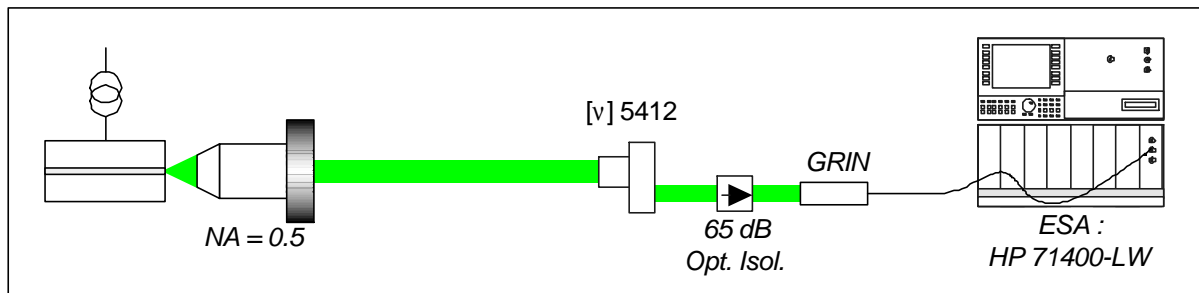


Figure 5-10: The measurement set-up needed to measure the relative intensity noise by means of the HP71400 lightwave signal analyser.

The electrical spectrum analyser is not capable of measuring the relative intensity noise directly, a few calculations are needed to determine its value. The electrical spectrum analyser measures the noise within a certain bandwidth (the resolution bandwidth). Firstly, this power measured has to be reduced to a relative power within an 1 Hz bandwidth. Secondly the noise contributions of the measurement process (i.e. thermal noise of the instrument and shot noise of the detector) have to be subtracted to calculate the relative intensity noise of the laser diode. This calculation is shown in (5.19).

$$\begin{aligned}
\text{RIN}_{\text{system}} &= \text{RIN}_{\text{laser}} + \text{RIN}_{\text{thermal}} + \text{RIN}_{\text{shot}} \\
\text{RIN}_{\text{laser}} &= \text{RIN}_{\text{system}} - \text{RIN}_{\text{thermal}} - \text{RIN}_{\text{shot}} \\
&= \text{RIN}_{\text{system}} - \frac{N_{\text{thermal}}}{P_{\text{avg}}} - \frac{2qI_{\text{DC}}R_L}{I_{\text{DC}}^2 R_L} \\
&= \text{RIN}_{\text{system}} - \frac{N_{\text{thermal}}}{R_L (rP_{\text{avg}(opt)})^2} - \frac{2q}{rP_{\text{avg}(opt)}}
\end{aligned} \tag{5.19}$$

In other words the following parameters need to be known: the thermal noise (N_{thermal}), the noise level of the instrument (without optical power input), the responsivity of the detector (r), the average optical power ($P_{\text{avg}(opt)}$) and the impedance of the instrument ($R_L = 50 \Omega$).

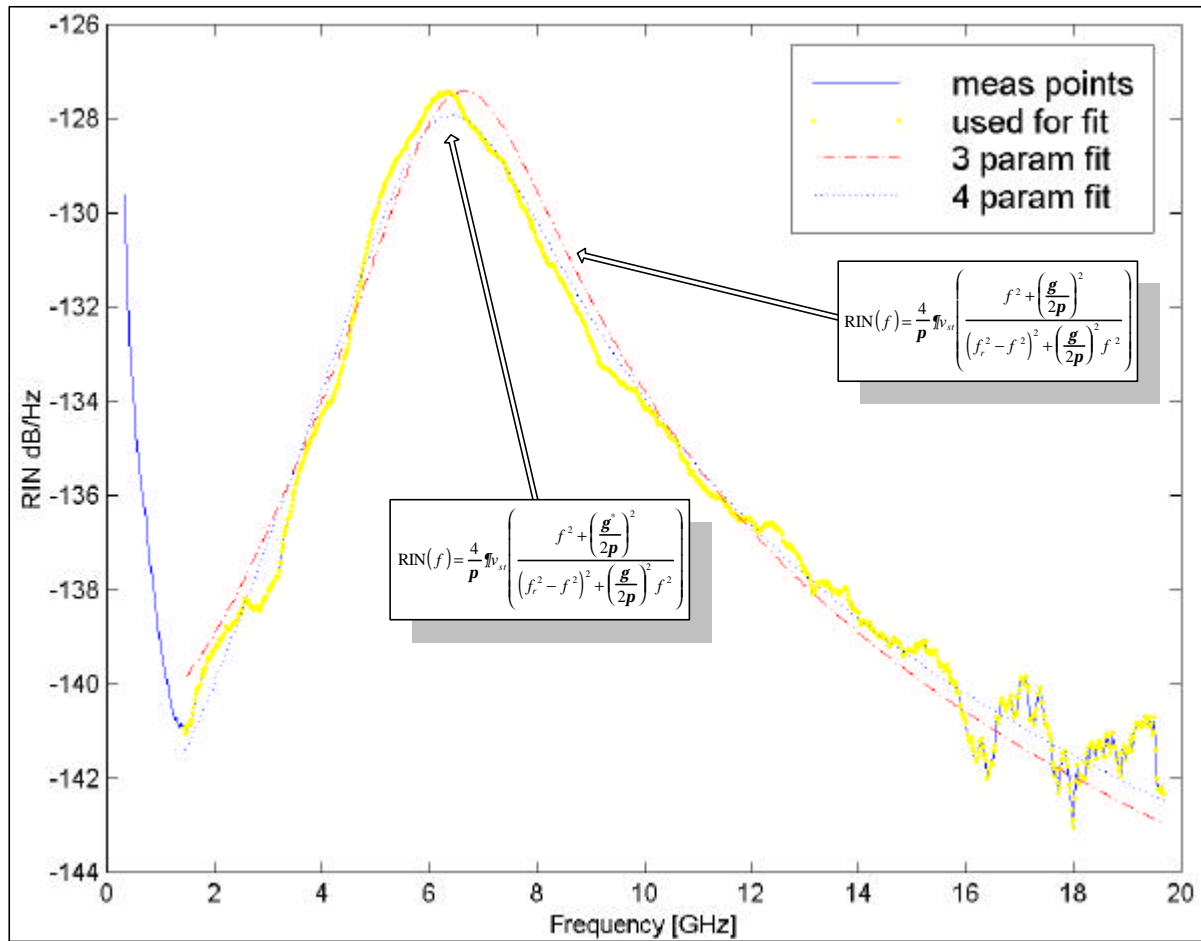


Figure 5-11: AN example of a relative intensity noise spectrum measured and the spectrum fitted for a MQW laser diode. The fit where the non-linear gain was neglected ($g = g^*$) does not give a good result.

Once the relative intensity noise spectrum is calculated, the model given in (5.18) can be fitted to determine the damping and the resonance frequency. The fitting procedure is done on a logarithmic scale for the RIN values and the frequencies are expressed in GHz to ensure numerical stability. Furthermore points which do not correspond with the modelled behaviour (e.g. due to $1/f$ noise) are not taken into account. Under these assumptions the fitting procedure is very well conditioned such random values can be used as start values of the parameters.

Although the time needed to achieve a good fit can be easily reduced, if the maximum of the relative intensity noise spectrum is taken as start value of the resonance frequency.

Once the relative intensity noise spectra measured (as a function of the bias current) are fitted, the parameters obtained can be used to determine a number of physical parameters of the laser diode. This is realised by plotting the parameters according to the graphs presented in Figure 5-12 and applying linear regression. Especially the relationship between the damping and the resonance frequency and the relationship between the bias current and the resonance frequency are interesting. They make it possible to extract respectively the “K-factor” [5.11], [5.12] and the “D-factor”. Both factors can be used to determine further properties and parameters of the laser diode.

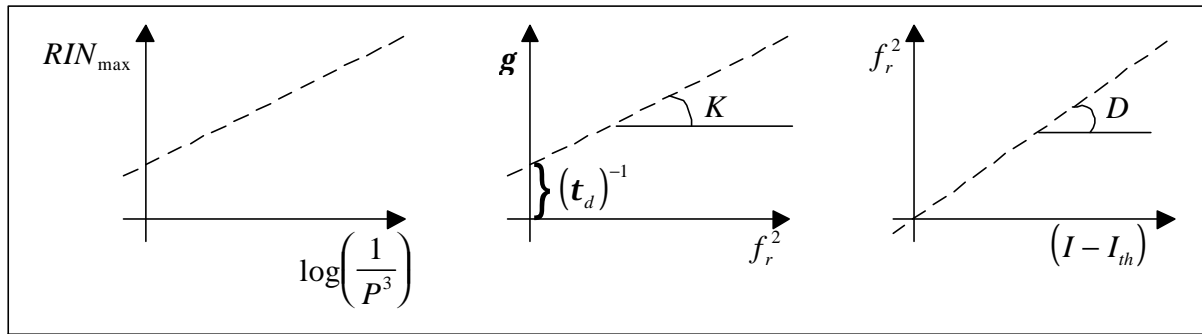


Figure 5-12: Interpretations of the parameters fitted from the relative intensity noise spectra.

5.3.3 Extraction of component parameters

5.3.3.1 The “D-factor”: differential optical gain

To convert the “D-factor” into component parameters, the expression (5.20) for the resonance frequency is determined from the rate equations [5.13].

$$f_r^2 = \frac{n_g}{4p^2 t_p} \frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} S \tag{5.20}$$

In this expression S represents the photon density, which can be expressed as a function of the threshold current:

$$S = \frac{h_i t_p (I - I_{th})}{qwdL} \tag{5.21}$$

The combination of (5.20) and (5.21) gives the relationship with the D-factor:

$$\frac{f_r^2}{(I - I_{th})} = \frac{h_i v_g}{4p^2 qwdL} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right) = D \tag{5.22}$$

In other terms, if the dimensions of the cavity (dwL) and the group velocity (v_g) are known, the differential optical gain can be calculated. De injection efficiency (h_i) is normally (almost) equal to one.

5.3.3.2 The “K-factor”: Intrinsic maximal bandwidth and non linear gain coefficient

As indicated by expression (5.23), the K-factor directly determines the intrinsic maximal bandwidth of the laser diode [5.14]; in other words the bandwidth of a laser diode at a given bias current without the presence of any RC-parasitic effects.

$$f_{\max} = \frac{2p\sqrt{2}}{K} \quad (5.23)$$

To determine the more physical parameters of a laser diode by means of the K-factor, an expression for the damping of the laser diode needs to be derived from the rate equations [5.14], as given by (5.24).

$$g = \frac{1}{t_d} + 4p^2 \left(t_p + \frac{e}{v_g \left(\frac{qG}{qN} \right)} \right) f_r^2 \quad (5.24)$$

When this expression is compared with the line of linear regression in Figure 5-12, it follows that K and g_0 are given by (5.25).

$$K = 4p^2 \left(t_p + \frac{e}{v_g \left(\frac{qG}{qN} \right)} \right) \quad (5.25)$$

The same publication also gives an expression for g^* as a function of the physical parameters. This is shown in expression (5.26).

$$g_0 = \frac{1}{t_d} + 4p^2 t_p f_r^2 \quad (5.26)$$

This expression indicates that applying linear regression to the values of g^* versus the squared of the resonance frequency could be used to determine the photon lifetime. However this is not possible. As Figure 5-13 indicates, the expression of the relative intensity noise spectrum (5.18) is almost insensitive to the value of g^* , which renders the value fitted unsuitable for any further extraction.

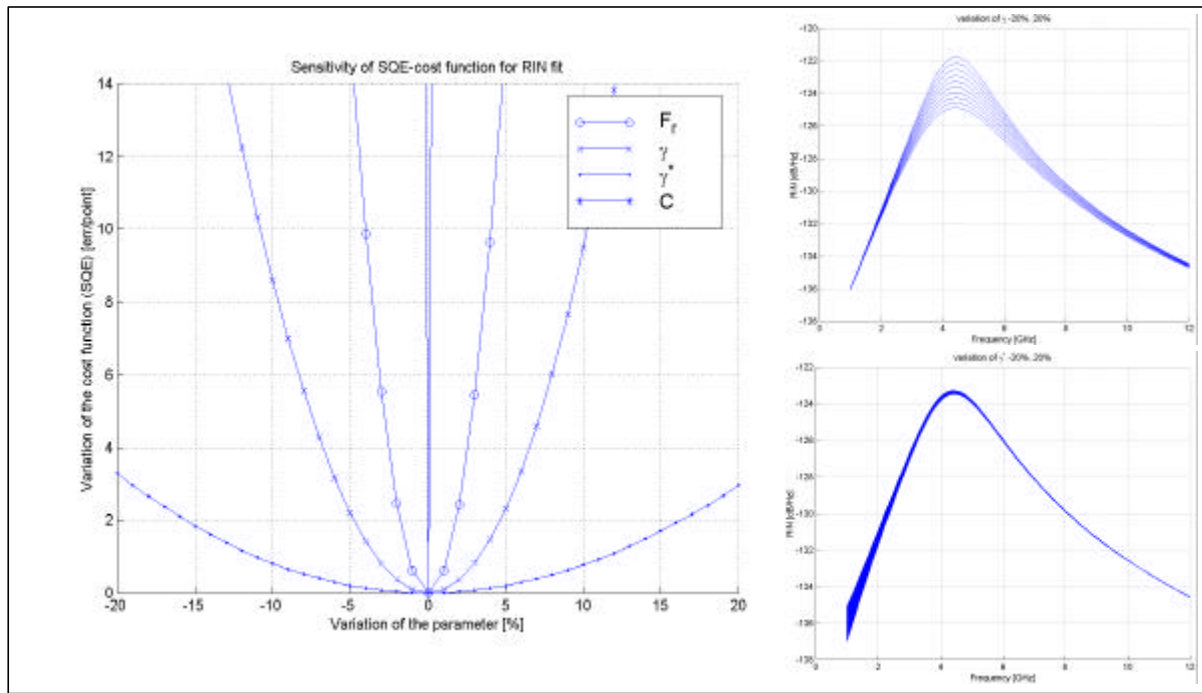


Figure 5-13: On the left hand side the change in cost function as function of the four parameters of the relative intensity noise model. On the right hand side the variation in the relative intensity noise spectrum for a change in damping (top) and a change in g^* (bottom).

5.3.3.3 Analysis of the extraction accuracy

It is not only relevant to determine the values of the parameters, it is also interesting to estimate the accuracy of the parameters. Figure 5-13 clearly indicates that only the damping (g) and the resonance frequency (f_r) can be used for further extraction. If it is assumed that these parameters fitted are “sufficiently accurate”, an error analysis can be performed for the further calculations based on the “D-factor”, the “K-factor” and their further parameters e and $\frac{fG}{fN}$.

Firstly the calculation of the “D-factor” and the “K-factor” has to be examined. In theory linear regression results in “the” best fitting line though the set of points. However in practice there are a number of best fitting lines, one line for each combination of points. The slope and the intercept found by the linear regression will differ if the number of points used for the regression changes. Hence, the corresponding factors and their derived parameters will change.

In the case of the “D-factor” the information that the line has to go through the origin of the graph can be used. In other words, it is possible to determine a best fitting line (no constraint with respect to the origin) for the different point sets. The results of these linear regressions can be plotted. Initially (when very few points are used) the intercept will be negative and as more and more points are used it will become positive. Hence it can be assumed that the correct value of the “D-factor” corresponds with the slope calculated for the number of points where the intercept reaches zero. This process is graphically represented in Figure 5-14.

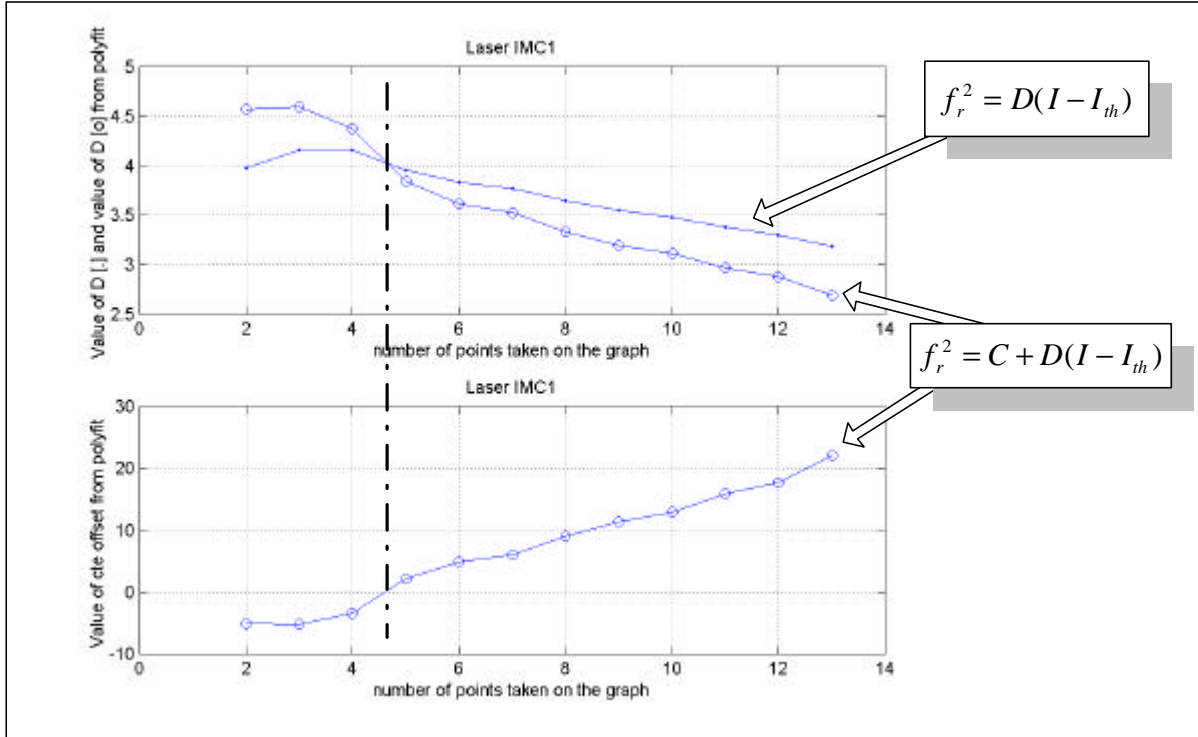


Figure 5-14: The upper graph represents the values for the D-factor, determined from the linear regression and the values determined by fitting a line through the origin. The lower graph represents the value of the intercept of the linear regression.

In the case of the “K-factor” it is not possible to use such reasoning since the corresponding expression (5.24) always has an intercept. However it can be assumed that the number of points needed to determine the “K-factor” is identical to the number of points used to determine “the” D-factor. Another possibility is to assume the difference in K-factors represents the accuracy of the extraction. The first value can be neglected since only two points are used for the linear regression.

The further error analysis of the parameter extraction can be done by means of the first order approximation as proposed in expression (5.27). This means taking the sum of the partial first derivatives multiplied with the accuracy of each parameter.

$$\Delta F(p_0, p_1, \dots, p_N) = \sum_{i=0}^N \left(\left(\frac{\partial F(p_i)}{\partial p_i} \right) \Delta p_i \right) \quad (5.27)$$

When doing so, the derivative should be taken down to the basic parameters. For example take the derivative to the parameters specifying the differential optical gain instead of taken the derivative to the differential gain. If this is not done, the error assessment of the non-linear optical gain indicates a quasi independence with respect to the value of the internal loss; this is not correct. The expressions for the different partial derivatives can be found in Appendix C.

5.3.3.4 Overall overview of the extraction based on the RIN measurements

An overall overview of the parameter extraction procedure based on the relative intensity noise spectrum is shown in Figure 5-15. The figure also shows an example of measured and fitted curves for the relative intensity noise spectra of a DFB laser diode.

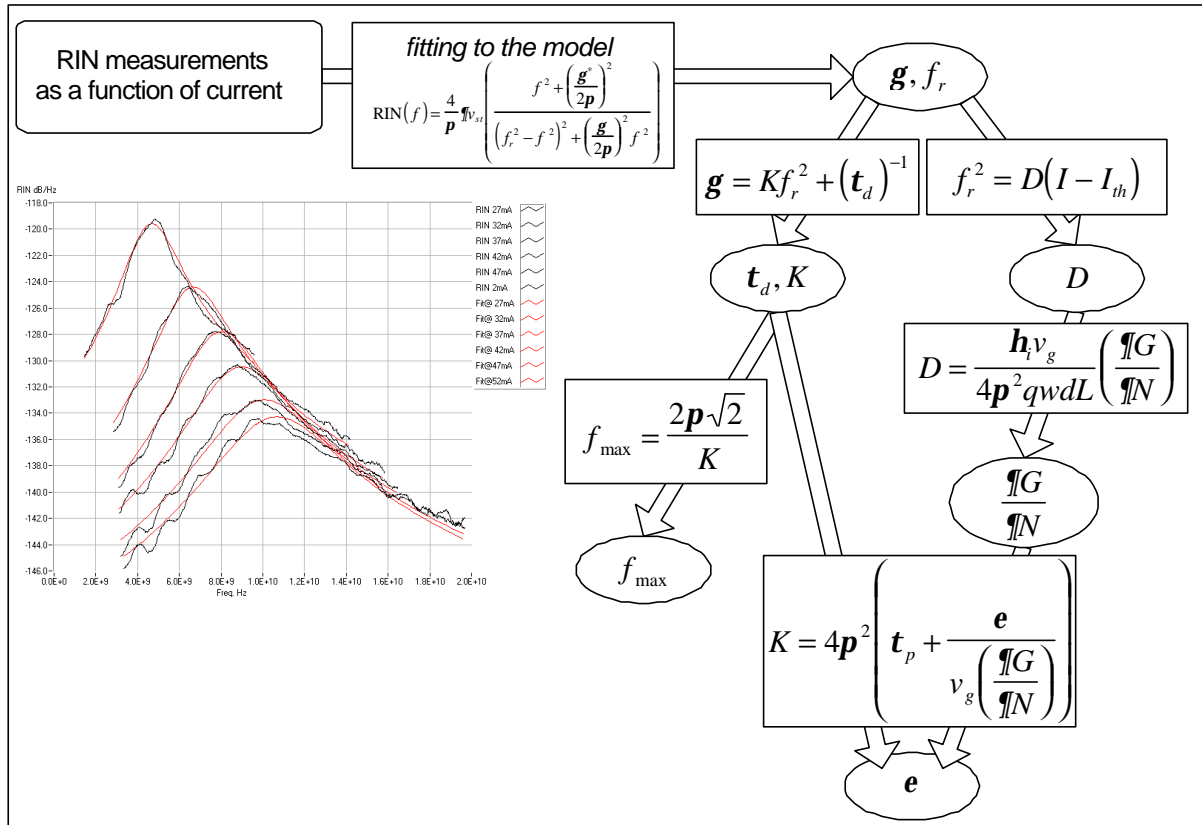


Figure 5-15: Example of the measured relative intensity noise and the corresponding fitted curves. Overview of the parameter extraction procedure based on relative intensity noise measurements

5.4 Extraction based on a combination of measurements

It is quite obvious that it is not possible to extract all parameters based on a single measurement. Even if such a measurement existed, the extraction would not be possible due to the combination of the parameters. If all values for all physical parameters are wanted, the information of several measurement must be combined.

Such an approach has been reported in the past; Hansmann [5.15] used a combination of theoretical expressions and several measurements to arrive at a description of a DFB laser diode. Contrary to the method presented in this work he used relatively complex numerical models and measurements.

In the scope of this thesis it was investigated to what extent it is possible to realise an accurate parameter extraction without the need for complex measurements (e.g. modulation experiments). The first results of this research have been published at the international semiconductor laser conference in 1996 [5.16].

5.4.1 A single laser diode

Several measurements and parameter extraction procedures are used to obtain a complete set of laser diode parameters. It is of great importance to choose the measurements such that they are simple to perform, and still have a large information content. Figure 5-16 gives an overview of the different measurements and their combinations in the case of a DFB

laser diode. As fundamental measurements for the extraction the relative intensity noise and the amplified spontaneous emission spectrum have been chosen. Both measurements meet the requirements of simplicity and information contents.

If the DFB laser diode has no AR facet coatings, the below bandgap method of Ketelsen (cf. Section 4.2.2) can be applied to determine the internal loss of the waveguide. The value found for this loss can be used for the extraction based on the fitting of the amplified spontaneous emission spectrum.

By means of the procedure presented in Section 5.2 the amplified spontaneous emission spectrum can be used to extract parameters. By repeating this procedure for several bias currents, the current dependency of the effective index and the optical gain can be determined. This current dependency can then be used to determine the linewidth enhancement factor (a_{Henry}).

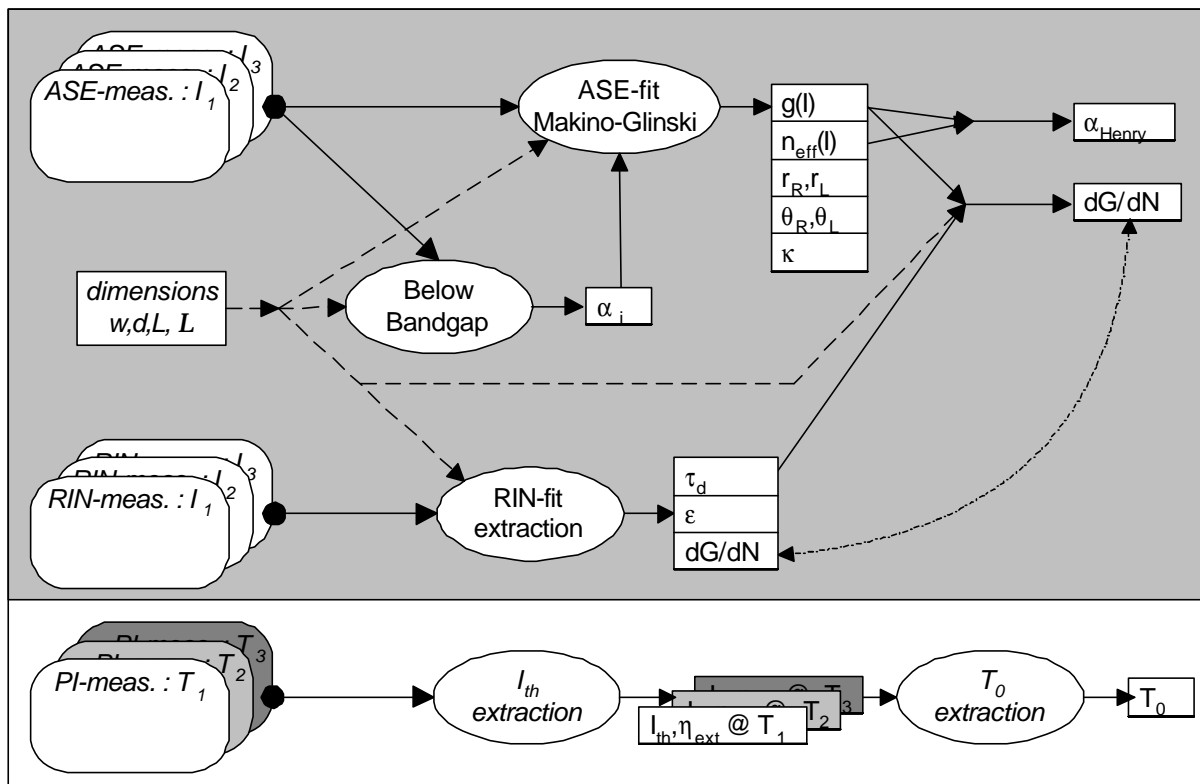


Figure 5-16: Schematic overview of the parameter extraction procedure for a DFB laser diode. The grey background indicates measurement performed at one temperature, the white background (bottom part of the figure) represents measurement performed at several temperatures.

The parameter extraction procedure presented in Section 5.3 makes it possible to extract the differential carrier lifetime (t_d), the differential optical gain (dG/dN) and the non-linear gain coefficient (ϵ). The differential optical gain can be compared with the optical gain versus current by means of expression (5.28). The optical gain versus current is obtained from the extraction based on the amplified spontaneous emission spectrum.

$$\left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N}\right) \frac{t_d}{qwdL} = \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}I}\right) \quad (5.28)$$

A similar procedure can be used in the case of a Fabry-Perot laser diode, an overview of this procedure is given in Figure 5-17.

5.4.2 A set laser diodes

5.4.2.1 Introduction

Different measurement and parameter extraction procedures can be used to achieve a more complete and a better parameter set for a laser diode. However it is not always possible to apply all methods to a component. For example, if a DFB laser diode is equipped with an AR coating on one or both facets the below bandgap method cannot be applied. This makes it impossible to determine the internal loss independently.

If several components are available the results obtained for the different components can be compared and statistically analysed (if the fabrication process is sufficiently uniform). This analysis can increase the accuracy and the consistency of the results. However, if component variants are added to the set, more can be realised. The variants need to be similar yet slightly different, thus enlarging the number of possible measurements. For example, a DFB laser diode with AR coatings cannot be used to determine the internal loss. If a Fabry-Perot laser diode of the same structure is available and it has no coatings, the internal loss can be measured and the result can be used in the case of the DFB. Of course, this is only possible if the realised layer structure is sufficiently uniform.

Prior to discussing a parameter extraction procedure based on several component variants, the set of “interesting” variants needs to be determined. The main objective is still to get a complete picture of the parameter set, without drastically increasing the number of components or measurements.

5.4.2.2 A proposal for a set laser diodes

An interesting set laser diodes can consist of a number of Fabry-Perot laser diodes and a number of DFB laser diodes. All laser diodes have an identical layer structure. The Fabry-Perot laser diodes are preferably available with different lengths. This will make it possible to determine the internal loss based on the inverse efficiency versus length method and check the results with the below bandgap method (if they are not equipped with any AR or HR coatings). The DFB laser diodes have preferably an identical diffraction grating and the different devices may be varied in length and applied coatings.

5.4.2.3 A parameter extraction procedure based on a number of Fabry-Perot laser diodes

The first step of the combined parameter extraction procedure for Fabry-Perot laser diodes with a different length, will be to characterise each Fabry-Perot laser diode separately as shown in Figure 5-17.

As for the characterisation of the DFB laser diode, the amplified spontaneous emission spectrum and the relative intensity noise spectrum are used to determine the parameters at a constant temperature. The main difference between the DFB laser diodes and the Fabry-Perot laser diodes is that the parameter extraction does not involve any fitting procedure. In the case of Fabry-Perot laser diodes, it is possible to use the Hakki-Paoli method to calculate the optical

gain and the group index directly. The internal loss can be determined by the below bandgap of Ketelsen.

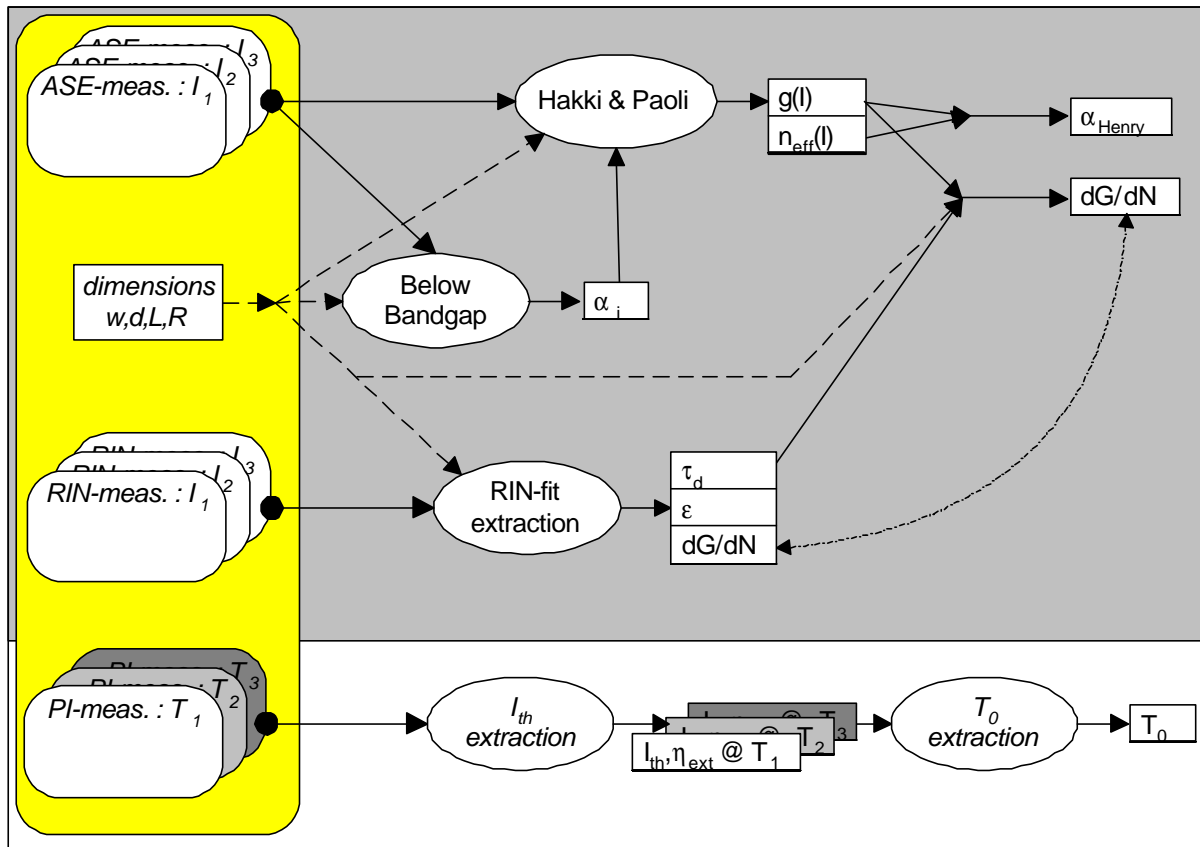


Figure 5-17: Characterisation of a single Fabry-Perot laser diode

If it is required to obtain a full parameter set as a function of temperature, the characterisation can be repeated at different temperatures. Normally this is not required and the temperature characterisation will be limited to determining the threshold current as a function of temperature. This information can then be used to calculate the characteristic temperature of the laser diode.

Once the characterisation of each single Fabry-Perot laser diode has been realised, the information can be combined to do further parameter extraction, shown in Figure 5-18. Such multiple laser diode characterisation makes it possible to determine a new parameter: the internal efficiency. Furthermore, the method (i.e. inverse efficiency versus length) also calculates the internal optical loss for an “average” laser diode. This value can be used to verify the values obtained on the individual laser by means of the below bandgap method of Ketelsen.

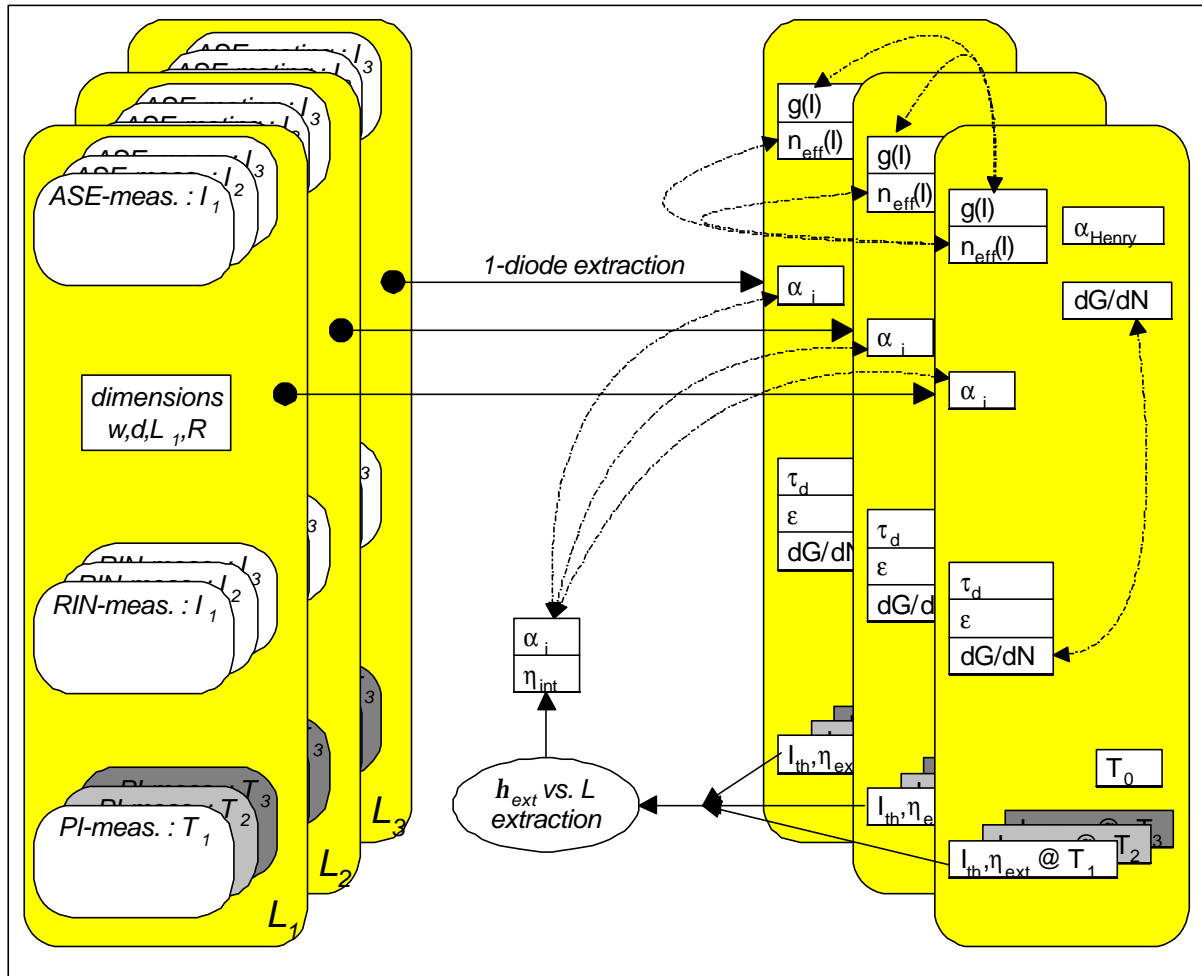


Figure 5-18: combined characterisation of Fabry-Perot laser diodes of varying lengths.

The values obtained for each individual laser diode can be compared to determine if the set laser diodes is sufficiently uniform. Especially the values for the optical gain and the index of refraction should match if the material is uniform. However, the comparison needs to be done carefully: the values vary with the carrier density. This carrier density varies not only with the injected current but also with the volume of the active region (the lengths of the diodes are not equal).

If this comparison indicates that the material properties of the available laser diodes are sufficiently uniform, the parameter extraction procedure can be continued. The differential carrier lifetime (t_d) and the threshold current can be used to determine the recombination parameters and the carrier density at threshold. For each laser diode the expressions (5.29) and (5.30) can be written.

$$\frac{1}{t_d} = A + 2BN_{th} + 3CN_{th}^2 \tag{5.29}$$

$$\frac{h_i I_{th}}{qwdL} = AN_{th} + BN_{th}^2 + CN_{th}^3 \tag{5.30}$$

Under the assumption that the optical gain of the material is linearly depending on the carriers, it is possible to express the carrier density at threshold as a linear function of the inverse length (expression (5.31)).

$$N_{th} = c_0 + c_1 \frac{1}{L} \quad (5.31)$$

The expressions (5.29) till (5.31) can be written for each available length. So if three lengths are available, this will result in a solvable set of six equations with six unknowns (A , B , C , c_0 , c_1 and h_i); the threshold current and the dimensions of the laser diode are known.

5.4.2.4 Extraction procedure based on a number of DFB laser diodes

The parameter extraction procedure for a set of DFB laser diodes is similar to the procedure for a set of Fabry-Perot laser diodes. The DFB procedure is given in Figure 5-16.

If the DFB laser diode has been realised with an AR coating, it is impossible to apply the below bandgap method. Thus it is impossible to determine the internal loss and the optical gain of the material.

However if the DFB laser diode has no coatings, the method of Hakki-Paoli can be applied to the amplified spontaneous emission spectrum to determine the modal optical gain. Since this is a Fabry-Perot laser diode method, the results will only be valid for wavelengths sufficiently far from the Bragg wavelength. In other words for the wavelength ranges where the diffraction grating does not influence the spectrum. The results can be fitted to a gain model to determine the optical gain values at the Bragg wavelength. This information will simplify the parameter extraction by fitting the amplified spontaneous emission spectrum.

The combination of information obtained for the individual DFB laser diodes with varying length can also be used to extract further information. Since the method of the inverse efficiency versus the length is valid for laser diodes of the Fabry-Perot type it cannot be applied to DFB laser diodes. However, the extraction proposed for the recombination parameters is valid and can be applied if the material of the laser diodes is sufficiently uniform.

The combination of results obtained for DFB laser diodes with identical lengths but with varying facet coatings can also be used. The values for the optical gain of the material determined for a non-coated DFB laser diode can be used as the (start) values for further extraction in the case of DFB laser diodes which have a facet coating. Of course, this is only possible if the material properties are sufficiently uniform.

5.4.2.5 Extraction procedure based on a number of Fabry-Perot and DFB laser diodes

If both Fabry-Perot and DFB laser diodes are available with an identical structure the information extracted can be combined. An advantage of this method is that the Fabry-Perot based extraction allows to determine the internal optical loss. This value can then be used for the parameter extraction in the case of DFB laser diodes. Thus making it possible to determine the optical gain of the material.

5.5 Conclusion

This chapter has treated the parameter extraction based on simple measurements with a large information content and a complex extraction procedure. The extraction based on the amplified spontaneous emission spectrum and the extraction based on the relative intensity noise have been discussed in detail.

In the case of the amplified spontaneous emission spectrum, the procedure used and the problems it involves have been illustrated with two numerical models for the amplified spontaneous emission spectrum of a DFB and a Fabry-Perot laser diode. Each time it has been explained how the problems encountered, have been solved during the course of this thesis.

The description of the parameter extraction procedure based on the relative intensity noise starts from the relationships between the different parameters and the measurement results. Within the scope of this thesis, the different steps needed for the parameter extraction have been structured, thus enabling the development of automated software applications.

In the last part of this chapter, it has been explained how the results obtained for a single laser diode and for a set of laser diodes can be combined to realise a more reliable parameter set. The procedures have been discussed by means of schematic overview figures indicating how the information can be combined and which verifications are possible

-
- [5.1] H. Soda, H. Imai, "Analysis of the spectrum behaviour below the threshold in DFB lasers", *JQE*, 22-5, 1986, pp. 637-641
 - [5.2] T. Makino, J. Glinski, "Transfert Matrix analysis of the amplified spontaneous emission of DFB semiconductor laser amplifiers", *JQE*, 24-8, 1988, pp. 1507-1518
 - [5.3] R. Schatz, E. Berglind, L. Gillner, "Parameter extraction from DFB lasers by means of a simple expression for the spontaneous emissions spectrum", *Phot. techn. Lett.*, 6, 1994, pp. 1182-1184
 - [5.4] J.P. Weber, S. Wang, "New method for the calculation of the emission spectrum of DFB and DBR lasers", *JQE*, 27, 1991, pp. 2256-2266
 - [5.5] G. Morthier, K. Sato, R. Baets, T. Sudoh, Y. Nakano, K. Tada, "Parameter extraction from sub threshold spectra in cleaved gain and index coupled DFB LDs", *OFC95*, 1995, pp. 309
 - [5.6] T. Makino, J. Glinski, "Transfert Matrix analysis of the amplified spontaneous emission of DFB semiconductor laser amplifiers", *JQE*, 24-8, 1988, pp. 1507-1518
 - [5.7] J. Guggenmos, "Minimisation of laser diode relative intensity noise (RIN)", *SPIE*, vol. 1044, pp.260-269, 1989
 - [5.8] L.A. Coldren, S.W. Corzine, "Diode Lasers and Photonic integrated circuits", Ch. 5, section 5, John Wiley & sons, inc, 1995
 - [5.9] R.S. Tucker, "High speed modulation of semiconductor lasers", *JLT*, 3-6, 1985, pp. 1180-1985
 - [5.10] C. H. Henry, "Theory of the linewidth of semiconductor lasers", *JQE*, 18-2, 1982, pp. 259-264
 - [5.11] R. Olshansky, P. Hill, V. Lanzisera and W. Powazinik, "Frequency response of 1.3 μm InGaAsP high speed semiconductor lasers", *JQE*, 23, 1987, pp. 1410-1418
 - [5.12] R. Nagarajan, et al, "Transport limits in High speed Quantum well lasers: experiment and theory", *Phot. techn. Lett.*, 4-2, 1992, pp. 121-123
 - [5.13] L.A. Coldren, S.W. Corzine, "Diode Lasers and Photonic integrated circuits", John Wiley & sons, inc, 1995
 - [5.14] R. Nagarajan, M. Ishikawa, J.E. Bowers, "Effects of carrier transport on relative intensity noise and critique of K-factor predictions of modulation response", *Ell. Lett.*, 28-9, 1992, pp. 846-848

- [5.15] S. Hansmann, H. Walter, H. Hillmer, H. Burkhard, "Static and dynamic properties of InGaAsP-InP DFB lasers, a detailed comparison between experiment and theory", JQE, 30-11, 1994, pp. 2477-2484
- [5.16] G. Morthier, P. Verhoeve, R. Baets, R. Schatz, "Extraction of a large set of laser parameters from different measurements", ISLC96, 1996

CHAPTER 6

The measurement set-up

6.1 Introduction

Measurement set-ups are normally developed to perform a specific measurement task. The laser diode is moved from set-up to set-up if multiple measurements are required. When a full characterisation is envisaged, the multiple set-up approach is not practical. Each time the laser diode is moved to another set-up, the light has to be coupled into single mode optical fibre, which is a time-consuming task. If it is possible to perform the different measurements on a single set-up, a large decrease of the characterisation time needed can be realised.

This chapter will derive the mechanical requirements for such a set-up based on the measurements presented in the previous chapters. Next, it will illustrate how these requirements were translated into a mechanical concept, which made it possible to realise a multi-functional set-up. To conclude the chapter, the results of a complex measurement exercise are given. This experiment was used to evaluate the set-up.

6.2 Mechanical requirements

6.2.1 Requirements of the laser diode

The first boundary condition of the laser diode is formed by the laser diode itself, which is available in many packages. Since the measurement set-up is intended for a research environment, it is important to design the set-up such that the shape of the possible laser packages is not restricted by the set-up. The set-up has to be able to measure several commercial packages and should also be able to measure devices on a sub mount. This last requirement implicates that the current can be fed to the laser diode by means of probe needles. In short, the measurement set-up has to be able to measure “all possible packages”.

The second boundary condition of the laser diode is its wavelength. Most optical components in the set-up (e.g. lenses, polarisation cubes, optical isolators, etc.) are wavelength dependent. Hence they may cause problems or even not work when used at an incorrect wavelength. Most commercial laser diodes have a wavelength in the range 600 up to 1600 nm. Therefore this range is taken as the design requirement for the set-up.

The last boundary condition of the laser diode is a stabilised temperature. Since the behaviour of a laser diode is temperature dependent, the temperature needs to be stabilised to enable reliable and repeatable measurements at different temperatures. Hence the set-up has to be equipped with a Peltier element to enable temperature stabilisation.

6.2.2 Requirements of the measurements

The different measurements proposed in Chapter 4 can be divided in two main categories: measurements performed in the free space (by means of bulk optical components) and measurements performed by coupling light into an optical fibre (the instruments used have an optical fibre as input). The measurement set-up will have to be able to perform both types of measurements without moving the laser diode.

The measurements performed in the free space are:

1. measurement of the optical output power
1. measurement of the near field
1. measurement of the far field

The measurement based on fibre coupling are:

1. measurements with an optical spectrum analyser: optical spectrum, peak wavelength, side mode suppression ratio, etc.
1. measurements with an electrical spectrum analyser: relative intensity noise, linewidth, modulation response, distortion, etc.

The measurements based on light coupling into the component:

1. determination of the transparency point of the waveguide
1. optical modulation response below threshold

A selection mechanism will have to be provided to enable the choice between the different options. Furthermore the measurement set-up has to be designed to enable high precision positioning (sub micron) of the laser diode. This is needed to realise efficient coupling to optical fibre.

6.3 Mechanical approach for the requirements

6.3.1 General approach of the measurement set-up

To combine the different aspects of the measurement set-up an “optical bench” approach has been chosen. In this approach the laser diode is positioned with respect to an optical bench which will collimate the laser light by means of an objective. This beam of collimated light is sent to the different measurement sites by means of replaceable mirrors. Since the coupling to optical fibre is the most critical option with respect to the mechanical alignment, this will be realised in a straight line. The other measurements will be on the branches of the optical bench, as shown in Figure 6-1.

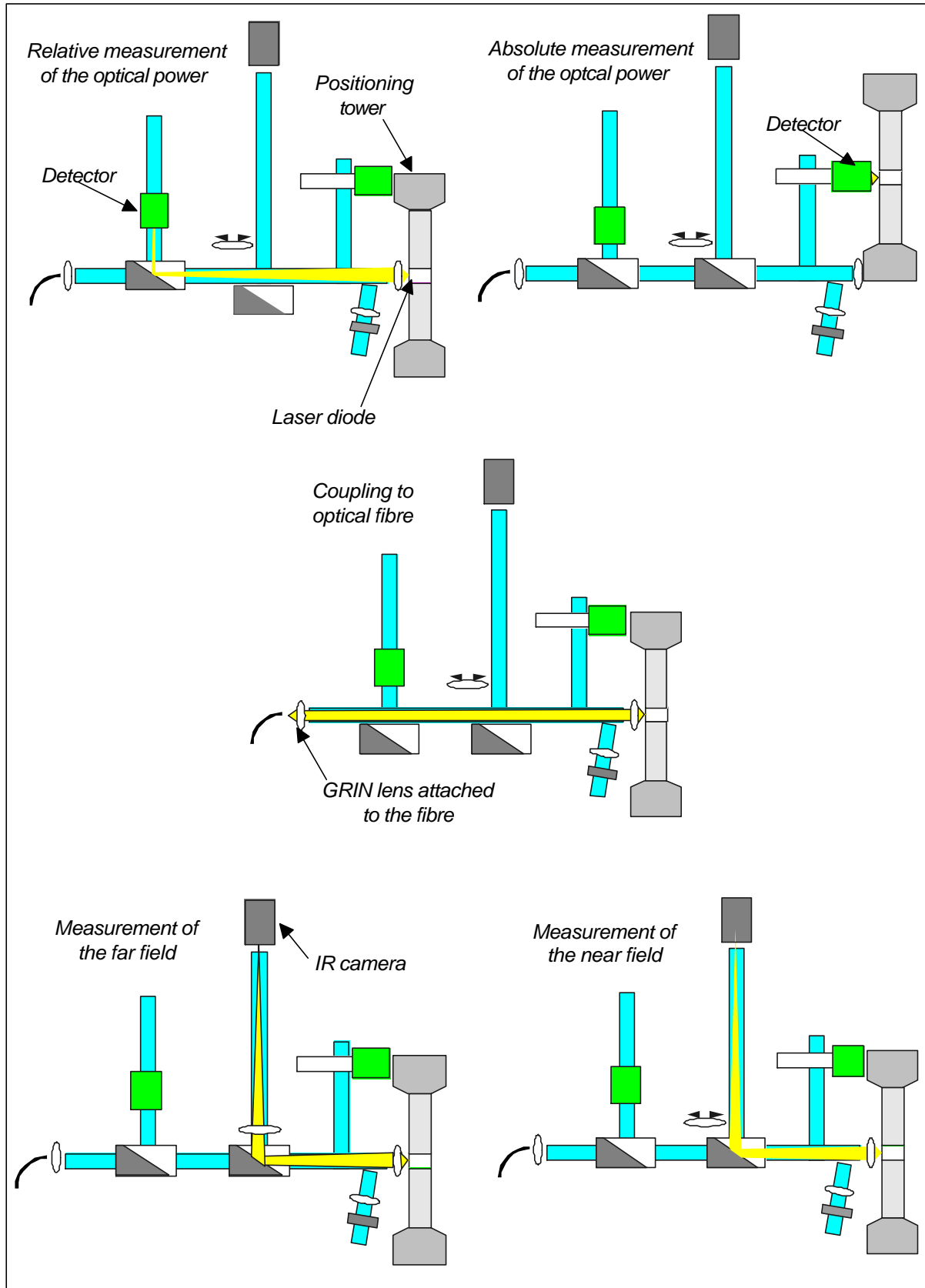


Figure 6-1: Schematic overview of the measurement set-up and the different selections (top view)

6.3.2 The positioning tower for the laser diode

The laser diode has to be positioned accurately to achieve an efficient coupling to optical fibre. The diameter of the core of a single mode optical fibre is typically $9\ \mu\text{m}$, which requires a position accuracy smaller than a micron. Furthermore, large movements are to be allowed to take care of the different dimensions of the laser packages. This combination of a high accuracy (sub micron) and a long range (centimetres) is very expensive. However both are needed for the required performance of the measurement set-up.

The less expensive solution (used in the design of the measurement set-up) is to split the problem in two parts. The long distance is realised by the positioning tower. The accurate positioning, however, is not realised by moving the laser diode, but it is realised by moving the objective at the beginning of the optical bench. This approach makes the objective deviate from the optical axis of the bench, however this is not a problem since only very small movements are involved. The objective moves over a few micron (by means of a piezo drive) in comparison to the bulk optical components (typically a few cm).

To realise “all possible” measurements it is also required to enable the possibility to couple light into the laser diode. For example this is required for measuring the transparency wavelength of laser diode. This option to couple light into the waveguide also enables the measurement set-up to be used for measuring optical amplifiers or even for measuring passive waveguides. Thus the positioning tower will have to be designed according to the principles of a waveguide set-up. The component together with the possible light coupling will be moveable with respect to the optical bench. This is realised by providing a “workbench” to carry the light coupling stage. This workbench can move freely in three directions with respect to the optical bench. The laser diode is positioned so that it can move freely in four dimensions (two translations and two rotations) with respect to the workbench.

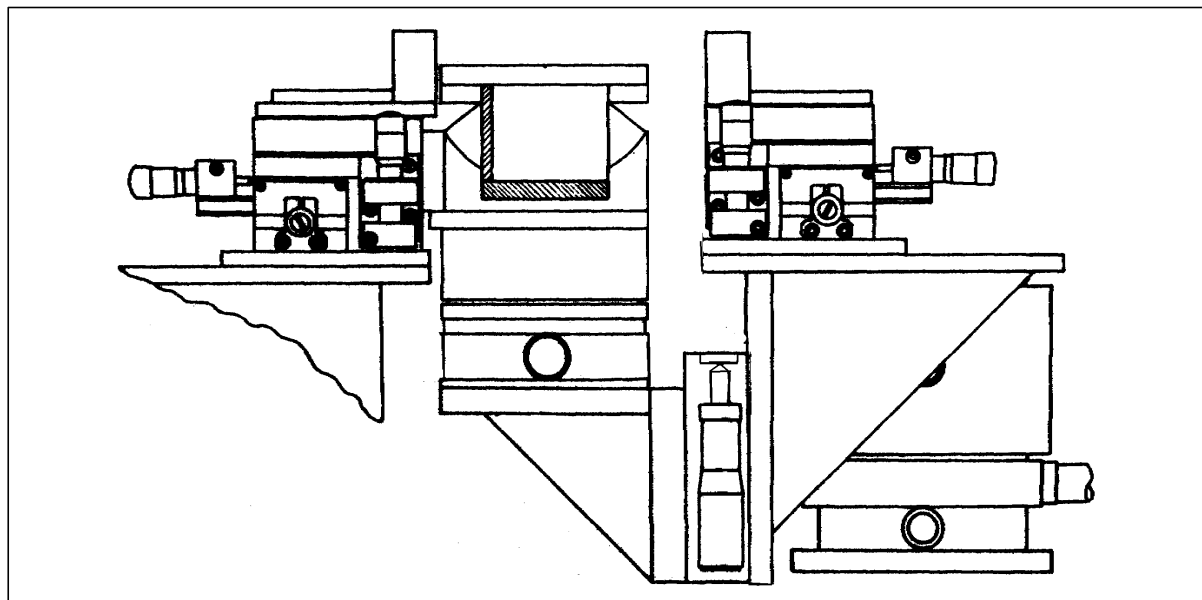


Figure 6-2: Schematic of the positioning tower (side view)

The end result of this design process is shown schematically in Figure 6-2 and Figure 6-3 shows a photo of the realised positioning tower. The laser diode has five degrees of freedom (two rotations and three translations) with respect to the optical bench. Two

translations have been realised twice to enable the laser diode to move independently from the workbench. The workbench has been fitted with a 2.5 cm pattern of holes, as customary for optical workbenches.

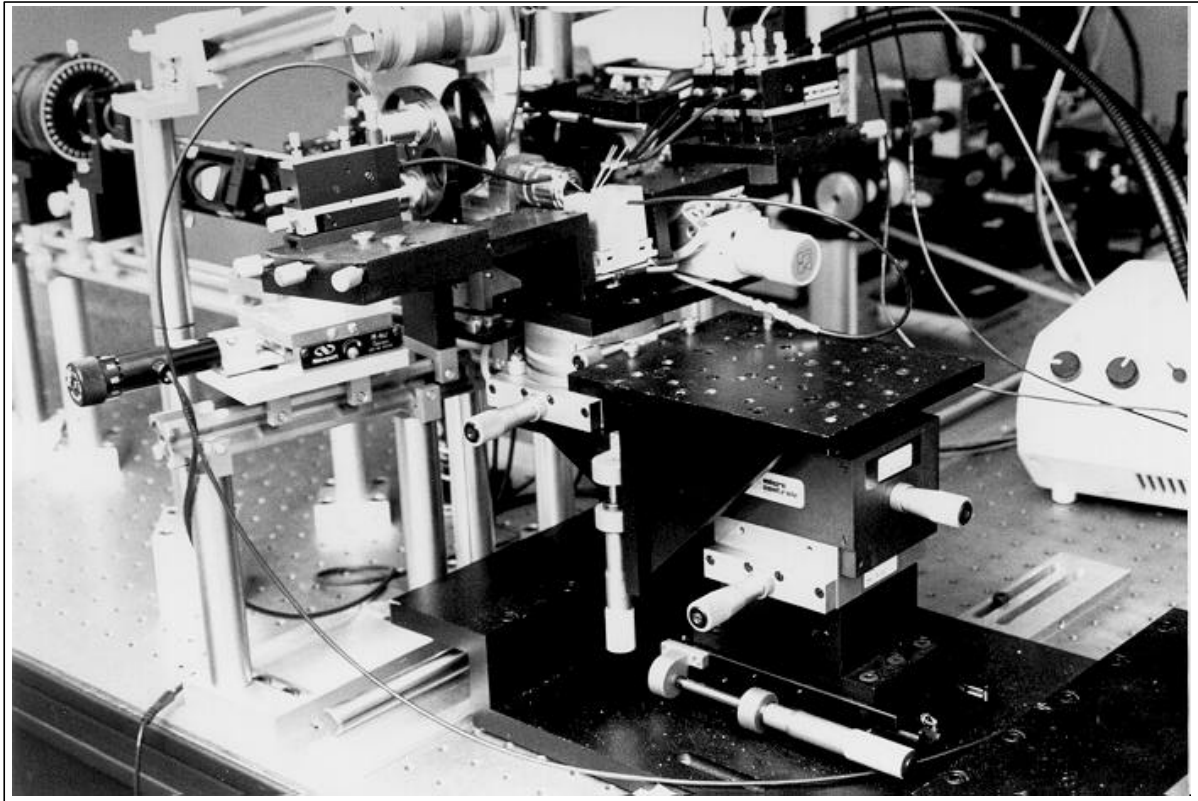


Figure 6-3: Photo of the realised positioning tower

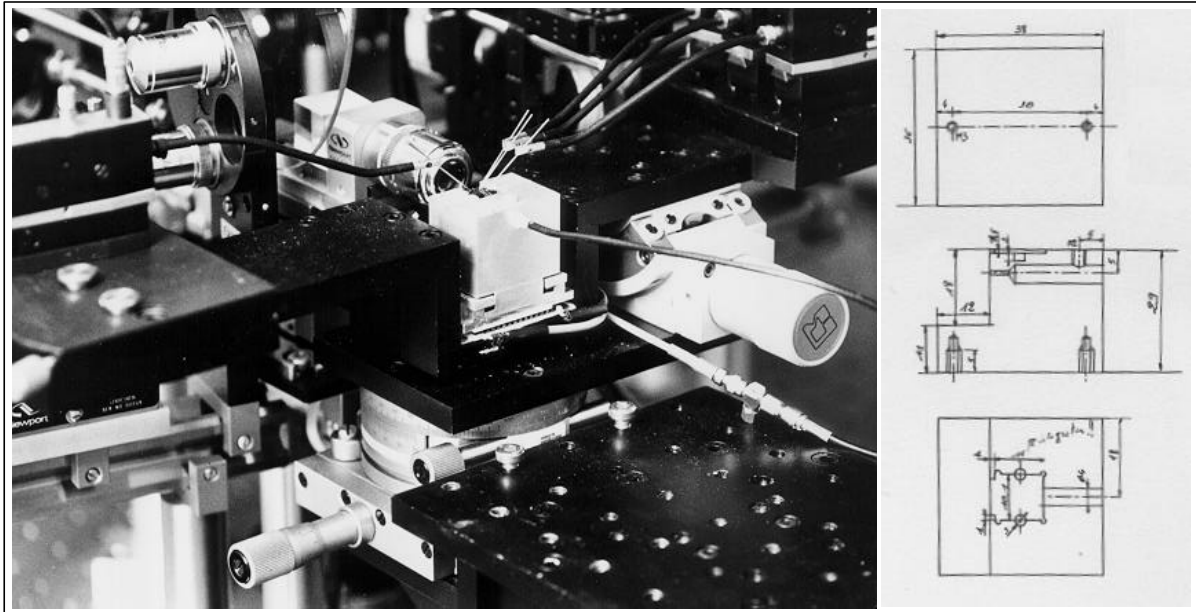


Figure 6-4: Detailed view of the positioning tower, in the middle the laser mount is visible. In this picture the silicon sub mount version is used and the laser diode is provided with current by means of the probe needles. On the right, the design specification is shown for this IMC silicon sub mount holder.

To enable the use of different laser diode packages the mount of the laser diode was designed as a module on top of the fixed Peltier element for the temperature control (cf. Figure 6-4). The dimensions of this mount, or more specifically the position of the laser diode, have been carefully chosen such that the laser diode is positioned on the intersection of the two axis of rotation. This makes it possible to rotate the laser diode without causing any parasitic translation.

6.3.3 The optical bench

The optical bench forms the core of the measurement set-up. It makes it possible to switch the beam of light between the different measurements. The selection of the part used is done by means of removable mirrors which deflect the light. As indicated in Figure 6-1, the coupling to fibre has been designed in a straight line. The less critical measurements such as optical power, near field and far field have been designed as branches of the central optical axis.

6.3.3.1 The coupling to optical fibre

To simplify the coupling to optical fibre, the set-up does not couple light directly into a fibre. The collimated light is sent to an integrated GRIN lens which couples the light into the optical fibre. This does not only simplify the power coupling of the laser light, it also makes the coupling of laser light compatible with the other measurements of the optical bench.

Furthermore an anamorph achromatic prism pair has been put into the light path. This component is used to maximise the coupling ratio since it resolves the differences between the circular optical fibre and the elliptical shape of the light emitted by the laser diode.

To ensure the maximal flexibility, empty space is provided between the different components on the optical bench. This makes it possible to add extra components to the light path. For example, in the case of a relative intensity noise or amplified spontaneous emission spectrum measurement the use of respectively an optical isolator and a polariser is required to achieve good measurement results.

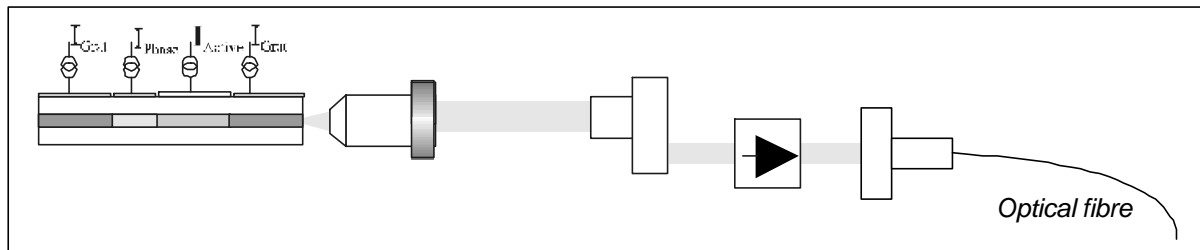


Figure 6-5: Schematic overview of the coupling to optical fibre including the use of an optical isolator

6.3.3.2 The near and the far field

To inspect the near field (i.e. the light at the facet of the laser diode), the facet has to be imaged onto a camera. If required, the image can be digitised by means of a “frame grabber” and be stored in a computer.

Hence, the optical bench has a branch directed to an infrared camera. It should be noted that this does not realise a complete characterisation of the near field, the measurement should be considered as an “inspection” of the near field. To realise a full characterisation of the near field, the phase information of the light at the facet has to be measured.

Although only the intensity of the light at the facet is measured, it is still useful to provide the near field option. It makes it possible to inspect the facet and “see” eventual facet damage. Furthermore the option increases the mechanical comfort of the measurement set-up. Since the optical bench is a rigid construction, a fixed mechanical relationship exists between the position of the light beam on the infrared camera and the position of the light beam on the optical fibre used for coupling. Hence it is possible to simplify the process of coupling light to the fibre for multiple laser diodes. Once a good coupling ratio has been realised for the first laser diode, the position of the light spot on the infrared camera can be observed. When a second laser diode needs to be coupled to optical fibre, the position on the infrared camera can be used as a first target for the alignment. If the spot of the second laser is aimed at the same position on the camera (as observed with the first laser diode) the coupling to the optical fibre is partly realised. The practical experience demonstrated that typically up to 80% of the maximum coupling efficiency could be achieved with very little effort. Aiming at a visible location on the screen is far easier than aiming at the core of an optical fibre.

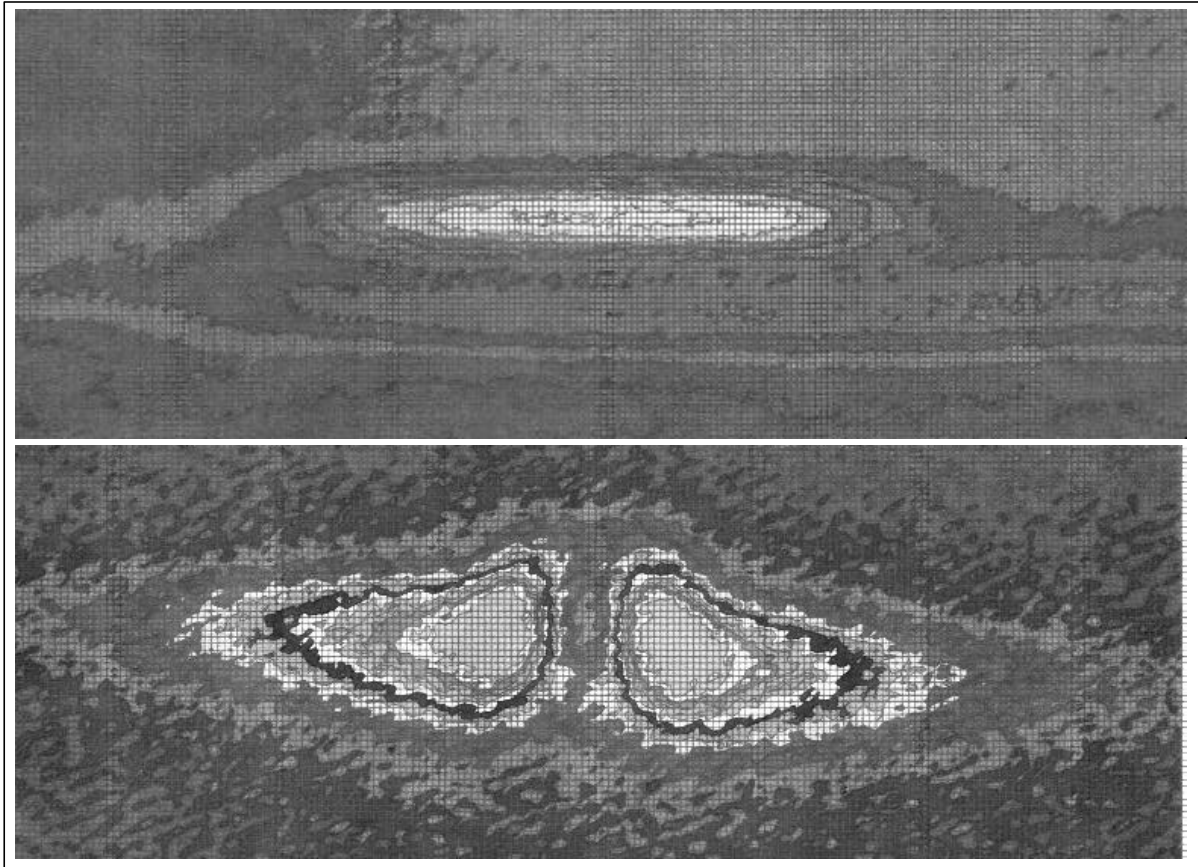


Figure 6-6: Measurements of the far field of a laser diode. At the top the image of a normal laser diode, the active waveguide is clearly visible. At the bottom the image of a damaged laser diode (COD).

Figure 6-6 shows two examples of near field measurements performed using the infrared camera. The top image shows the facet of a normal laser diode, driven at a bias current below threshold in order not to saturate the camera. The facet of the laser diode was illuminated with an external light source to make the image more clear. The bottom part of the figure shows an identical laser diode with a damaged facet. The phenomenon is called catastrophic optical damage (COD) and is due to material damage at the facet. This damage creates recombination centres which cause a large optical loss. The effect is visible on the image: light can no longer escape from the centre of the facet. Instead of one light spot, two spots are visible at the edges of the cavity. The speckle pattern that can be observed over the entire picture is due to interference caused by the presence of optical attenuators. These components were put in the light path because the emitted light of the (damaged) laser diode was still too intense for the camera.

The far field of a laser diode is traditionally measured by circling a detector round the laser diode, thus measuring the emission pattern. However, such an approach is incompatible with the concept of the optical bench. Another option is provided by the Fourier optics and has been used in the measurement set-up. The theory stipulates that the Fourier transformation of the field is found at the focus distance of the objective. So if the optical bench is equipped with a second lens such that it images that point onto the camera (cf. Figure 6-1 bottom), the measurement of the far field is realised. Since the Fourier transformation of the near field is equal to the far field.

The major advantage of this method is that the two dimensional information on the far field can be measured in one single step. The measurement process can be calibrated using a collimate beam of light instead of the laser diode. The far field of this beam is a spot which will move as the entrance angle of the beam is changed. This makes it possible to measure the movement in pixels as a function of the angular movement of the light beam. The major disadvantage of the method is the rather low saturation point of the infrared camera which implies the use of attenuators. The resulting interference patterns due to multiple reflections at each surface will clutter the image and can lead to incorrect numerical measurements.

The practical experience on the measurement set-up demonstrated that the principle can be used. However the method of circling a detector round the laser diode is easier for making accurate measurements, although it does not provide two dimensional information in one single measurement step.

6.3.3.3 The optical power

In view of the set-up components needed, the measurement of the optical power is a simple task. Light has to be focused on a calibrated detector and the measurement is realised.

However it should be noted that this will result in a relative measurement since the light has to pass the objective and the mirror of the optical bench. The presence of these components will cause the loss of a certain amount of optical power. To make absolute power measurements possible, the positioning tower has been put on rails so that it is possible to move the laser diode directly in front of a detector, without passing through the optical bench (cf. Figure 6-1 top).

6.4 Some implementation details

Starting from the mechanical concepts presented in the previous section, the measurement set-up details were designed. A number of mechanical drawings were realised to evaluate the different proposals and enable a correct choice for the mechanical construction to be realised. The different parts for the chosen structure were fabricated at the department based on the mechanical drawings. Figure 6-7 gives an overview of the realised set-up. The standard components were bought from different manufacturers (Newport, OZ-optics, Spindler&Hoyer, SKF, etc.) and were integrated with the home made components.

The positioning tower consists of bought translation and rotation tables, fixed to each other by means of parts fabricated at the department. The optical bench was realised with the X-26 system of Newport due to its inherent high rigidity. These X-26 rails were fixed on a certain height by means of fixed supports. This in contradiction to the common practice of mounting rails on adjustable posts. Since the already large number of required degrees of freedom, it was very interesting to fix everything which was not required to move.

The removable mirrors were built from components available from Spindler&Hoyer (the “microbench 25” series). To improve the coupling to optical fibre, a GRIN lens with optical fibre combination (available from OZ-optics) was used, in combination with the anamorf achromatic prism pair available from New Focus.

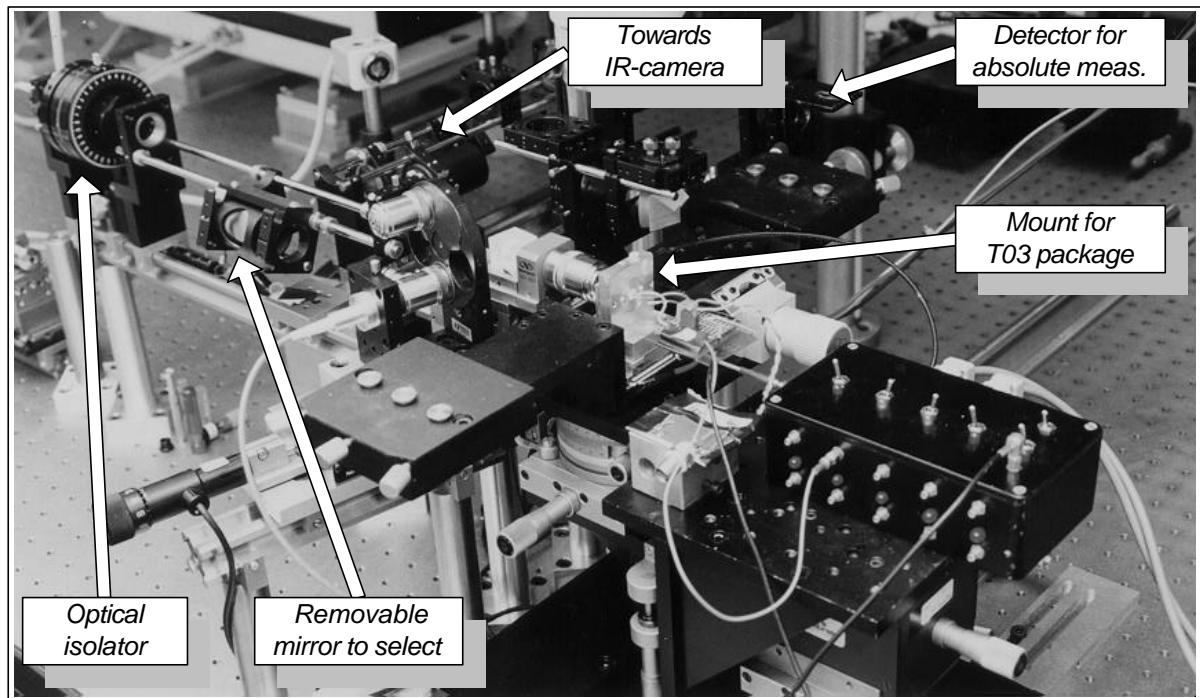


Figure 6-7: Overview of the realised measurement set-up

6.5 Evaluation of the measurement set-up

6.5.1 Introduction

The first big assignment for the measurement set-up was the characterisation of semiconductor laser diodes for optical recording systems. The laser diodes (Fabry-Perot type, InAlGaP semiconductor material) presented in this section have been developed by Philips Opto-electronic Centre in the frame of a European project called HIRED. As shown in Figure 6-8, these laser diodes have an emission wavelength of 670 up to 680 nm. This corresponds with visible red light, hence their name: red laser diodes.

The choice of the red wavelength is interesting for optical recording since the wavelength of the light used has a direct impact on the data density. The smaller the wavelength, the smaller a single bit and the more data can be stored on the same surface.

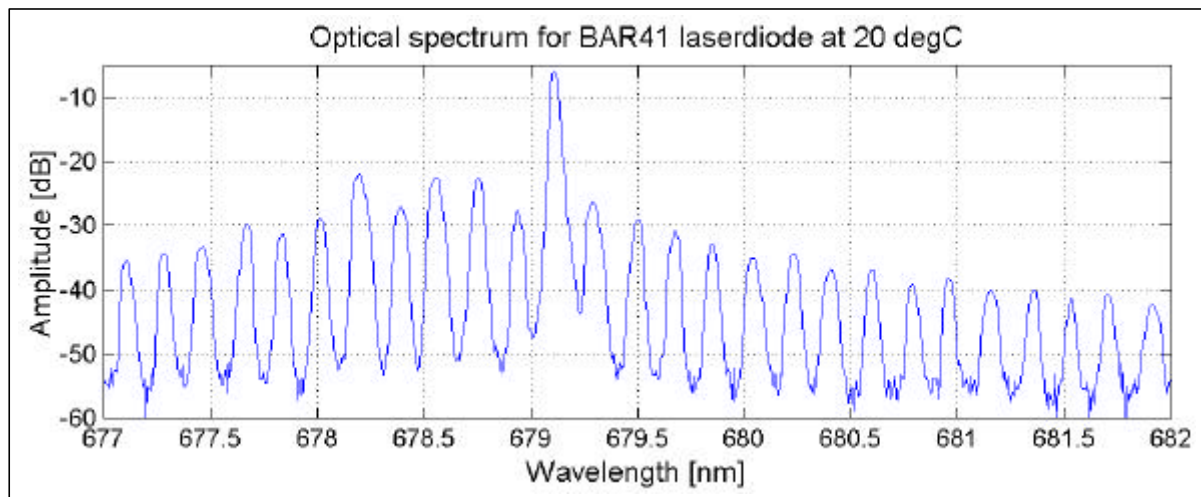


Figure 6-8: A typical spectrum of a “red laser diode” of the Fabry-Perot type.

This assignment was not only useful in the context of acquiring the wanted measurement data, it was at the same time an ideal test situation for the entire measurement set-up. It involved conventional though complex characterisation, applied to non-common components (in terms of telecommunications). Furthermore, it was required to measure the sensitivity of the laser diodes with respect to external optical feedback. This was not possible with the originally designed measurement set-up, so it had to be extended.

This characterisation evaluated the following features of the set-up: stability (temperature, time), flexibility (new components in the light path), wavelength range (visible red instead of classical infrared) and the structural extendibility of the measurement set-up.

6.5.2 The stability and the temperature dependency

The term stability of a measurement set-up can be interpreted in several ways. In the context of this text it is split in two categories: the pure mechanical stability and the thermal stability.

The evaluation of the mechanical stability can be achieved by measuring the power of the light coupled into optical fibre during a longer period of time. This measurement demonstrated that, once the measurement set-up had settled, the coupling ratio does not change. Thus making long duration measurements possible. For example, measurements have been performed which took two weeks in total. In order to determine the reflection sensitivity of the laser diode, the relative intensity noise was measured as a function of the strength and the phase of the reflected light, while changing the bias current of the laser diode. During the entire measurement no change of the coupling efficiency was observed.

The initial settling time of the measurement set-up is a normal phenomenon for mechanical set-ups. Due to mechanical stress caused by the construction (e.g. fixation of screws), a typical relaxation time of 24 hours is needed for the set-up to allow all stress to settle.

The evaluation of the thermal stability of the measurement set-up can be realised in the same way, but this time the temperature is varied. This variation can be done in two ways: the environment temperature can be changed or the stabilised temperature for the laser diode can be changed.

The optical bench and the positioning tower on which the laser diode is mounted form a complicated construction, so it is impossible to guarantee that the realised alignment is temperature independent. The materials used for the construction (aluminium and steel) have been selected based on their mechanical properties rather than on their temperature related properties. Hence both the optical bench and the positioning tower will expand when the temperature increases. This thermal expansion is in absolute terms very small but compared to the dimensions of the active region of the laser diode and the core of the optical fibre they cannot be neglected. Furthermore the construction of the measurement set-up will cause an amplification of the effects. This results in a non-neglectable decrease of the coupling efficiency due to temperature variations.

If the environment temperature changes, both the optical bench and the positioning tower will expand in a different way (due to the different constructions) and the alignment of the laser with respect to the optical fibre will be lost. However this is not a problem in practice since the environment temperature in the measurement room is stabilised.

A change in the temperature of the laser mount is a bigger problem, which cannot be avoided. However experience showed that it is less big than expected. Most measurements which are performed as a function of temperature are discontinuous measurements. A certain temperature is set and once it is stable, the alignment is adjusted and the measurement performed. This procedure implies that it is not possible to realise measurements as a function of the temperature in a fully automated way. Human intervention to adjust the alignment is required each time the temperature changes.

In the case that a measurement has to be realised under conditions of varying temperature, the alignment needs to be manually adjusted during the measurement. To test this possibility the optical spectrum of a laser diode was measured continuously with a fixed time interval between the measurements. Once the measurement procedure was started, the temperature of the laser mount was changed and the alignment was adjusted manually. Since the variation of the temperature is a slow phenomenon, it was possible to compensate the expansion of the measurement set-up. The resulting variation of the coupling efficiency remained reasonably constant, thus making the measurement possible. Figure 6-9 shows the result of the measurement. It is clearly visible how the modes of the spectrum change due to the changing temperature. The horizontal black lines are due to a temporary bad compensation, the spectrum measured has a lower average power.

Together with the modes, the lasing wavelength (the mode with the maximal amount of power, the white colour) is also changing due to the temperature change. For this laser diode the lasing mode shows an unusual behaviour: it jumps two modes forward (to higher wavelength with increasing temperature) and then jumps one mode back (if the temperature increases some more). This contrary to the usual pattern of jumping one mode at a time. The phenomenon has been observed in all laser diodes of this type. It indicates that a number of processes have to compete in the laser diode instead of the traditional process. However no fully satisfying explanation was found.

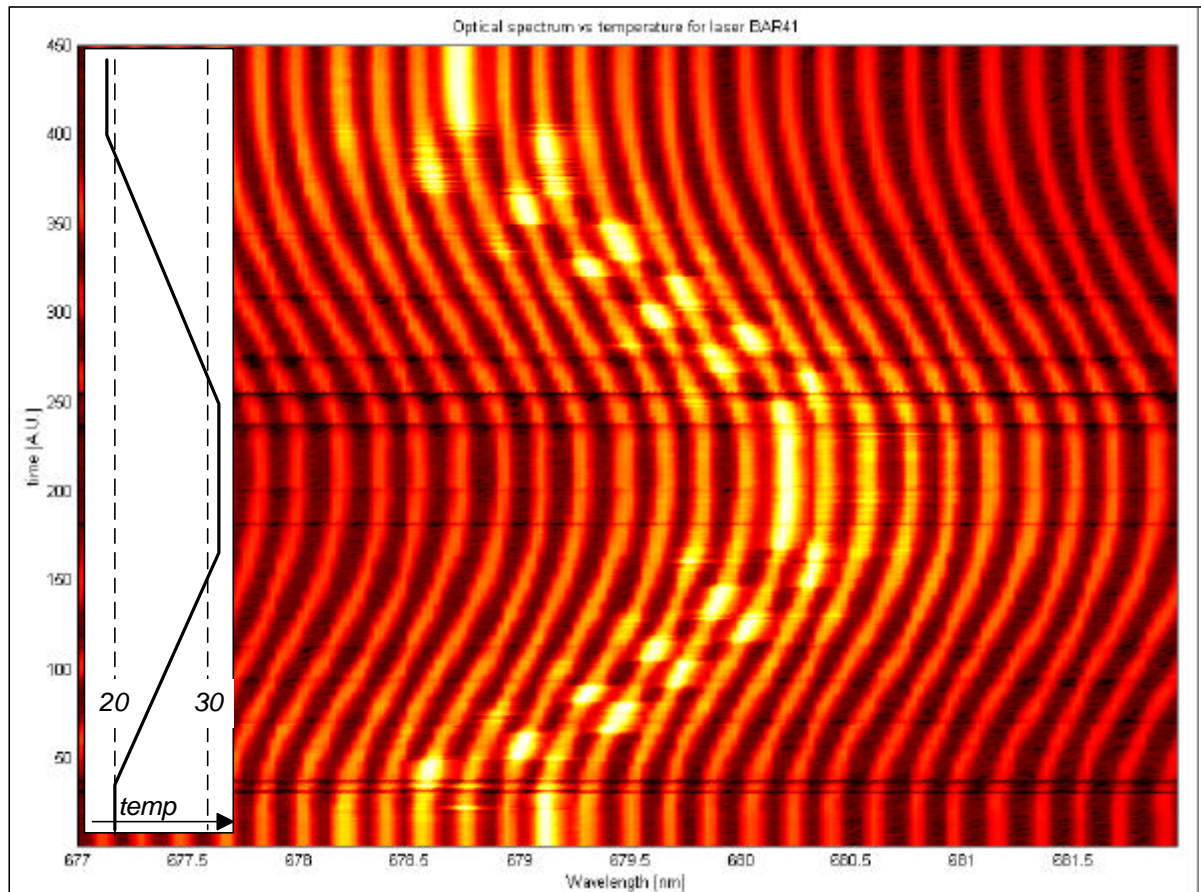


Figure 6-9: Optical spectrum of a Fabry-Perot laser diode as a function of the temperature. The vertical axis represents the time (in arbitrary units) during which the temperature was changed from 20 degrees Celsius up to 31.5 degrees and back to 19.5 degrees Celsius, as indicated by the scale in the white rectangle.

6.5.3 Reflection sensitivity

As mentioned previously, measurements of reflection sensitivity have been performed during the course of this work. They were performed on semiconductor laser diodes (Fabry-Perot type, InAlGaP semiconductor material), which have a light emission at 675 nm. Prior to discussing the measurement aspects and the results obtained, the relevance of these kinds of measurements is explained.

6.5.3.1 Why measure reflection sensitivity

The reflection sensitivity of a laser diode is an important factor for optical recording systems. The overall cost of the system is a major issue since optical recording is a volume market. Hence each reduction in the cost of the system can have a major impact on the commercial success of the system. So it is very important to check if a laser diode can be used without an optical isolator. The isolator is an expensive optical component which costs far more than an entire system for optical recording (e.g. CD player, CD writer).

6.5.3.2 The concept of the measurement set-up

To measure the reflection sensitivity of a laser diode a portion of the emitted light has to be fed back into the laser diode and at the same time a property (e.g. the relative intensity noise) of the laser diode has to be measured. In other words, it is necessary to realise an efficient coupling to optical fibre while at the same time causing a reflection and coupling the reflected light back into the laser diode.

Each time a reflection sensitivity measurement set-up is built, two possible concepts can be used: a fibre based set-up or a free space set-up (based on bulk optical components).

The first option (the fibre components, cf. Figure 6-10) has as main advantage that the set-up is very easy to realise. Once the light is coupled into a single mode fibre, all optical fibre components are connected by means of fibre connectors. Furthermore this approach is calibrated implicitly, since a single mode relationship exists between the reflection and the laser diode. The laser light emitted is coupled from one single mode waveguide (i.e. the laser diode) into another single mode waveguide (i.e. the fibre) with a certain efficiency. This coupling ratio is reversible in the single mode case. The coupling loss from a laser diode to optical fibre can be measured, hence the coupling loss of the reflection is known. The main disadvantage of this method is the large distance at which the reflection is generated. Furthermore all components (e.g. splitters, attenuators, mirrors, etc.) have to be available in single mode version at the appropriate wavelength.

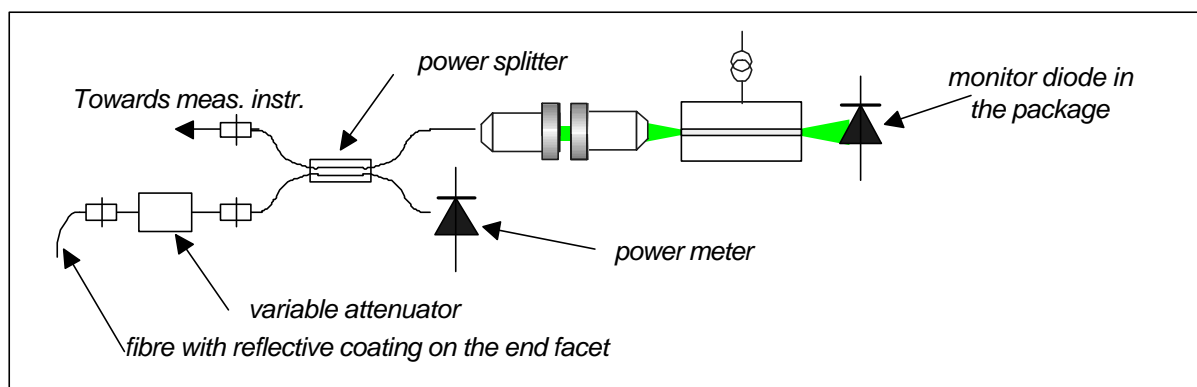


Figure 6-10: Schematic of the measurement set-up for reflection sensitivity based on fibre components.

Since fibre components were not available at the wavelength of 675 nm and since the measured situation had to resemble the actual situation (i.e. a cavity of a few cm), the free space option was selected. Even though this implicates that accurate calibration is impossible. It is only possible to estimate the amount of power being coupled into the laser diode.

6.5.3.3 The implementation of the measurement set-up

To implement a reflection sensitivity measurement set-up with bulk optical components, the reflection has to be generated prior to the coupling of the light into optical fibre. This coupling has to be done with single mode fibre since the measurement instruments accept this kind of fibre as input.

The measurement set-up developed has been extended with an extra branch by means of a beam splitter cube placed on the optical bench. This was done as closely as possible to the objective, in order to minimise the distance between the mirror and the laser diode (only 10 cm

was needed). Figure 6-11 shows a schematic of this branch. It has been placed under a non-straight angle to reduce the influence of the parasitic reflections at the edges of the beam splitter cube.

To make the angular positioning of the mirror less critical, the light is focused onto a mirror. Hence the angle of the incident beam of laser light with respect to the mirror is no longer important. The coupling of the reflected light into the laser diode was checked by modulating the distance of the reflection. The mirror was moved by means of the piezo drive and once a good coupling to the laser diode was realised, the modulation could be observed in the emitted light power of the laser diode. As an estimate for the reflected light, the residual light coming from the beam splitter cube was measured.

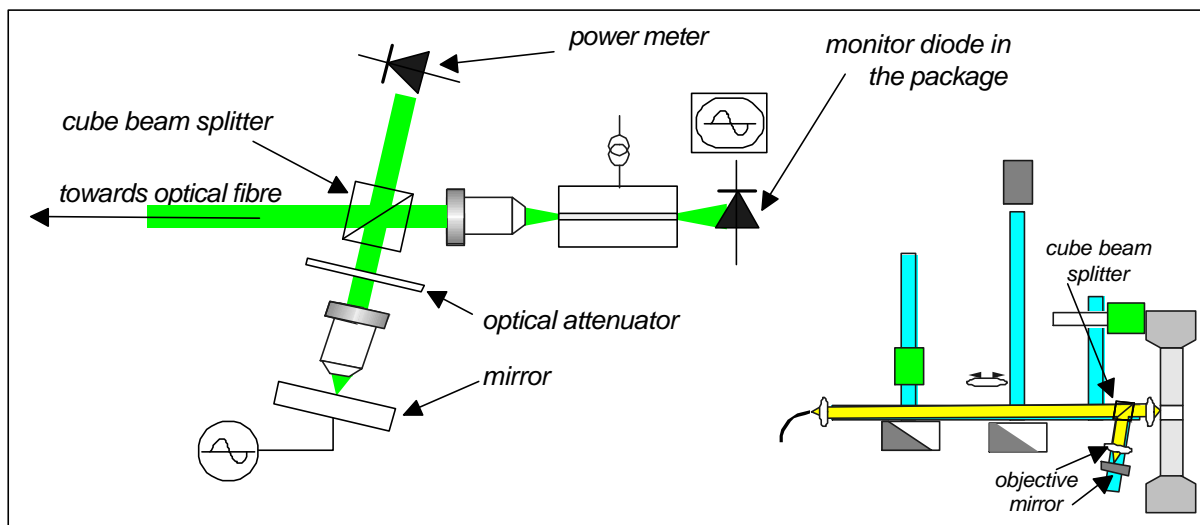


Figure 6-11: The schematic overview (top view) of the implemented measurement set-up for reflection sensitivity. In the lower right corner the location of this extra branch with respect to the entire measurement set-up is shown.

6.5.3.4 The measurements

Software has been developed to realise the measurements. The automation was required since the measurement had to be done as a function of the reflection strength, the reflection phase and the bias current of the laser diode. The laser parameter measured was the relative intensity noise, measured as a function of the frequency.

The measurement software developed, enabled long duration measurements and realised an automatic reduction of the data measured. The reduction was required due to the large size of the original data set measured. Figure 6-12 clearly shows how the relative intensity noise spectrum measured changes as a function of the external reflection. At low reflection strengths the laser diode acts normal. When the reflection strength increases, the relative intensity noise spectrum starts to change and at high reflection strengths the laser diode stops operating as a laser. The laser is in a state of coherence collapse.

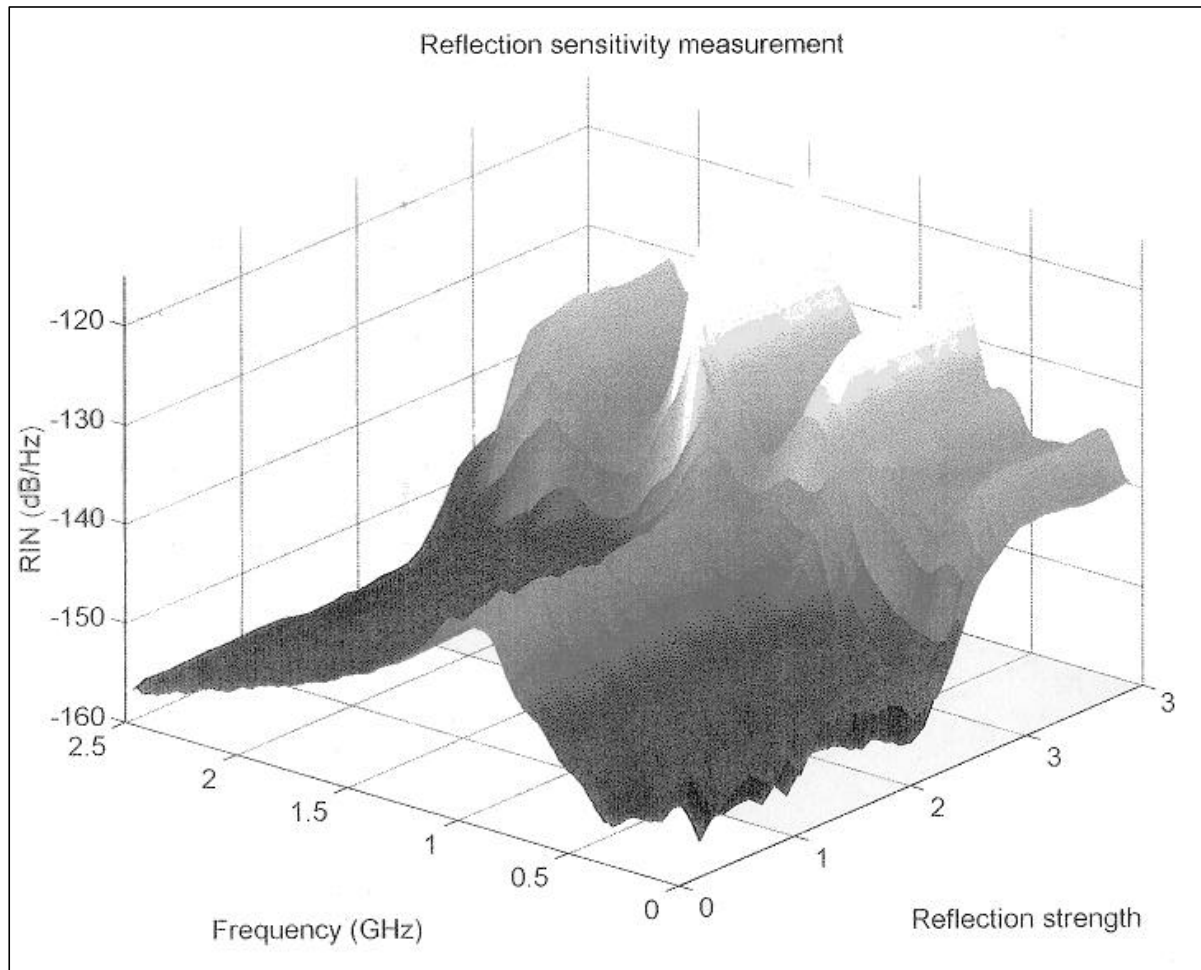


Figure 6-12: The effect of the increasing reflection strength on the relative intensity noise spectrum of a Fabry-Perot laser diode.

Figure 6-13 shows how the low frequency relative intensity noise changes due to the amplitude and phase of the reflected light. At low powers the relative intensity noise does not change due to the reflection (neither amplitude nor phase). When the reflection strength is increased (-15 up to -5 dB) the relative intensity noise increases. Furthermore the figure indicates that the phase of the reflected light is important at these reflection strengths. Once the reflection is strong enough to cause the coherence collapse, the phase of the reflected light is no longer important. The reflected light has no longer any coherent relationship with respect to the emitted light.

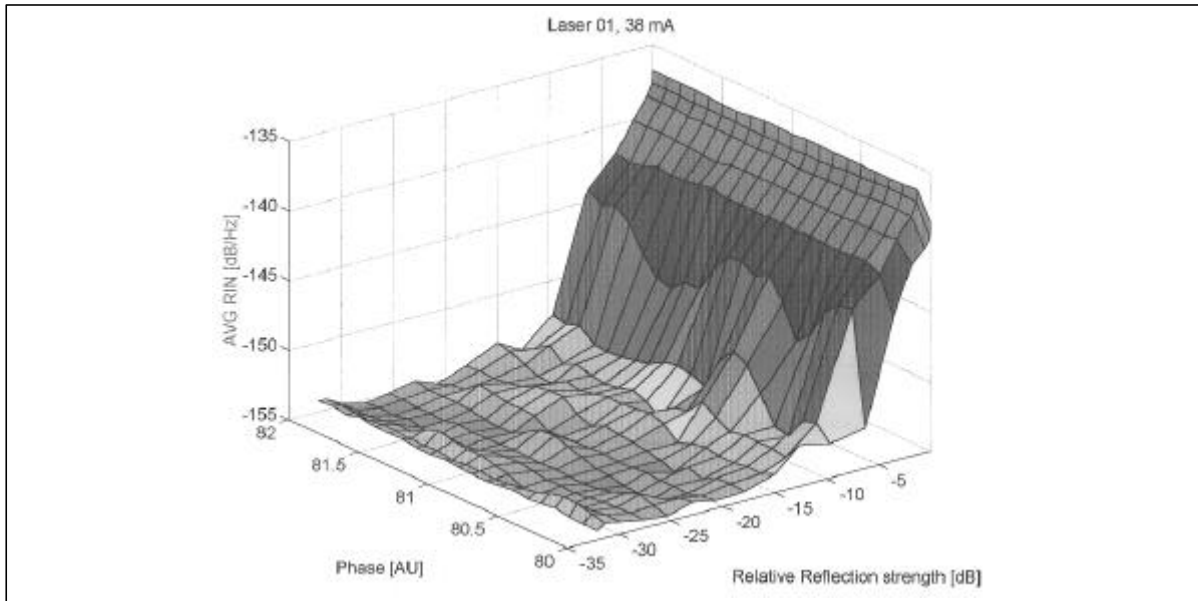


Figure 6-13: The effect of the phase and the strength of the reflected light. The low frequency relative intensity noise (150MHz) has been measured.

6.6 Further developments of the measurement set-up

The measurement set-up has been further developed after the initial development and the modifications needed for the measurements on the “red laser diodes”.

In the mean time, the possibility to measure the modulation response of laser diodes by means of a high frequency probe has been added. The number of available laser mounts is still increasing, currently a laser mount is available for the most commonly used packages, such as: Kyocera, Siemens, Alcatel, IMC-Silicon carrier. But also fully closed packages such as the T03 and the T05 packages (CD laser diode style) have already been used successfully on the measurement set-up.

The measurement set-up has been used successfully to measure alignment tolerances (laser diode to optical fibre) and has even been used to characterise passive polymer waveguides. The alignment tolerances can be measured if the objective is replaced by a fibre holder. This holder is moved with respect to the laser diode in order to measure the coupling efficiency as a function of the misalignment. The scanning is automated and done by means of the piezo drives on the measurement set-up.

The measurement of the far field of the polymer waveguides has been done in the scope of the PhD. thesis of David Israel [6.1]. The waveguides which are several centimetres long, were positioned on the laser mount and light was coupled into the waveguides. Once the measurement set-up had been calibrated with a HeNe gas laser, it was possible to make accurate measurements by means of both coherent (Nd:YLF laser) and non-coherent light sources (white lamp).

6.7 Conclusion

This chapter has explained how a measurement set-up has been realised by means of a good and detailed mechanical design. The specific solutions to the different measurement requirements have been illustrated with a brief discussion of the implementation method. The measurement set-up has been evaluated during the characterisation of laser diodes for optical recording systems and the most relevant measurement results have been shown. The evaluation has clearly demonstrated that the measurement set-up realises the initial objectives of a multi-functional and extendible set-up.

-
- [6.1] “Studie van optische interconnectienetwerken op basis van multimode polymeergolfgeleiders”, D. Israel, Universiteit Gent, vakgroep informatietechnologie, doctoraatsthesis, 1996-1997

CHAPTER 7

Implementation of the measurement and extraction software

7.1 Introduction

This chapter will illustrate the conversion of the principles discussed in Chapter 3 into specific implementations and applications. Although it is not the intention to give a detailed overview of all issues involved, it will treat the most important aspects of the implementation methods developed and the decisions that were taken.

The first part (Section 7.2) will describe the general choices (e.g. the programming language) and their consequences for the implementation and realisation of the applications.

The second part (Section 7.3) will illustrate the developed foundations for the measurement application such as the functional instrument driver, the ODIF file interface, the practical approach to the LabVIEW-C++ coupling and the documentation methods.

The third part of the chapter (Section 7.4) will deal with the applications. These can be reduced to three fundamental cases: the standard application, the engine application and the extraction application. For each one, the main implementation issues will be given and illustrated by means of an example.

In the last section (Section 7.5), an overview is given of the applications realised.

7.2 General aspects of the implementation

7.2.1 The choice of programming languages

The analysis described in Chapter 3 has been done independently from any programming language. This results in the fact that the choice of which programming language to use is free at this stage. Instead of assuming a language, it is worth to investigate the issue more deeply. Contrary to common belief, it is not necessary to use an object oriented programming language because the original analysis was done in terms of objects. Such choice is very often given in by historical backgrounds and very often not argued. Therefore it is more correct to choose the programming language based on a number of boundary conditions. In that way the chosen programming language will not just implement the problem, it will also support and enhance the realisations.

The software that has been developed in the frame of this thesis has several aspects which have been treated extensively in the previous chapters. In short there are four main

issues: a strong interaction with measurement equipment, a need for a graphical front end, a mechanism to implement the objects from Chapter 3 independently and at the same time hide the complexity of the framework such that the end user can use the object without detailed knowledge.

The expression “object oriented” is very often treated as an equivalent to the programming language C++. This language can be used to implement the objects and has several third party software libraries available to implement graphical front ends and communicate with measurement instruments.

Next to the classic software world there is also the world of measurement and automation software, which has seen a breakthrough of the graphical programming languages. Such languages implement programs by graphically connecting icons (representation of functions) by wires. These connections define the data flow between the functions (the program) and allow the (graphical) compiler to create executable code. The two best known examples of such languages are HP-VEE (by Hewlett Packard) and LabVIEW (by National Instruments).

These languages form a good alternative for the applications in this thesis: many software libraries are available for the different measurement instruments and it is also possible to use the languages in other situations besides implementing measurements. The corresponding programming environment contains furthermore per definition a graphical editor for developing graphical user interfaces. It would be interesting to use some mechanism to associate icons (i.e. graphical functions) with the proposed objects and use them in conjunction with the graphical editor provided by the environment. In that case the user will not notice any difference between original graphical functions and objects. The main advantage of this approach (compared to the pure C++ approach) is that no effort has to be invested in writing the necessary routines for the graphical manipulation of the objects. A major disadvantage of this approach is that the current generations of these graphical languages do not contain any object support mechanisms. The combination of a graphical and a classical language will prove to be the best choice, all under the motto: “use the best tool for each task”.

HP-VEE and LabVIEW are two graphical languages originally designed for implementing measurements. Both environments contain an excellent editor for designing the graphical user interface and implement the graphical code. Furthermore they come both with an extensive library of analysis functions. A detailed comparison made at the beginning of this work showed that the instrument drivers that came with HP-VEE were slightly better but that they did not exist for the optical instrumentation. LabVIEW did not offer any drivers for optical instruments at that time (in the mean time some do exist), but it offered a better development environment for developing the drivers. LabVIEW also contains mechanisms that allow a direct coupling between the graphical elements and algorithms written in C code. As a general statement it can be said that HP-VEE is a very suited language for implementing measurement applications that use the instrument drivers developed by Hewlett Packard, while LabVIEW is more a general programming language.

The combination of LabVIEW and C++ was eventually chosen. LabVIEW is used for the instrument drivers, the graphical front end, the measurement applications and as a graphical object manipulator for the components of the parameter extraction framework. C++ is used as a general programming language to implement the objects and the complex algorithms.

7.2.2 A short introduction to LabVIEW

Before continuing with the description of the LabVIEW-C++ coupling, this section will give a short introduction to the main concepts and principle of the LabVIEW programming languages. As mentioned before, LabVIEW is a graphical programming language where the programming is realised by connecting graphical components on a diagram instead of entering textual lines of code. Figure 7-1 shows an example of a program that was implemented in LabVIEW. On the left hand side of the figure, the front panel or graphical user interface of the application is displayed (the window with the grey background). Several input and output elements are indicated. The right hand side of the figure displays the diagram, the actual source code of the application. The compiler will convert this code into executable form (without any intermediate steps using textual languages as is done by the CASE-tools).

Each element on the front panel has a corresponding terminal on the diagram. At the start of the program execution the value, entered by the user, will “appear” in the diagram and propagate through the wires (the connections) to the functions.

The functions are represented by icons, that normally contain a graphical indication of the function. Although not specified by the language, the convention is normally used that the inputs of a function are positioned on the left hand side of the icon, where the outputs are normally positioned at the right hand side. The execution order of the different functions is determined by the graphical compiler. When all inputs of a function are available, the function can be executed. This implicates that two functions which have no data flow relation can execute in parallel.

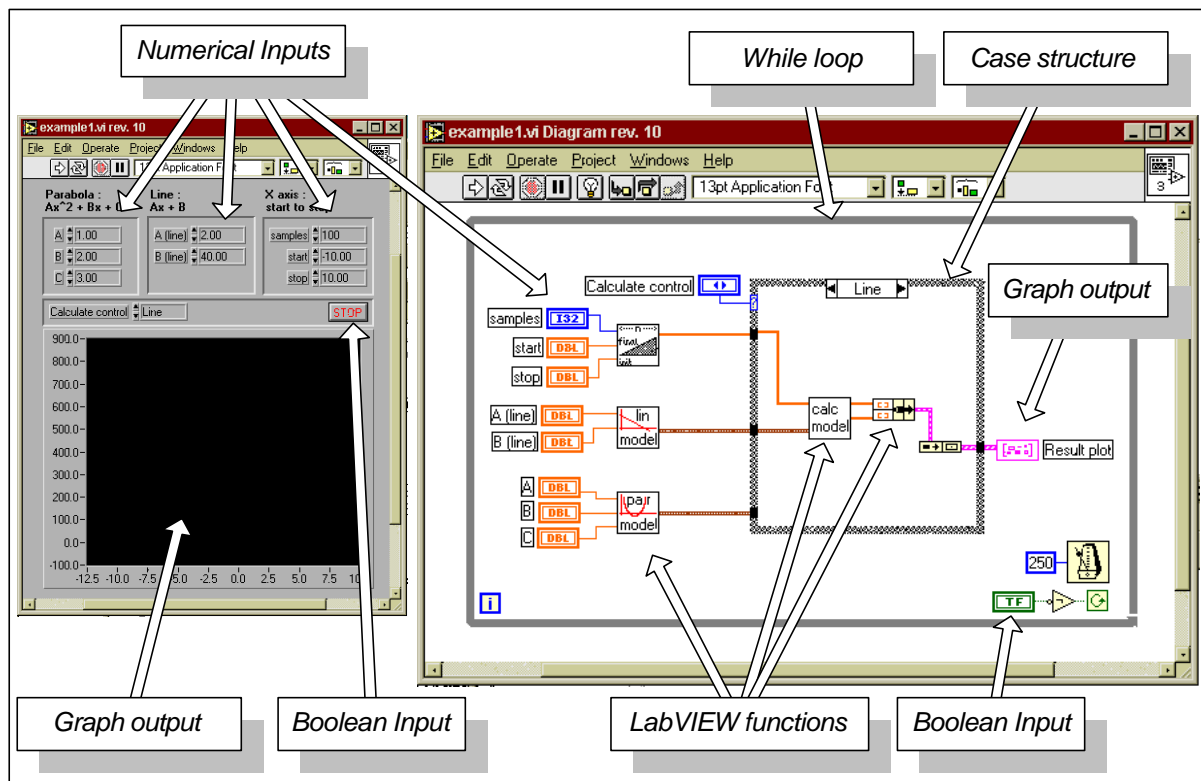


Figure 7-1: An example of a graphical implementation using LabVIEW. On the left the front panel (the graphical user interface), on the right the diagram (the implementation of the code)

It is possible to define inputs, outputs and an icon for each piece of graphical code. In other terms it is possible to create new graphical functions (called a VI or Virtual Instrument by the LabVIEW community) by means of a graphical implementation. These function can be used in other applications and can be compiled and stored on disk (i.e. source code, front panel and compiled code). It is relevant to note that the own developed functions are fully integrated in the LabVIEW environment. Furthermore it is to be noted that LabVIEW does not impose any condition on how the different functions are stored on disk. This means that except for a “logical” directory structure, there is no possibility to keep similar functions together.

7.2.3 The symbiosis of LabVIEW and C++

Although LabVIEW has a very open structure with respect to “C”, it is not trivial to combine LabVIEW with the object oriented approach as proposed in this thesis. The link between the C++ objects and LabVIEW had to be investigated from a general point of view to enable the association of the objects in a structured way. The link was divided into two aspects: the association of icons in LabVIEW with objects in C++ and secondly make sure that the transition from the LabVIEW space into the C++ space and vice versa could be done in a transparent way.

The combination of both aspects made it possible to fully integrate the objects in the graphical editor environment of LabVIEW. The programmer user (i.e. the programmer who implements the applications and uses the objects) will not notice any difference between native LabVIEW functions, graphically implemented functions or icons that hide associated objects (i.e. objects that are implemented in C++). This implies that he will be able to use the objects without experiencing any need for detailed knowledge about the underlying code or implementation details.

7.2.3.1 The association of LabVIEW icons with C++ objects

In order to develop the association between objects and icons in a structured way the behaviour of an icon in the LabVIEW environment has to be investigated in more detail. The information concerning the C-link (CIN or Code Interface Node) available in LabVIEW indicates that an icon is represented by a number of functions which are executed by the LabVIEW environment each time a specific event takes place [7.1] [7.2]. Furthermore the icon is also equipped with a memory pointer (called *DataStorage*). The CIN icons can be used in two ways: re-entrant or non-re-entrant. The first method is the most interesting in case of object association for the parameter extraction framework; it indicates that each CIN-icon receives its own memory pointer. In other terms each instance of an icon corresponds with an instance of the associated object. Non-re-entrant use means that the memory pointer is shared by all instances of the CIN-icon, which can be interesting if an object is used to realise persistence.

The correspondence between icons and objects (i.e. the possible memory and behaviour) makes it possible to describe the association of objects and icons in a general way.

```

class CIN_Icon
{
public :
    CIN_Icon() {CINload(); CINInit();}

    ~CIN_Icon() {CINDispose(); CINUnload();}

    UponSave() {CINSave();}

    UponAbort() {CINAbort();}

    UponCompile(){CINDispose(); CINInit();}

    UponRun() {CINRun();}

private :
    void * GetDSSStorage(void) {return(DataStorage);}
    void SetDSSStorage(void * p) {DataStorage = p;}

    void * DataStorage;
};

```

Figure 7-2: The behaviour of a LabVIEW icon written in C++ notation

Within the scope of this thesis the CIN information was viewed from a general object perspective. Because, like the object, an icon has a typical life cycle: it is created with a certain amount of memory, performs a number of tasks and is finally removed from the memory. So it is possible to write the behaviour of an icon using typical C++ style object functions (constructors, methods and destructors), as is shown in Figure 7-2. With respect to the framework especially the following aspects are important: the constructor, the destructor and the UponRun method. An associated object will typically be instantiated together with the icon (i.e. during the execution of the CINload and CINInit functions), the methods of the object will be called during the execution of the graphical code (the CINRun function in the UponRun method) and the associated objects will be destroyed when the icon leaves the memory by calling the destructor (i.e. the CINDispose and CINUnload function).

Not all objects that were presented in the model in Chapter 3 received a LabVIEW equivalent. The object model consists of two kinds of objects: the objects that correspond with reality (“real objects”) and objects which are created to assure the abstraction and the interaction of the “real objects”.

The term “real objects” is meant for the objects that the user will use in an active way. For example, he will have to combine specific laser models, cost terms and optimising algorithms to use the framework. The other objects (“non-real objects”) are hidden for the user, (e.g. *SpectModel* and *ExportParam*). Figure 7-3 gives an overview of the object model and indicates which objects received a LabVIEW equivalent (grey background).

To be able to use the “real objects”, the user needs a number of methods, (e.g. he will like to calculate a specified laser model). From the C++ point of view this execution of the calc method has been defined by the *SpectModel* class. To hide this detailed knowledge from the end user some icons have been created which call certain methods during the execution of their CINRun function.

The LabVIEW equivalents are connected by means of the wires with the LabVIEW graphical editor, in order to specify how the objects are combined. Since the LabVIEW environment has strong typing, these wires can be defined as a special type (e.g. *SpectModel*), which can prevent the application programmer from creating implementation errors. If he tries to connect two objects which have no relationship, the LabVIEW environment will refuse the connection because the connector types do not match. This will render the program in-executable.

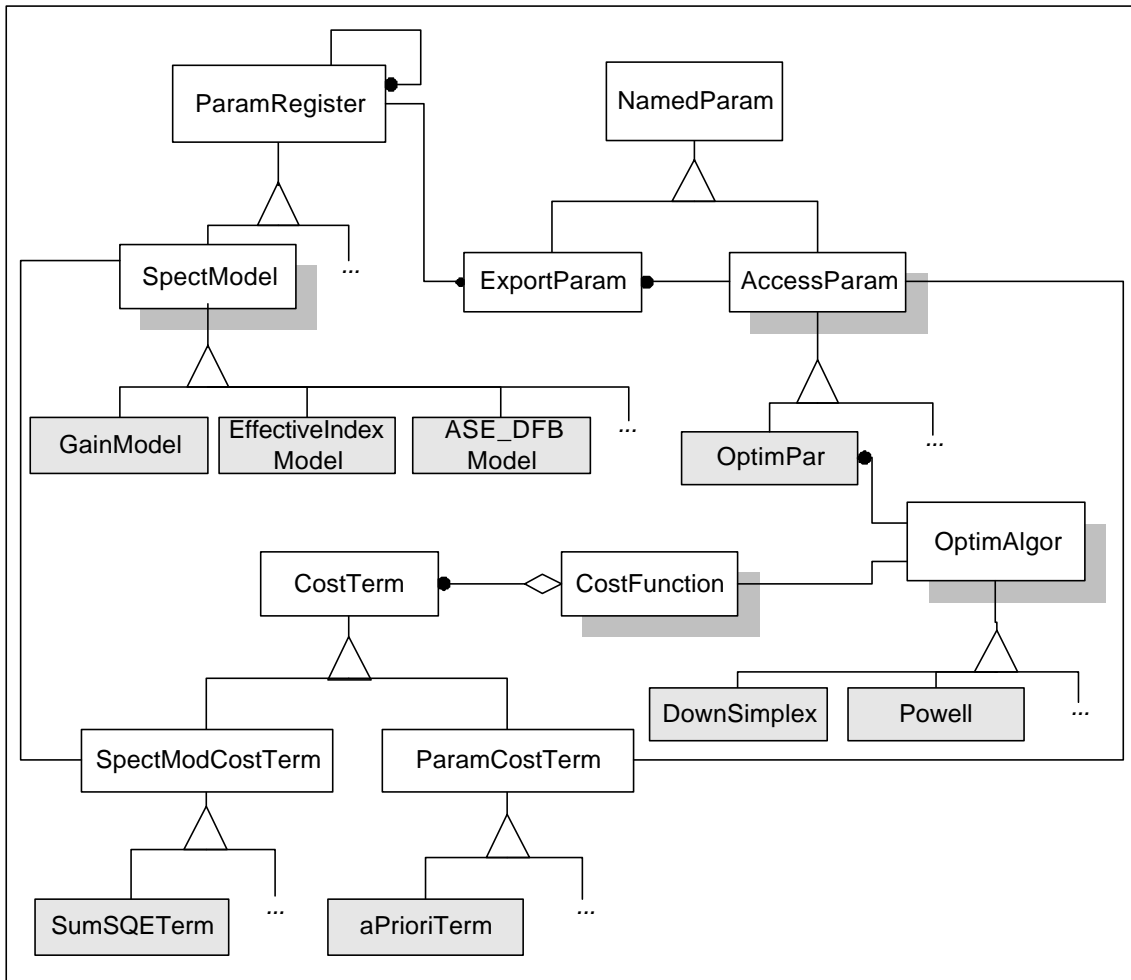


Figure 7-3: The complete object model. The object that received a LabVIEW equivalent are coloured grey, the objects of which an abstract method received a LabVIEW equivalent have a shadow.

Figure 7-4 gives an example of the end result of this association. The LabVIEW code defines a linear model, a parabolic model and an array (using a standard LabVIEW function). The array contains the points where the models have to be calculated by means of the “*calc model*” function before they are combined and presented on the XY-graph.

During the execution of the program, the user has the impression that he creates a model, which is being transported through the wire to the calc icon where it is calculated. In reality the model object is created in the C++ space and the pointer to the object is passed through the LabVIEW wire. Inside the calc icon this value is converted back to a C++ pointer and the calc method is called based on this pointer.

Figure 7-4 clearly illustrates how strongly the framework objects are integrated: without any prior knowledge it is impossible to determine with icons have been realised using the graphical LabVIEW code and which icons have been realised by means of objects or methods implemented in C++

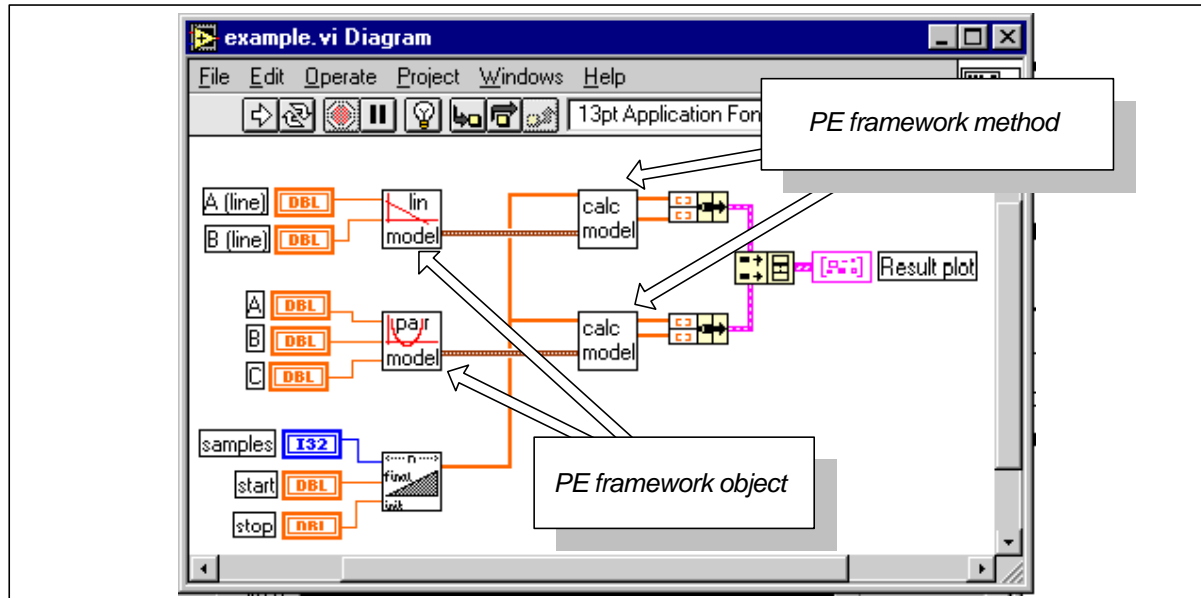


Figure 7-4: An illustration of the integration of the parameter extraction framework objects in a LabVIEW code example. The icons indicated hide framework objects, the other icons are standard LabVIEW components.

Before this method could be used in practice, another detail with respect to memory handling had to be solved. As Figure 7-2 shows, each icon contains its own memory pointer which (according to the settings of the icon) will be created once or for each instance of the icon. Neither the figure nor the available documentation of National Instruments indicate that the current implementation of LabVIEW creates the situation where each icon allocates memory from a private heap. This prevents a fluent combination of framework objects and their methods. Indeed, the consequence is that memory cannot be (de)allocated freely, which in a fact renders the combination of objects impossible. If it is tried nevertheless, the LabVIEW environment will cause an irrecoverable error and the program is stopped.

The general solution proposed in the framework of this thesis is to redefine the memory operators (“new” en “delete”) such that each icon allocates memory from a common LabVIEW heap (cf. Figure 7-5).

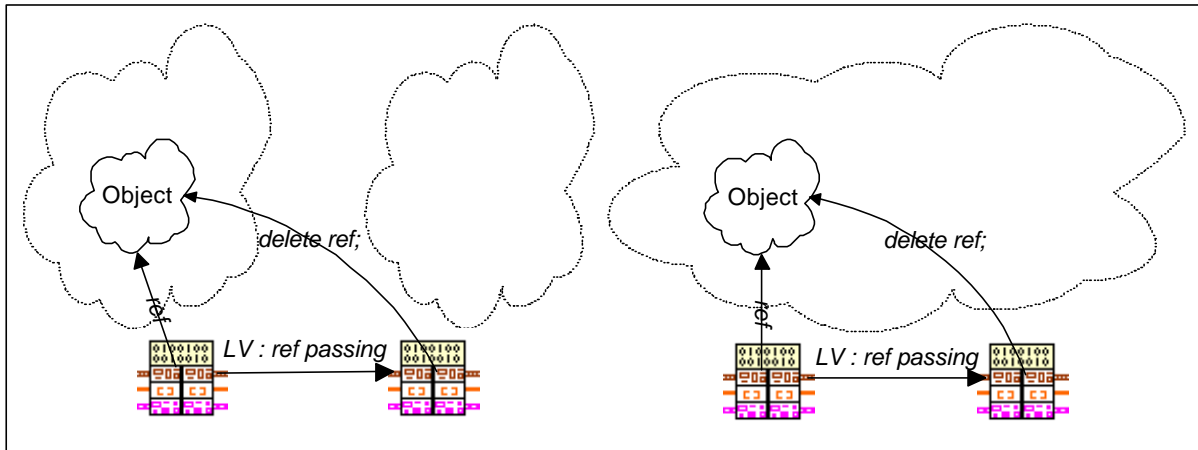


Figure 7-5: An overview of the memory handling by LabVIEW in the case of CIN icons. On the left, the standard situation in LabVIEW, freeing the memory cause an error and the LabVIEW environment stops. On the right the situation realised in this thesis.

7.2.3.2 The interaction between LabVIEW and C/C++

Due to the chosen hybrid implementation, information has to be transferred from one environment to the other (LabVIEW to C++ and vice versa). Together with the transfer issue this approach has to cope with the difference in memory allocation. The LabVIEW environment takes care of memory allocation implicitly, in the C++ environment it is up to the programmer to explicitly allocate or free memory. Furthermore it is not allowed to freely (re-)allocate memory originally allocated by LabVIEW. Very strict rules exist by which the programmer has to notify the LabVIEW environment when changing the allocated memory. Each diversion of that procedure results in an error which will abort the program.

To resolve these issues, a number of interface objects have been realised. They take care of the information transfer and the memory allocation in a transparent way [7.3]. This does not only allow easier programming of the applications, it also makes the developed software less dependent on external factors. In case of a fundamental change by the manufacturer of LabVIEW (National Instruments) only the interface object will have to be changed instead of all components and applications when no interface objects would have been used. Such changes have already occurred in the past: the memory representation of a Boolean array changed with the arrival of LabVIEW 5.0. In previous versions all Boolean elements were packed as bits to ensure minimal memory space. Version 5.0 uses an array of *unsigned characters* (U8), i.e. one byte for each element.

Figure 7-6 gives an example of such an interface object. In the upper right corner the source code of a CINRun function can be seen. The function signature indicates that a LabVIEW string is being passed by means of a *handle* (LStrHandle = LabVIEW string handle). In the execution block a LVString interface object is instantiated based on the information passed through the function interface. Next some text is being added to the contents of the string using the *left shift* operator. The lower left corner of the figure gives an impression of the coding of that operator. It shows how a number of pointer manipulations and specific LabVIEW CIN functions are used to add the text to the LabVIEW string (originally allocated by LabVIEW).

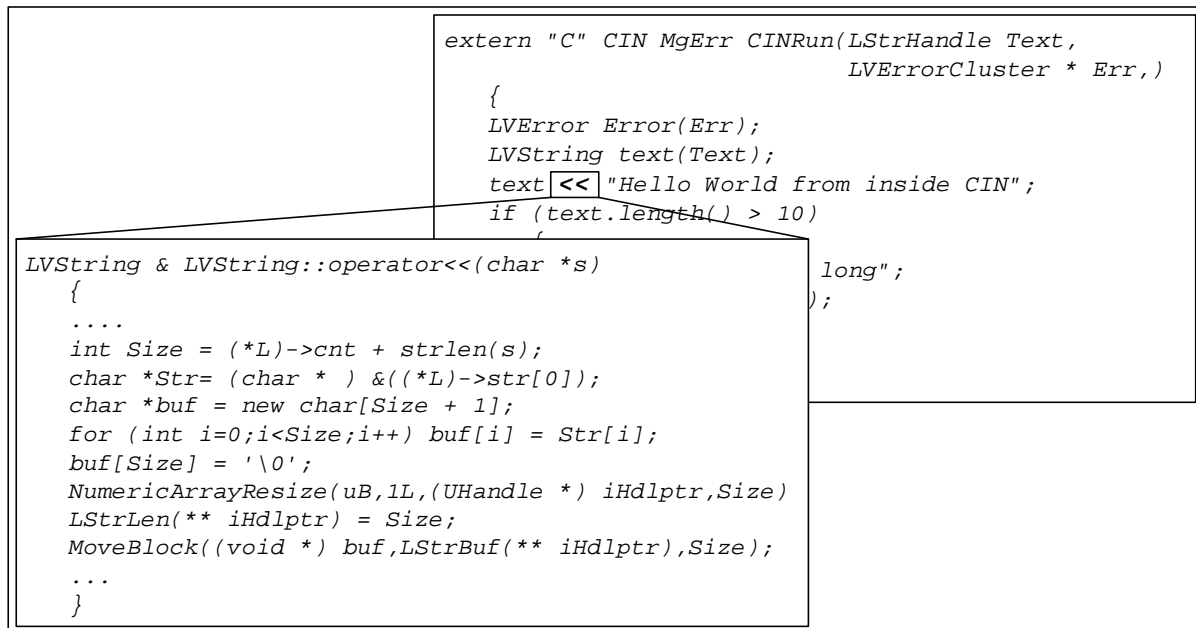


Figure 7-6: Example of the simple end result due to the use of the LabVIEW interface objects developed. The frame in the lower left corner shows the code used to implement the operator.

7.2.4 LabVIEW programming in object oriented style

The hybrid approach also required the development of a number of methods to implement LabVIEW programs according to the object oriented methods. This because the LabVIEW programming environment does not offer any support to object oriented implementations. Starting from the oversimplified viewpoint that an object can be seen as a memory structure with some interface functions some general methods have been developed and evaluated in the scope of this work [7.4.]. A LabVIEW implemented object will consist of a number of graphical functions (VIs) which logically belong together but which do not show any further connections.

Besides the object implementation, the design also needed the inheritance mechanism to implement the proposed structures. This was realised by falling back onto the basic implementation method: a function table, realised in LabVIEW by using the possibility to call function dynamically and parameterised. Instead of putting the icon representing the graphical function inside a diagram, an object reference will be used. During the execution of the code, the specific name of the function will be calculated and the appropriate function will be executed dynamically.

7.3 The fundamental components of the applications

7.3.1 The functional instrument driver

As indicated in Chapter 3, each functional instrument driver will consist of a number of basic objects, each performing a specific task. The implementation of the functional driver will have to respect the different objects and their relationships. Furthermore it is necessary

that at least the interface objects (*FIDinterface* and *Specific Instrument*) are implemented in LabVIEW. Since the main purpose of the functional instrument driver is to implement measurement applications using the graphical language LabVIEW. On the other side a full graphical implementation has large disadvantages due to the large functionality. The LabVIEW restrictions make it very impractical, although not impossible, to auto initiate memory structures at the beginning or the abortion of a program. Especially the last aspect (the abortion issue) is of importance in a development environment.

The result was that a hybrid implementation was chosen: the interface objects were implemented in LabVIEW and the specific memory objects (*InstrMemory*, *FIDinstrument* and *InstrLocation*) are implemented in C++. This choice also made it possible to use the software components available in the STL library (*Standard Template Library*), which enabled a more efficient implementation.

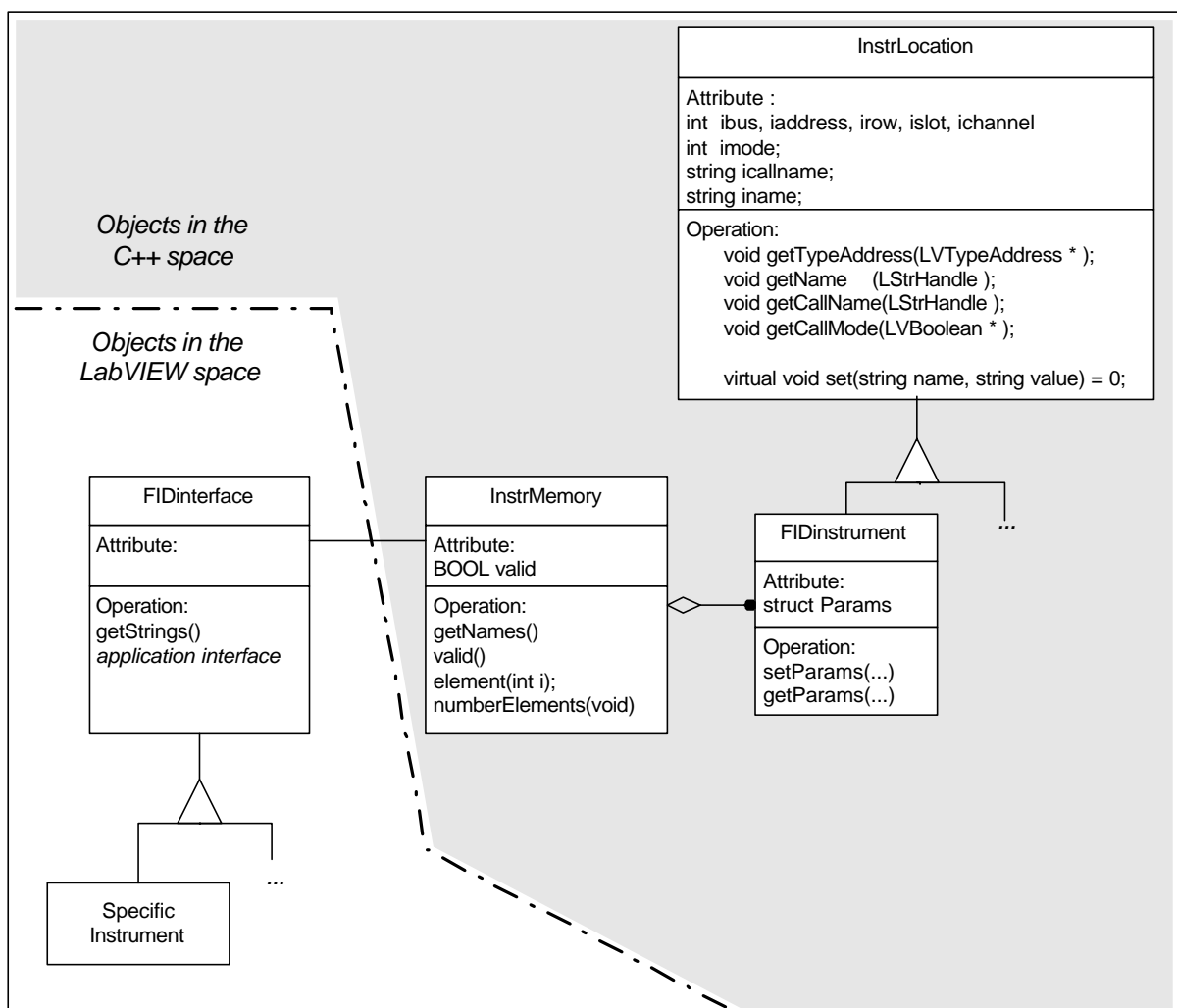


Figure 7-7: Location of the implementation and the most important methods for the objects of which the functional instrument driver consist.

Figure 7-7 gives an overview of the implemented objects and their most important methods. The inheritance relationship between the *FIDinterface* object and the *Specific Instrument* object which would be implemented by means of virtual functions in C++, was realised by dynamically calling the functions in the *Specific Instrument* object. The actual

implementation of the interface objects (*FIDinterface* and *Specific Instrument*) consists of a number of functions which logically belong together. As mentioned, LabVIEW does not support objects. Hence, organising functions in a good directory structure is the only available method to keep functions together.

To be complete, it should be noted that code re-use is large since the code used for implementing the objects *InstrMemory* and *InstrLocation*, together with the code for the LabVIEW-C++ link is identical for all functional instrument drivers. Only the interface objects (*FIDinterface* and *Specific Instrument*) are different for each type of functional instrument.

7.3.2 The ODIF file interface

Chapter 3 proposed an hierarchical information structure to store data and to allow communication between the different applications. So the implementation of a good interface to create a simple access to the information in the files is required.

To support the flexibility of the data format, the development of the interface software was done using the necessary abstraction: the base elements of ODIF (*EntryLine*, *Table*, *SettingBlock*, etc.) were translated into objects which the user can request, manipulate (change contents, add or remove information) and store on disk by means of the interface. This allows to hide the rather complicated structure of the files, so that the user can access the information by means of simple references (names). This in contradiction to the classical file interface where it is always required to have a detailed knowledge of the file contents. The software was implemented by Ing. G. Diet in the scope of his graduation work [7.5].

Besides the easy access, the software approach also allows to perform error checking during the file creation. Due to the fact that the hierarchical structure formally defines the structure of the file, it is possible to incorporate these rules into the file interface software and prevent less experienced users from creating bad files.

7.3.3 The C++ objects in LabVIEW

As indicated in Section 7.2.3, only the “real” objects (the objects directly used by the end user) and the general methods of the abstract objects will receive a LabVIEW equivalent. Creating LabVIEW icons for the abstract methods is an action performed only once. However, creating LabVIEW icons for the laser model objects is repeated each time a model is being added to the library. Since the method used to add models is fixed and since the code is identical for all models (except for the calculations), it is possible to (partly) automate the process of adding laser models by means of code generators.

A code generator for this task has been developed and implemented in LabVIEW. It requires a minimum of information and generates the C++ code. Using a few dialogue windows (cf. Figure 7-8), the user has to supply the description of the laser model (name, comments, etc.) and specify the parameters (name and type). Once this information is available, the code generator creates the standard code (i.e. the object header file) the object implementation file and the CIN file for the LabVIEW integration (cf. Figure 7-9). All what the user has to do, is to add the code for the calculation in the right place and compile. It is interesting to note how the framework design reduces the complex construction (*ParamRegister* - *ExportParam* combination) to a simple initialiser in the object constructor.

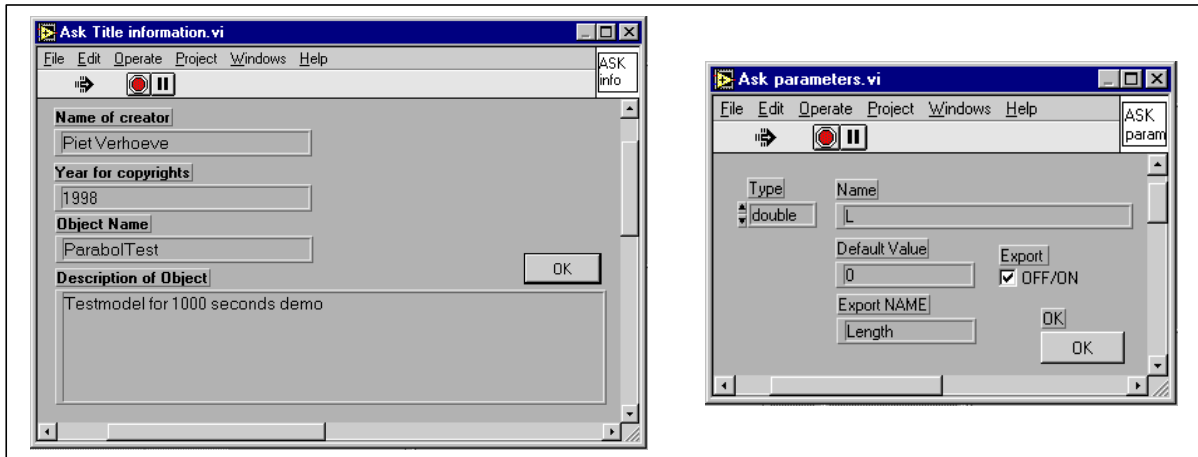


Figure 7-8: Example of the main dialogue windows of the code generator (implemented in LabVIEW). The left window is used to get the standard information, the right window is used to specify the parameters of the model.

Within the current structure of LabVIEW it is not possible to create code generators for the LabVIEW code. But once the manufacturer of LabVIEW allows this for the users, a similar semi-automatic approach can be implemented for the graphical code. In the mean time the user can modify example code to implement the new laser model.

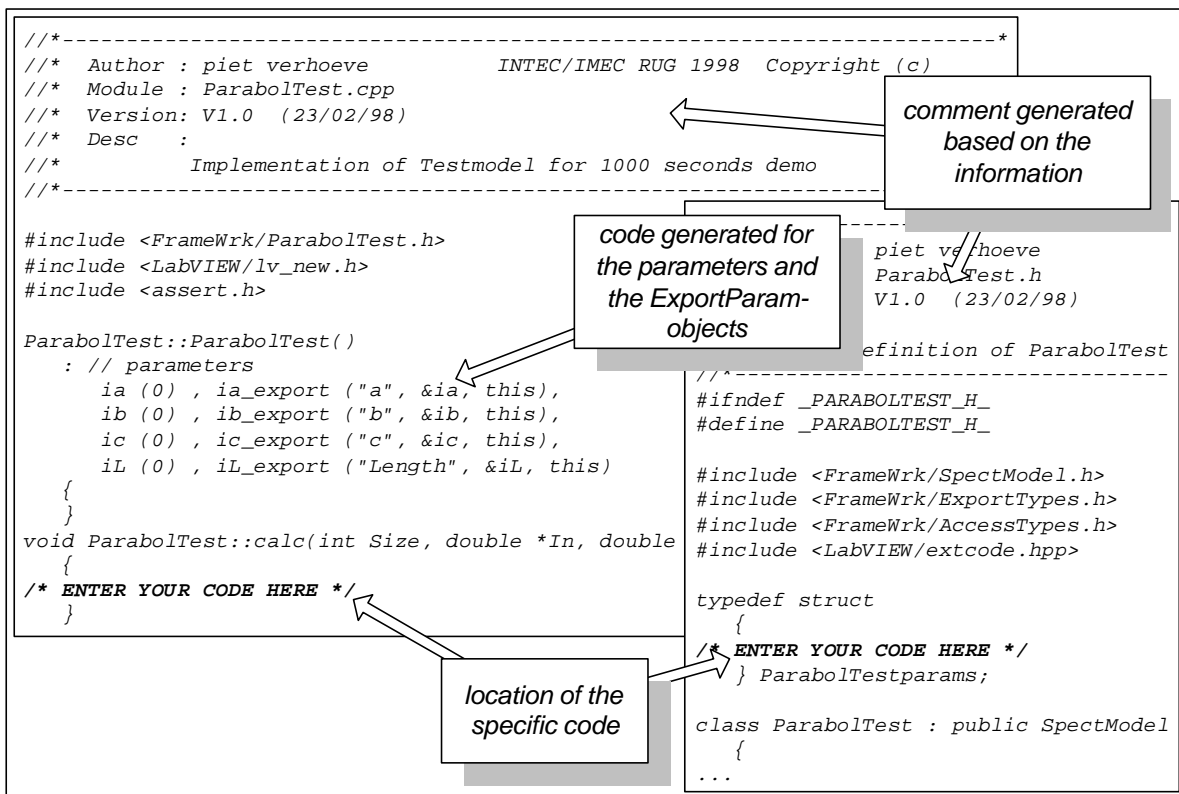


Figure 7-9: An example of the generator code. On the left the object implementation file (.cpp) and on the right the corresponding header file (.h).

7.3.4 Documentation of the applications

As it is the case for any development, documentation is necessary for this development. Although there have been many discussions and publications on this topic, it is still interesting to give the issue some more thought in the scope of this work. Most documentation methods are based on a large discipline from the programmer and are in many cases environment or language specific. Literated programming [7.6] is such an example. It uses special commands which can be used to enter the documentation together with the code. Once all is available, special applications can be used to convert the combined information (code and documentation) into specific documentation. Examples of such tools are Web [7.7], Cweb [7.8] en Noweb [7.9]. Although these methods are useful, they require a strong discipline of the programmer and cannot be used in combination with graphical languages like LabVIEW.

The proposed hybrid approach where the implementation is based on the intermixing of two programming languages requires a uniform approach to documentation in which both languages can be documented. Furthermore the documentation method should be as simple as possible (preferably semi automatic) in order to keep the documentation threshold as low as possible.

In general the documentation can be seen on three levels, each with specific needs. These levels are: the end user, the expert user and the programmer user. The end user is the person who is using the applications, he is mainly interested in a “user manual” kind of information. The expert user can be seen as an end user which is interested in what he is doing. In other terms, the user manual extended with information on the used models, the mathematical aspects of the application, etc. The last category goes even further: the programmer user wishes a complete overview of the implementation methods. This should allow him to make modifications/extensions to the software based on the documentation. This large difference between levels one and two versus level three resulted in two documentation methods: one for the first two levels and one for the third level.

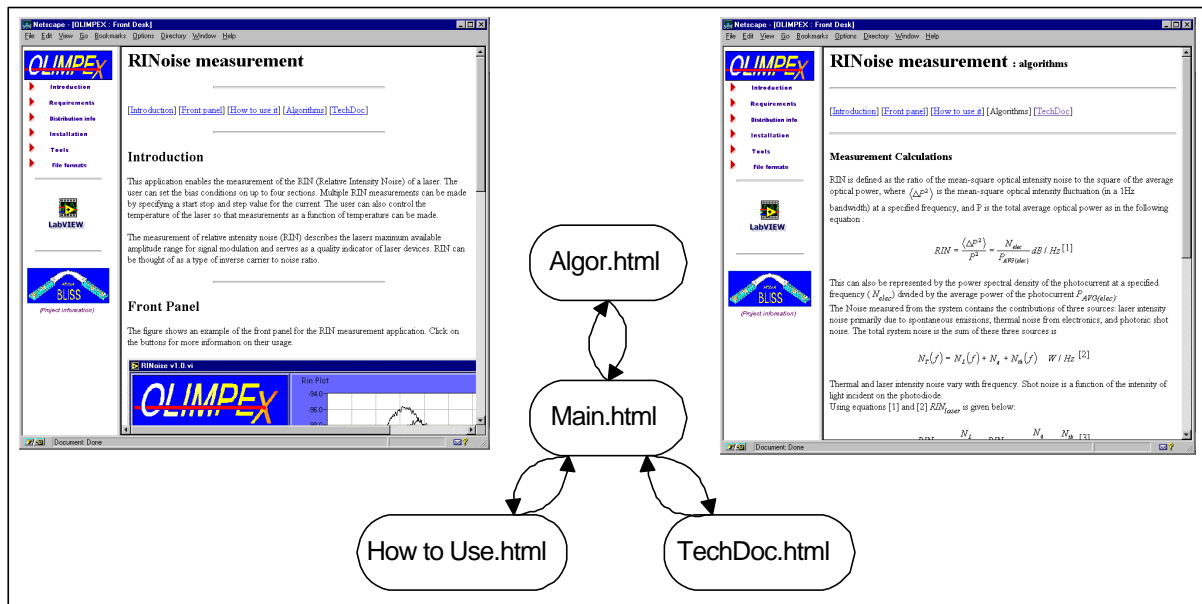


Figure 7-10: In the middle: the principle of documentation used for each application. On the left and the right examples of the end result (as can be seen in appendix D)

To keep the documentation at the same time easily accessible and simple, a HTML based approach was chosen. This allows to modify, add or remove information on any component without causing enormous problems. The accessible version is always up to date and the most recent version. To keep the documentation threshold as low as possible several documenting tools have been implemented to generate the set of HTML files automatically. The user only has to specify the information content.

The documentation for the first two levels (end user and expert user) is organised according to application and it consists of four files as shown in Figure 7-10. The access file (*main.html*) contains a general introduction, a description of the front panel. The related files contain information on the usage (*How to Use.html*), the mathematical background (*Algor.html*), an example output file and some details on possible error messages of the application (*TechDoc.html*).

The third documentation level (programmer user) was designed differently. Again there is a separate documentation for each component, object or application but this time the documentation consists out of more files, even with a link to the actually used code. This last aspect is very useful in lowering the documentation threshold. Indeed, in many cases (e.g. simple functions like object interfaces) the code is very simple and sufficient as documentation. In the case of graphical code, it cannot be linked directly but an image of the code can be used. Figure 7-11 shows an example of this level three documentation for a C++ parameter extraction object. On the left the structure of the HTML files can be seen. They contain the information on the object: a description, the parent objects (“*parents*”), the derived objects (“*children*”), the most important functions designed for the LabVIEW interaction (“*LabVIEW*”) and a link to the implemented code (“*files*”). More detailed examples are available in appendix D.

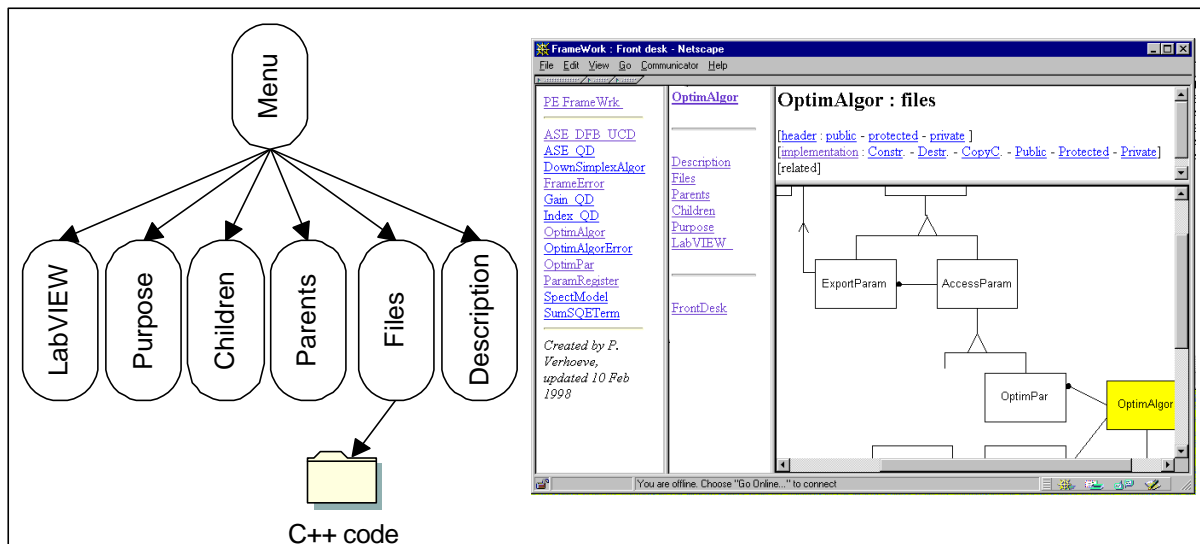


Figure 7-11: An example of the level three documentation for a C++ parameter extraction object. On the left the structure of the HTML files, on the right an example on how the information is shown in a browser.

7.4 The fundamental applications

7.4.1 The standard application

The term standard application is used to classify most specific measurement applications. These are measurement applications with a specific task, which inherently allows very little or no re-use, e.g. OSAview, ESAview, etc. respectively the optical and electrical spectrum analyser implemented on a PC. The implementation method based on a finite state machine is the best solution for these applications. Such mechanisms have already been used in the past both in hardware and software applications, [7.10], [7.11]. However they were extended with scenarios in the context of the complex applications developed during this thesis.

Contradictory to the most widely spread implementation methods for finite state machines, it is not each state which decides the next state but a scenario is used to define the state sequence. The scenarios can be seen as a “program” for an advanced “measurement computer” (i.e. the finite state machine).

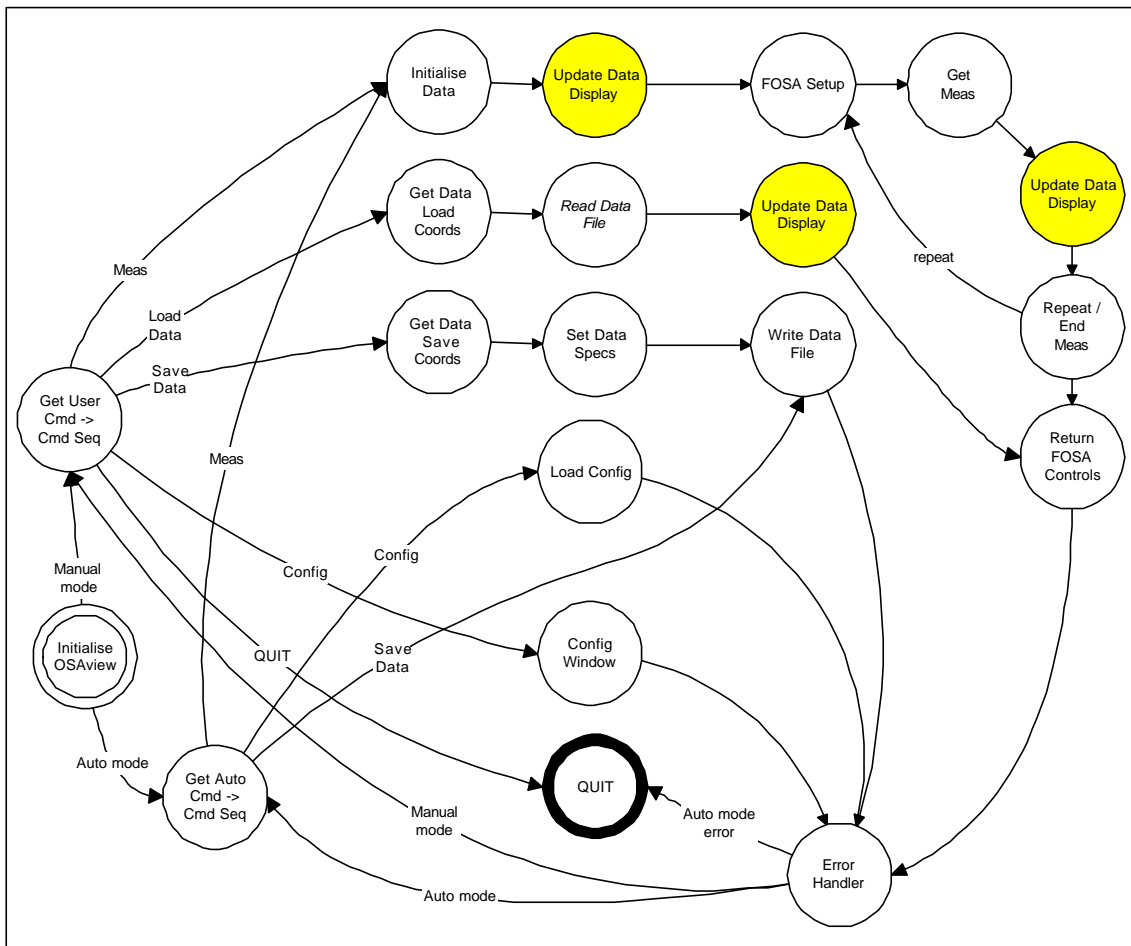


Figure 7-12: An overview of the finite state machine used to implement “OSAview”. The circles represent the different states, the arrows indicate the possible scenarios. The three states in grey are identical and were only implemented once.

In order to make the measurement application more transparent and easier to maintain, the user interaction is localised in one single state (the state indicated by the circle with the text

“Get User Cmd -> Cmd Seq” on Figure 7-12). If the user wants to execute a task of the measurement application this state will determine the states to be executed based on the front panel settings. Once this sequence is known, the different states are executed in order and the specified task completed. The scenarios are indicated by arrows in Figure 7-12. Furthermore the user display (results, graphs, etc.) and the error treatment are also grouped into separate states.

The method developed results in much simpler finite state machines since the separate tasks are better defined. This offers an easier implementation, debugging and extending of the application. Since the separate states are smaller and since the scenario approach increases the re-use of states, it will also reduce the amount of code needed to implement a certain task (e.g. the “update Data-display” state).

Only the scenario indicates which and in which order the states are executed, this implies that the finite state machine (the measurement application) can be reconfigured *after* the software has been implemented. This is an important feature if the application is to be used remotely or as plug in component for a larger application. In those cases all user input states need to be skipped. But it is also a powerful mechanism to guard the measurement application from the ever changing requirements of the user. For example, in a research environment it is customary to see the measurement and the saving of the data as two separate tasks. In a production environment this is normally one task, the measurements are always saved at the end of the measurement cycle.

7.4.2 The engine application

The term engine application is used to indicate applications that can easily be re-used for implementing a set of measurements.

In the case of opto-electronic components it is very often required to characterise them as function of a parameter, e.g. as function of currents (multi section laser diodes), as function of wavelength (wavelength filters), as function of temperature, etc.

It would be very inefficient to rewrite parts of the software (e.g. driving currents) to implement several measurement applications. For example, measurement of linewidth as function of current, measurement of wavelength as function of current, measurement of power as function of current, etc.

Otherwise it would also be a waste of effort if the code for an advanced measurement (e.g. linewidth of a laser diode) had to be implemented multiple times if the measurement had to be done as function of several parameters. For example, linewidth as function of one current, linewidth at a specified current, etc.

A mechanism needs to be designed such that it allows to re-use parameter variations (e.g. linewidth as function of currents, wavelength function of currents, etc.) and that it allows to re-use the measurements under different conditions (e.g. linewidth as function of currents, linewidth at a specific current, etc.). In this thesis this approach is called the engine application: the control of a varying parameter (e.g. a current) forms an engine for the specific measurements (e.g. linewidth, power, etc.). The actual measurements are considered to be kernels used by the different engines. This implies that it is no longer required to implement all combinations of measurements and varying parameters but that they can be implemented separately. This reduces the number of applications and at the same time it increases the

measurement possibilities. Figure 7-13 shows an example where only six (2+4) applications are needed. Without the engine concept eight (2*4) applications are required, a relevant difference that increases with and increasing number of engines.

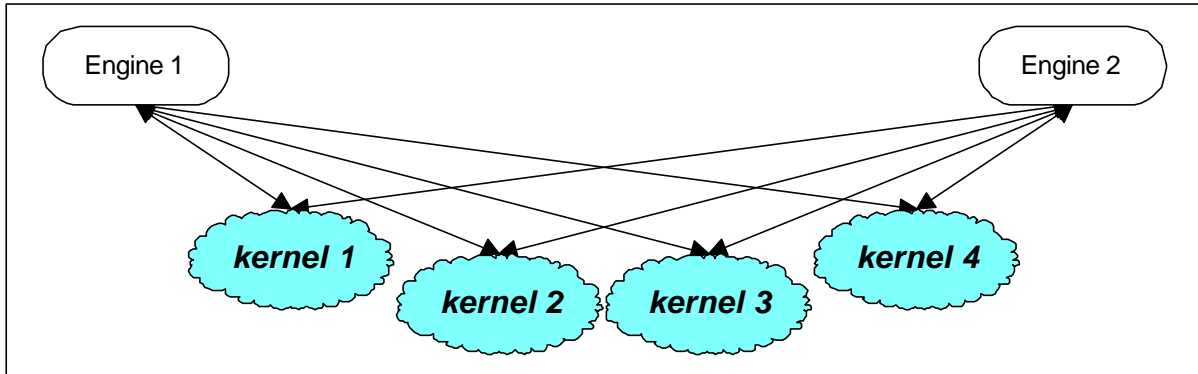


Figure 7-13: Different engines share the same measurement kernels.

Such an engine concept can be realised by applying object oriented programming methods. This method considers the engines (general software) and the kernels (specific software) as objects. Since the general software has no knowledge on the specific measurement, the measurement module will consist of two parts: a measurement core to perform the measurement and a setting core which will allow the user to do the appropriate settings. In the scope of this thesis an application was developed to measure a multi section laser diode as function of four currents.

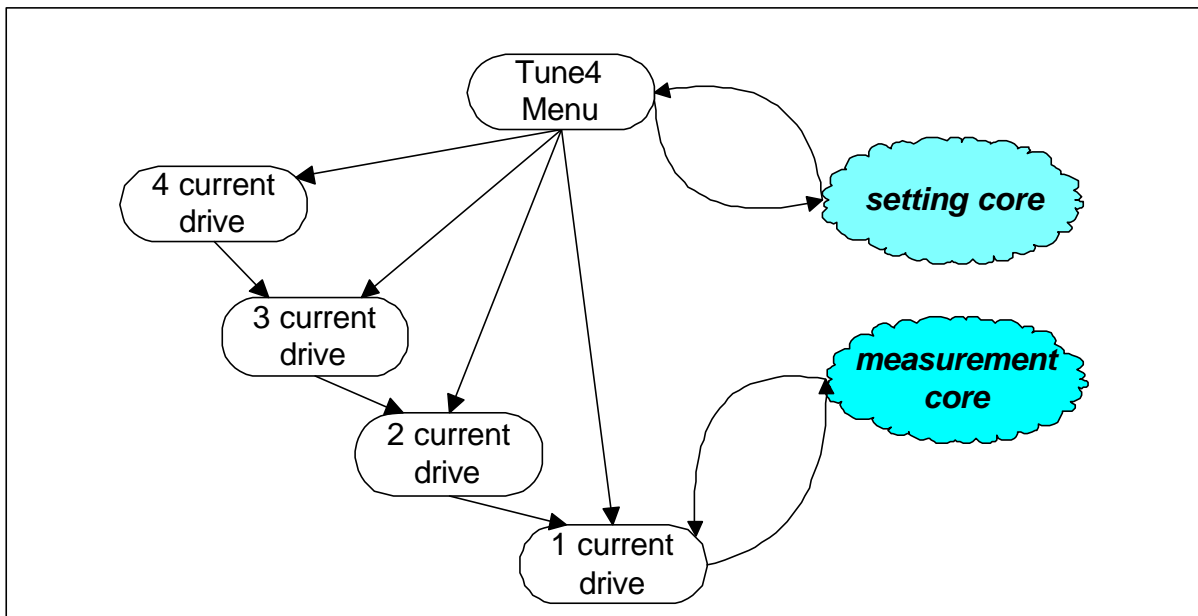


Figure 7-14: Implementation concept of the Tune4 engine application, the general components are in white, the specific components in grey.

Figure 7-14 gives an overview of the principle, the white blocks form the engine object, the grey blocks for the measurement module object. The arrows indicate how the different parts of the code are being used. The menu (top centre part of the figure) uses a setting core to perform the corresponding settings of the selected measurement (e.g. linewidth

measurement). Next the code corresponding to the selected parameter variation (e.g. 2 currents) is being used to control the parameters. This piece of code will in turn use another piece of code to vary a smaller number of parameters and in the end the code of the measurement core is used to perform the measurement.

Besides re-using the engine software and the measurement software it is also possible to use standard applications in combination with an engine. In the scope of this work the different options have been realised: two engines (Tune4 and TuneCo) and a number of measurement cores (wavelength, power, SMSR, etc.) have been implemented. Furthermore measurements where the Tune4 engine was combined with the OSAview standard application have been demonstrated.

7.4.3 The extraction application

The term extraction application has to be interpreted in this work as an application that implements parameter extraction and uses the object model proposed in Chapter 3. In other terms, parameter extraction applications using the LabVIEW C++ hybrid approach.

Since the parameter extraction framework has been designed to model the parameter extraction problem in an abstract way such that models, cost functions and optimising algorithms can be easily interchanged, it would be nonsense to implement a specific graphical user interface (GUI) for each application. Care has been taken to implement such a graphical user interface in a problem independent way such that the laser model, the parameters and the optimising algorithm can be considered parameters with respect to the graphical user interface.

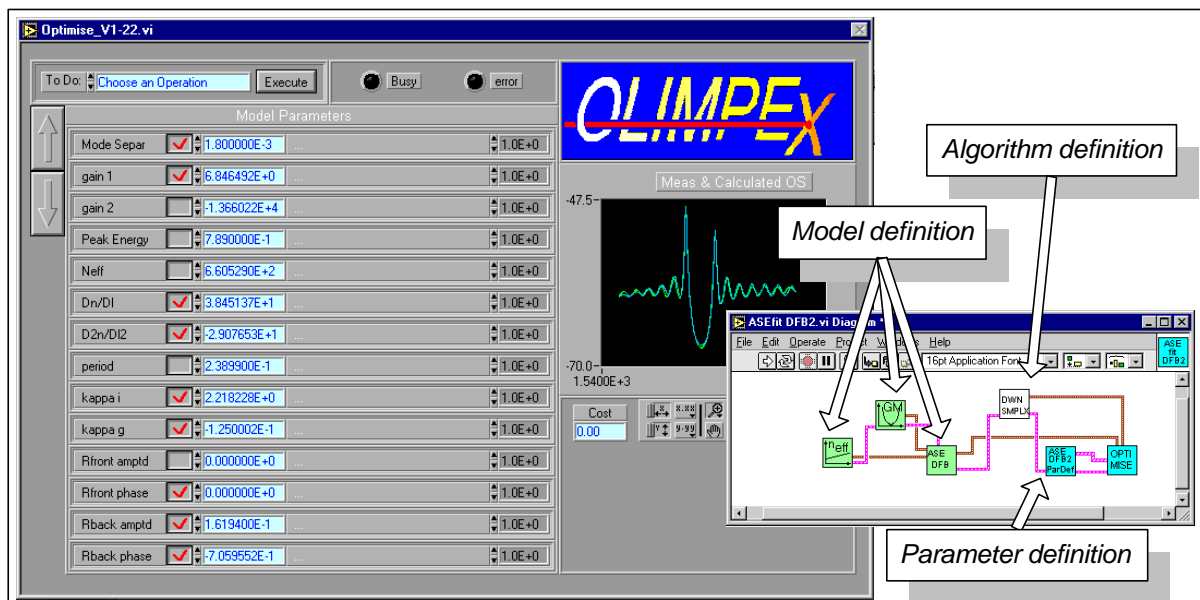


Figure 7-15: Left: the graphical user interface, right the way this graphical user interface has been used by specifying the model, algorithm and parameters.

Figure 7-15, on the left, shows the graphical user interface for the parameter extraction application from the viewpoint of the end user. In the example the model of the amplified spontaneous emission spectrum is specified. The right side of the figure shows how this application was realised by the programmer. The diagram shows (from left to right) how the

model, the optimising algorithm and the parameters are being defined and passed onto the “OPTIMISE” icon (most right icon) that represents the graphical user interface application.

This approach allows the programmer users, without any detailed knowledge, to create new parameter extraction applications based on the available components. In a very short time, the user can realise a full application containing all aspects needed for model fitting (including a structured result file according to the ODIF standard).

7.5 The end result: OLIMPEX

7.5.1 Introduction

The different software principles that were developed in the frame of this thesis and which have been introduced in the previous sections have been implemented in practice. During this implementation the emphasis was not put on generating a complete set of measurement tools, but on the demonstration of all principles presented in a number of specific situations.

This section gives a short overview of the realisations. A more detailed overview can be found in appendices B and D. For reasons of clarity, it has to be noted that the number of components and applications is still increasing, which means that the lists given in this section is not complete.

7.5.2 What is OLIMPEX ?

Since it was the intention from the start, the different applications have been developed according to one philosophy and they form an integrated set of tools. Thus, it seemed logical to group the different applications and distribute them under a common name. The applications were distributed under the common name “OLIMPEX” amongst a number of partners from the European project BLISS and several other labs. The acronym OLIPMEX stands for **O**pto-**e**lectronic **I**ntegrated **M**easurement and **P**arameter **E**Xtraction.

The name OLIMPEX is used to indicate the applications as well as the components that were realised according to the principles presented. The most important components are: the abstract communication with measurement instruments (i.e. the functional instrument driver principle), the file interface based on the ODIF syntax and some very explicit compatibility rules concerning the information exchange with respect to other applications.

During the introduction of OLIMPEX in the BLISS project two information packages have been distributed. At the initial introduction date, a brochure was spread amongst the BLISS partners which gave information on the applications and had a copy of the front panel as illustration. This brochure has been added as appendix B to this text. At the release time of the applications, a CD-ROM containing more detailed information, was distributed. It contains the user manual and some information on the mathematical background. This CD-ROM has been added to this text as a part of appendix D, which furthermore contains an example of the discussed documentation principles and the ODIF syntax (including the interface software).

7.5.3 The realised components and applications

The foundations of the OLIMPEX applications are formed by the implementations of components like the ODIF interface, the C++ parameter extraction framework and the functional instrument drivers. The list of functional instrument drivers currently contains most instruments used for opto-electronic characterisation, such as current sources, optical power meters, optical spectrum analysers, electrical spectrum analysers, tuneable lasers, temperature controllers, etc. This list is still expanding, the kinds of instruments as well as the number of manufacturers which can be controlled by the software.

The first standard application which has been realised received the name OSView and implements the functionality of an optical spectrum analyser on a computer (cf. Figure 7-16). The end user has basic control over the instrument, he can perform settings and measurements, can zoom in on the results by means of cursors and can save the settings together with the results in a file for inspection on a later date.

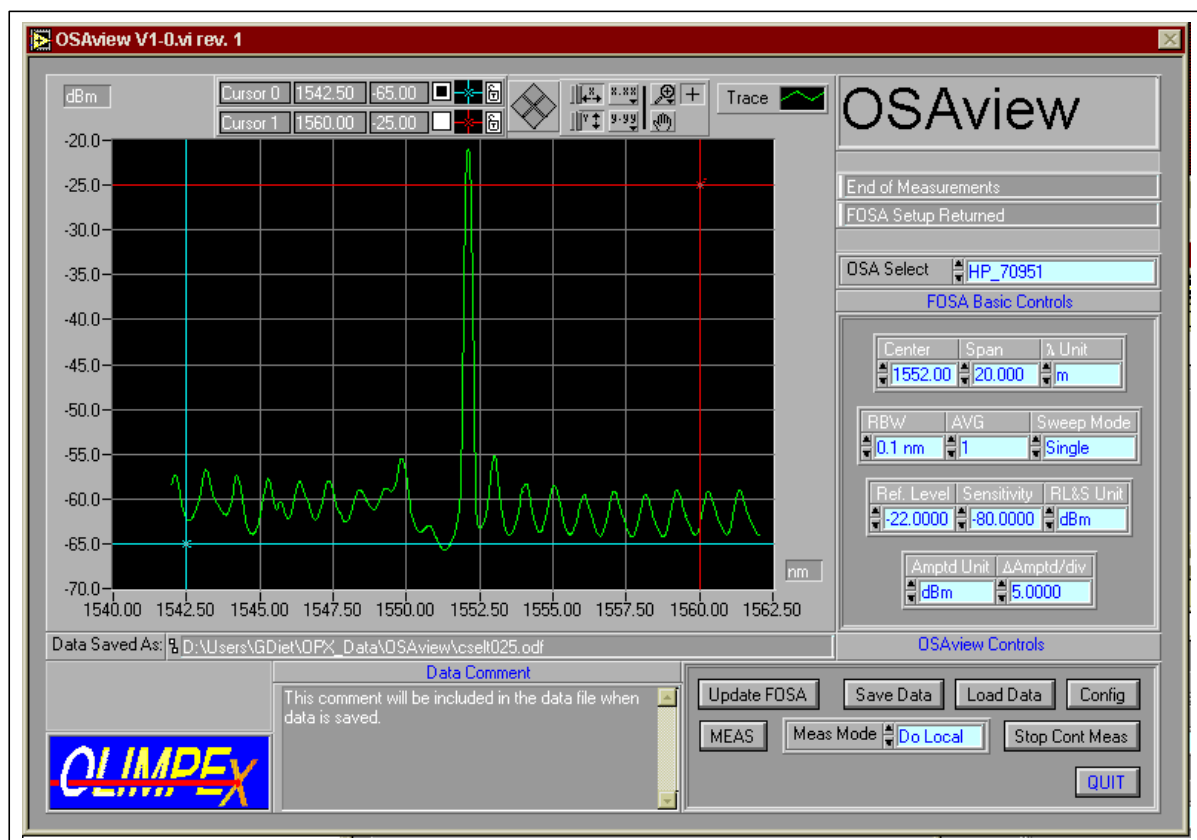


Figure 7-16: The graphical user interface of the standard application OSView. It implements the functionality of an optical spectrum analyser on a computer.

This application also has been used to illustrate the principle of remote measurements (hence the option “Meas Mode: do local”, in the right lower corner of the figure). A measurement on a laser diode on the set up in Gent was performed through the Internet by a person in Brussels . As explained in Chapter 3 (Section 3.3) this was realised by using two identical OSView applications. The version in Brussels created a settings file which was

passed through the Internet to the version in Gent, which performed the measurement in automatic mode.

During the writing phase of this thesis ESAview, the electrical equivalent of OSAview, has been realised [7.12]. As the name implies this application implements the functionality of an electrical spectrum analyser on a computer.

The second standard application was implemented by Ir. G. Sarlet and received the name FPgain. It is intended to measure and analyse the internal optical loss of a waveguide. It is interesting to note that the measurement can be realised in several ways according to the component under test. In the case of passive components a transmission measurement has to be performed, light is coupled into the waveguide and the amount of transmitted light is being measured. Active components (e.g. laser diodes) generate light internally so the measurement can be performed using an optical spectrum analyser. In this case FPgain uses the OSAview application as plug in module.

To illustrate the principle of the engine application Tune4 has been realised. This application has as main purpose to measure “something” as function of one to four currents. Initially two measurement cores have been implemented: one for wavelength characterisation of tuneable laser diodes and one using OSAview as plug in module. Recently a second engine application has been realised, called TuneCo. Where Tune4 scans the current in a certain range, this dual version of Tune4 measures only in a discrete set of points in the 4-D current space (specified by a list).

The first parameter extraction application that was realised, implemented the fitting of the amplified spontaneous emission spectrum (as presented in Chapter 5). Figure 7-15 in the section on the parameter extraction implementation details shows this application. By means of the realised code generators other models have been added using the same principles

7.6 Conclusion

This chapter has treated the different implementation aspects and the results of the measurement and parameter extraction software. It has been explained why a hybrid implementation (C++ and LabVIEW) has been chosen and how this choice has reinforced the end result. In order to realise the hybrid implementation, a symbiosis of both languages has been investigated within the scope of this work. To this extent abstract principles have been developed and realised to associate C++ objects with icons (graphical functions in LabVIEW). Furthermore the interaction between the two languages has been realised in an object oriented style.

The second part of the chapter has illustrated how the foundations for the applications have been implemented in a general way. The ODIF interface has realised a name-based access to information in the files. Due to the development of general methods for implementing functional instrument drivers and laser models, it has been possible to partly automate the implementation process. For the implementation of these models, a prototype of a code generator has been implemented. Finally, a general approach to documentation has been developed based on HTML technology.

The third part of the chapter has treated the principles involved in implementing the three fundamental applications: the standard application, the engine application and the parameter extraction application. The implementation methods developed and their advantages were briefly discussed and illustrated by means of an example.

The last part of the chapter has given an overview of the applications that have been realised according to the principles described. The collection of operational tools for measurements and parameter extraction for opto-electronic components was given the name OLIMPEX and the available set of tools is currently still expanding. Some of the applications discussed in this thesis are currently being used and evaluated by a number of institutes in Europe, Canada and the US.

-
- [7.1] “LabVIEW Code Interface Reference manual”, Chapter 3: CIN advanced topics, National Instruments Corporation
 - [7.2] “Hands on course, LabVIEW Code Interface Node”, National Instruments Corporation
 - [7.3] P. Verhoeve, “Stretching the limits of LabVIEW: the symbiosis of Object Oriented C++ programming and G”, LabVIEW Technical Resource, Vol.6-1, 1998
 - [7.4] P. Verhoeve, “The route to G++, object oriented programming techniques in LabVIEW”, LabVIEW Technical Resource, Vol. 6-2, 1998
 - [7.5] G. Diet “PI-karakterisering van halfgeleiderlasersdiodes met LabVIEW”, graduation work, Katholieke Hogeschool St.-Lieven, 1995-1996
 - [7.6] D.E. Knuth, “Literate Programming”, Stanford University, Calif., 1992
 - [7.7] D.E. Knuth, “The Web system of structured documentation”, tech. Report 980, Computer Science Dept., Stanford, Univ., Calif., 1983.
 - [7.8] H. Thimbleby, “Experiences of Literate programming using CWEB (a variant of Knuth’s Web)”, Computer Journal, pp. 201-211, 1986
 - [7.9] N. Ramsay, “Literated programming simplified”, IEEE software, pp. 97-105, 1994
 - [7.10] Gary W. Johnson, “LabVIEW graphical programming, Practical applications in instrumentation and control”, second edition, McGraw-Hill, 1997
 - [7.11] L. Butler, “Queued State Machines”, LabVIEW Technical Resource, Vol4-4, 1996
 - [7.12] W. De Decker, J. Van Dingenen, “Implementation of measurement algorithms for advanced laser diodes by means of LabVIEW.”, graduation work (in Dutch), Catholic High School St.-Lieven, 1997-1998

CHAPTER 8

Evaluation of the measurement and extraction tools

8.1 Introduction

This chapter will describe the evaluation of the procedures and applications that have been developed (Chapters 3, 4 and 5) and implemented (Chapter 7). The methods were applied to a number of existing components.

The first part of the chapter treats the combined parameter extraction procedure as described in Chapter 5. The method is applied to a set of Fabry-Perot and DFB laser diodes.

The second part of the chapter treats the ASE-based parameter extraction for a DBR laser diode.

Due to the large amount of numerical data, this chapter will only give an overview of the most important results. In the case of the Fabry-Perot laser diodes, the parameter extraction based on the RIN extraction is treated. In the case of the DFB and DBR laser diodes, the emphasis is put on the ASE based parameter extraction.

8.2 Extraction on a set of FP and DFB laser diodes

8.2.1 Description of the laser diode set

In the context of the European project BLISS (“*Broadband LIghtwave Sources and Systems*”) nine laser diodes were donated, to test and evaluate the presented procedures. They were fabricated at the Industrial Microelectronics Centre, located in Stockholm (IMC, PO-Box 1084, S-164 25 Kista, Sweden).

As proposed in Chapter 5, the laser diodes were fabricated from the same semiconductor material and have an identical structure for the active layer, except for eventual non-uniformities. The nine laser diodes are divided into three categories: Fabry-Perot laser diodes, DFB laser diodes with one coated facet and DFB laser diodes with both facets coated. Each category consists out of three laser diodes, each with a different length. An overview of the laser diodes is given in Table 8-1. In the column for the length of the laser diodes two numbers are presented: the specified length and the length determined by a measurement using an optical microscope. The non-coated facets are specified with a dash and the two indications are respectively for the front and rear facet of the laser diode.

Name	Type	length given/meas [μm]	Facet coating
IMC1	Fabry-Perot	160/153	-/-
IMC2	Fabry-Perot	200/190	-/-
IMC3	Fabry-Perot	300/279	-/-
IMC4	DFB	140/145	AR/-
IMC5	DFB	200/190	AR/-
IMC6	DFB	240/229	AR/-
IMC7	DFB	150/170	AR/AR
IMC8	DFB	200/188	AR/AR
IMC9	DFB	240/230	AR/AR

Table 8-1: Overview of the donated laser diodes.

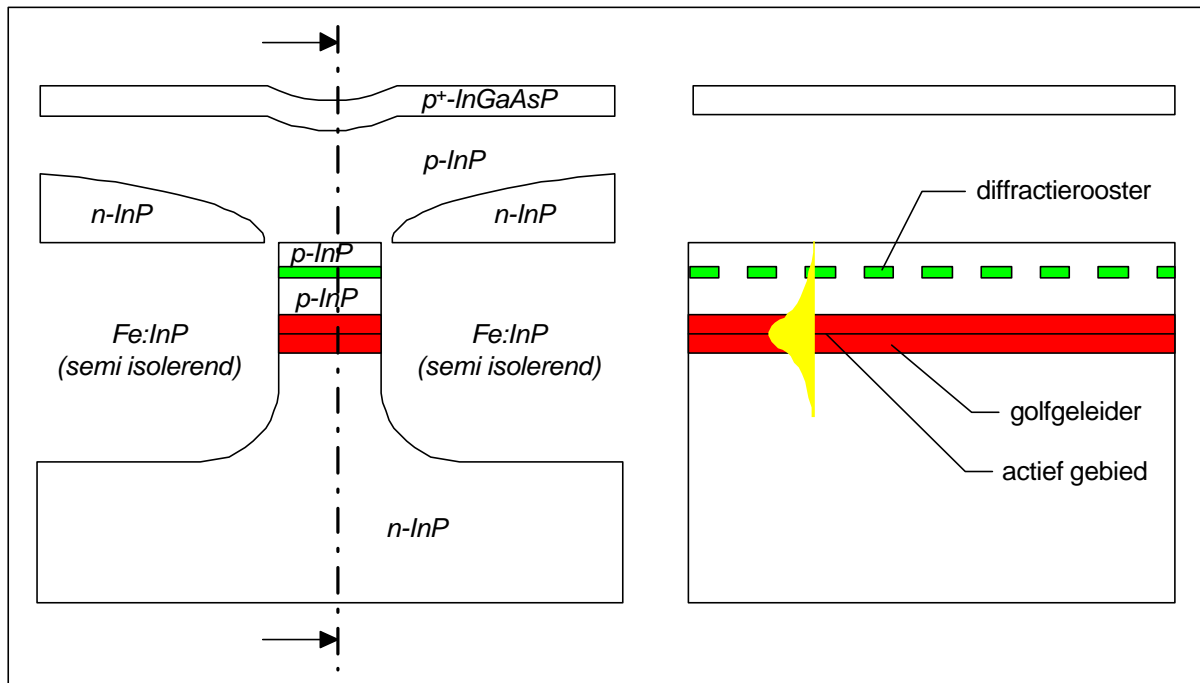


Figure 8-1: Left a cross-section perpendicular to the cavity and right a cross-section along the cavity of the used DFB laser diodes. In the case of the Fabry-Perot laser diodes the layer for the diffraction grating is present though not periodic.

Figure 8-1 shows two cross-sections of the DFB laser diode. The periodic structure of the diffraction grating is clearly visible in the longitudinal cross-section (right hand side of the figure). In the Fabry-Perot laser diodes, this layer is present though not periodic. The transverse cross-section (left hand side of the figure) shows the semi-insulating material (SI-InP) used to prevent spreading of the current. The manufacturer (i.e. IMC) estimates the mesa width at $1.5 \mu\text{m}$.

Figure 8-2 shows the layer structure in more detail. The thickness of the different layers has been drawn on a relatively correct scale (only the substrate thickness is drawn smaller than reality). The active layer consists of a number of “strain compensated quantum wells”, eight in total, each one 7 nm thick and separated by a 8 nm thick separation layer. Hence

the total active thickness of the active layer is 56 nm. The photoluminescence wavelength of the material was measured to be 1580 nm.

The laser diodes were delivered on an silicon sub carrier, in other terms, the laser diodes have been attached to a piece of silicon and the contacts of the laser diode have been connected through bond wires. Thus eliminating the need to contact the laser directly by means of probe needles. The Si-carrier also limited the access to the laser diode, only the light originating from the front facet could be measured. Hence all results discussed in this chapter are based on front facet measurements.

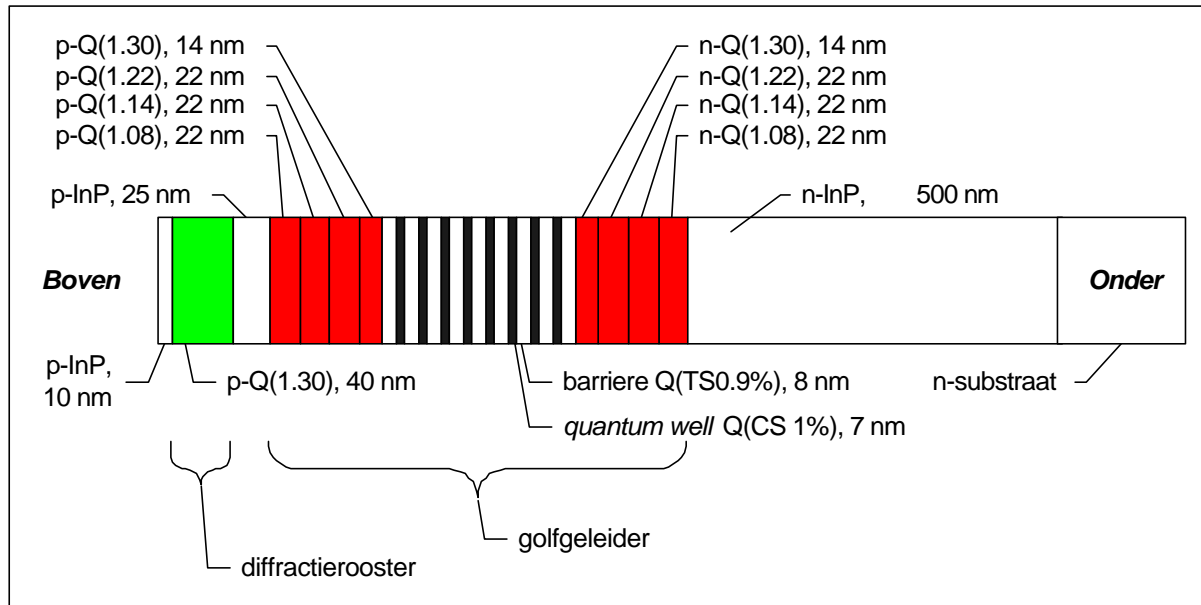


Figure 8-2: Detailed layer structure of the laser diodes used in the parameter extraction procedure.

8.2.2 The measurement procedure used

To realise the characterisation of the laser diodes, the method described in Chapter 5 has been used. In a first stage each laser diode is characterised separately and the results are compared with the results obtained on similar components (Fabry-Perot, DFB-AR/-, DFB-AR/AR). If this comparison indicates the material properties of the laser diodes are sufficiently uniform, the second stage of the characterisation procedure can be performed. In this stage the information obtained on similar laser diodes with a different length is combined. The third stage of the characterisation can be performed if the previous steps have been successful. The final stage of the characterisation will combine the information on all laser diode variants.

Figure 8-3 gives a schematic overview of the entire procedure. The laser diodes and their results are being represented by “rounded rectangles”. The used measurement and extraction applications are being represented by “shadowed rectangles” and the intermediate files containing the results are being represented by “clouds”. The results without a “rounded rectangle” are results obtained from a set of laser diodes rather than a single laser diode (e.g. the optical loss (α_i) originating from the “*IntLoss*” application).

Starting from the laser diodes (left on the figure) the first measurements are performed on all laser diodes. The amplified spontaneous emission spectrum (ASE) is measured at a

number of currents below the threshold current, both for the Fabry-Perot as well as for the DFB laser diodes. This is done using the optical spectrum analyser application “*OSAvi*”. The measurement application “*LIV*” is used to measure the power versus current properties of the laser diodes. This measurement is repeated for a number of temperatures of the laser sub mount. The final initial measurement is the relative intensity noise measurement (RIN), performed by means of the “*RINoise*” measurement application. Both the measurement of the RIN and the ASE are performed at a constant temperature of 20 degrees Celsius.

The results of each measurement application are saved in a file which complies to the ODIF syntax (as described in Chapter 3). The first parameters which are determined by this procedure are the threshold current (I_{th}), the external efficiency (η_i) and the series resistance (R_s) for each measured laser diode. Due to the simplicity of their extraction, the determination of these parameters is built in into the “*LIV*” application.

At the top of Figure 8-3 it can be seen how the information from a “*LIV*” ODIF file is used by the application “*TempChar*” to determine the characteristic temperature of the laser diodes. The expression for this extraction can be found in Chapter 4. In the case of the Fabry-Perot laser diodes, the results from the “*LIV*” application can also be used to determine the internal optical loss and the internal efficiency of the “average” laser diode. This is done by means of the “*IntLoss*” application, which calculates the parameters based on the inverse efficiency versus length relationship.

The middle section of the figure shows the utilisation of the amplified spontaneous emission spectrum for further parameter extraction. In the case of the Fabry-Perot laser diodes, the “*FPgain*” application is used. This application applies the Hakki-Paoli method to determine the internal loss/gain of the waveguide and the group index of each laser diode for each bias point measured. The resulting current dependence of the optical gain and the refractive index of the material can subsequently be used to determine the linewidth enhancement factor (α_{Henry}). In the case of the DFB laser diodes, the “*ASEfit*” application is used to fit the measured amplified spontaneous emission spectrum to the numerical model proposed in Chapter 5.

The bottom part of the figure explains the parameter extraction based on the relative intensity noise spectrum (RIN), a method which can be applied for all laser diodes (both Fabry-Perot and DFB). Once the relative intensity noise spectrum has been measured in a number of bias points, the “*RINfit*” application is used to fit the spectra measured for each laser diode. The “*RINfit*” application does not only extract the resonance frequency and the damping from each spectrum, it also extracts the physical laser parameters according to the procedure described in Chapter 5. If the material parameters are sufficiently uniform for all laser diodes, the “*ABCNextract*” application can be used to determine the recombination parameters for each category of laser diodes.

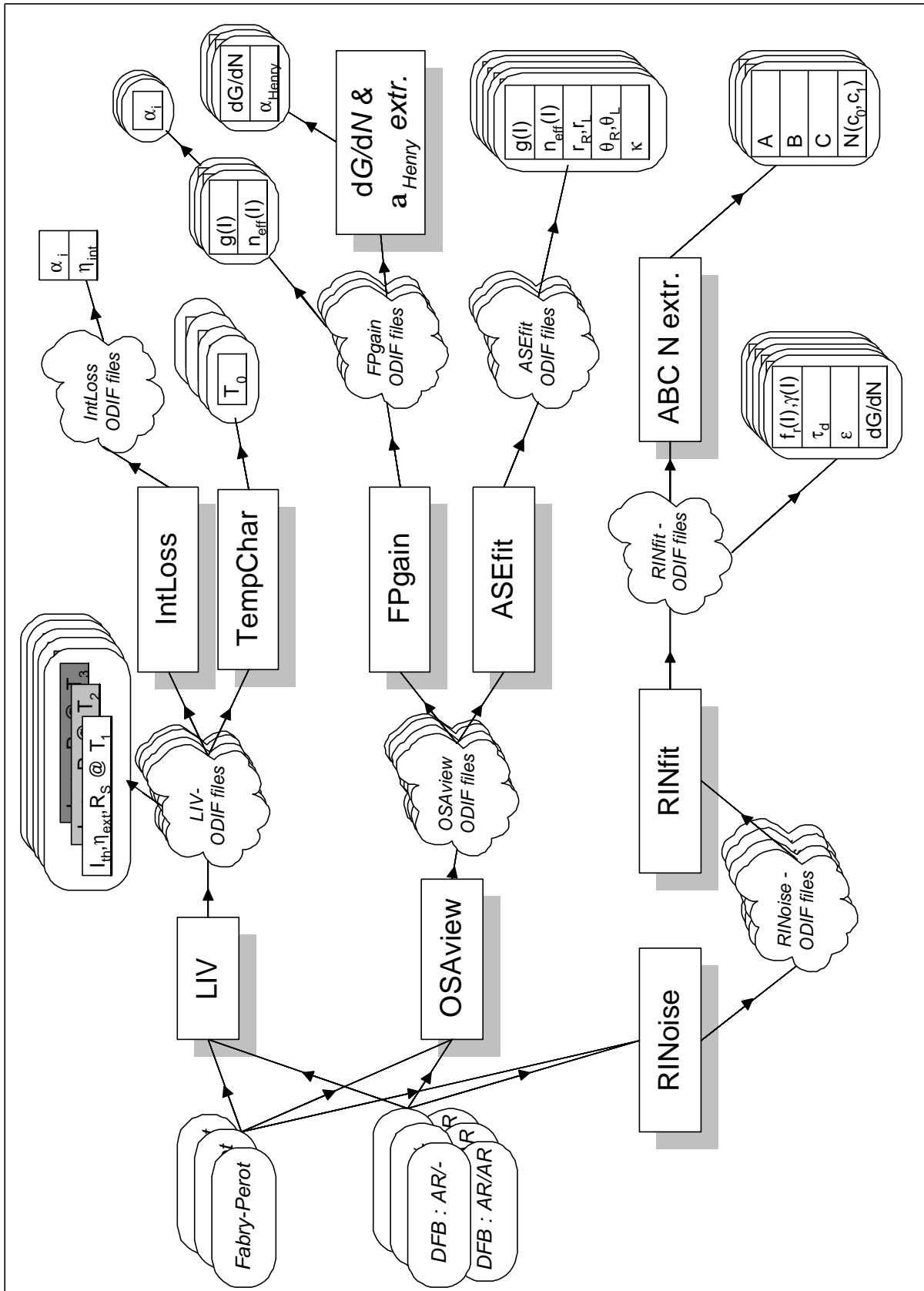


Figure 8-3: Schematic overview of the measurement and parameter extraction procedure. Starting from the laser diodes at the bottom, the different measurement and parameter extraction applications used for the characterisation are shown.

8.2.3 *Evaluation of the applications used.*

The combined parameter extraction exercise was the ideal test situation for the applications implemented. The usage of the applications demonstrated that they fulfil the goals successfully. However improvement is possible, as is the case for all initial implementations. Most of these possible modifications are not of a fundamental nature and can be placed in the category “further optimisations” instead of real modifications. Since it is not the intention of this thesis to present a complete and very detailed picture of all evaluation aspects, this section will only give a brief overview of the general lines of the evaluation results.

The most striking though expected result of the evaluation is that there is a clear need for a well structured data manipulator. The fully functional measurement applications are capable of generating a large amount of measurement data. In their present form, the selection of the data files and the storage of the results is done by means of human interaction. This results in a long overall processing time. An efficient data manipulator would make further automation possible and reduce the total time needed for the parameter extraction.

During the test phase of the measurement applications, a prototype of such a data manipulator has been developed. However it is recommended that this effort is continued, to the extent that an easy integration of the measurement applications and a “real” database becomes possible.

The proposed software model for parameter extraction by means of the symbiosis of LabVIEW and C++ proved to be effective. The code generators developed and the generic software components made it possible to implement new models during the parameter extraction exercise and use them in combination with the generic graphical user interface application. However, the extension of the number of models revealed that the initial limitation of the GUI-application with respect to the parameter units and the optical spectra are too strict.

For the future of this hybrid approach it would be more interesting to provide the possibility of an automatic unit conversion. Ideally the model (implemented in C++) should contain a description of the units. This would make the parameter unit conversion fully transparent to the user. Furthermore, the type of the data to optimise should be a parameter with respect to the GUI-application. This would allow the fitting of non-spectral measurement data.

8.2.4 *The results obtained for the Fabry-Perot laser diodes*

First the results for the separate Fabry-Perot laser diodes will be reported. Secondly these results will be combined and evaluated. For all calculations in this section, the following assumptions have been made:

- The length (L) of the component is the measured length
- The reflection coefficient (R) for both facets is 30%
- The width (w) of the component is 1.5 μm as specified by the manufacturer
- The thickness of the active region (d) is 0.056 μm (8 *quantum wells* each 7 nm)
- The confinement factor (G) was supposed to be 0.2
- Unless explicitly mentioned, all measurements were done at 20°C

8.2.4.1 Parameters obtained from the power measurement (LIV)

Table 8-2 gives an overview of the parameters determined for the three Fabry-Perot laser diodes. The parameters are: the threshold current (I_{th}), the external efficiency (h_{ext}), the external quantum efficiency ($h_{Q,ext}$), the series resistance (R_S) and the peak wavelength above threshold. The last column of the table contains the characteristic temperature extracted from the measurements at different temperatures (18 up to 30°C). In the case of the series resistance two values are mentioned. The first value is the resistance measured in regime (for currents larger than the threshold current). The second value (somewhat higher) is the value determined at threshold current. Both values were determined by calculating the derivative of the measured voltage to the current going through the laser diode.

	Length [μm]	I_{th} [mA]	η_{ext} [mW/mA]	$\eta_{Q,ext}$ [%]	R_S [Ω]	λ_{peak} [nm]	T_0 [K]
IMC1	153	11.74	0.150	18.77	7.17/9.98	1563.2	47.3
IMC2	190	14.02	0.137	17.08	5.68/8.00	1565.2	58.8
IMC3	279	18.47	0.111	13.89	3.91/5.48	1557.0	65.8

Table 8-2: Overview of the first measurement results for the three Fabry-Perot laser diodes

The values found for the efficiency can be used to determine the internal efficiency and the internal optical loss of an “average” Fabry-Perot laser diode. This procedure and the results is shown in Figure 8-4. The optical loss of the material determined by this method is found to be 59 cm^{-1} and match the values obtained by the “below bandgap” method of Ketelsen.

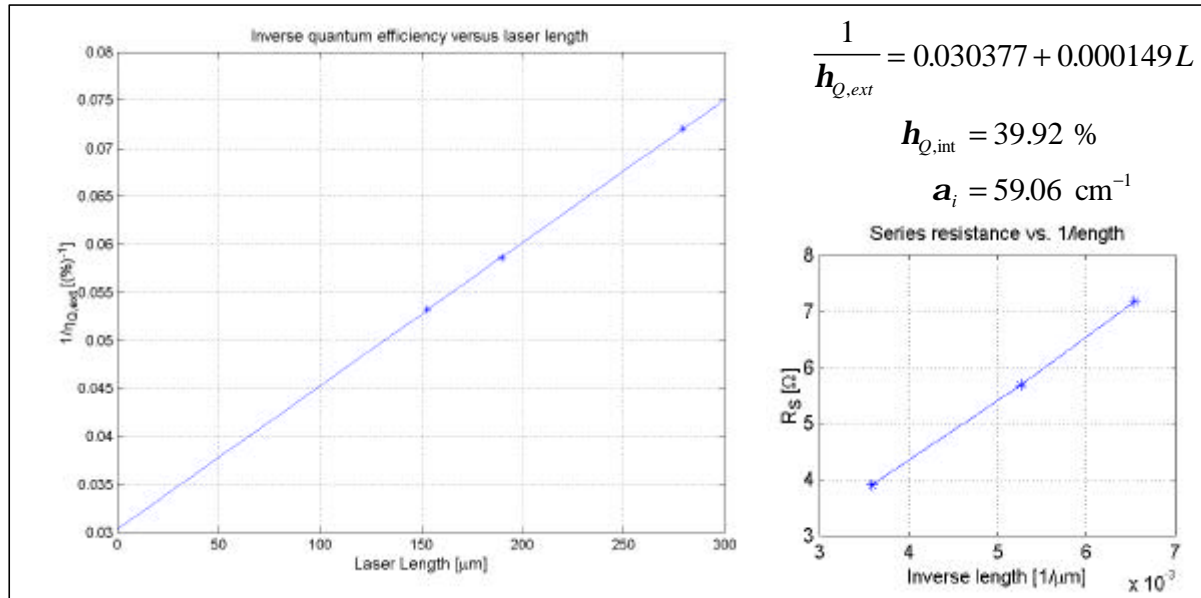


Figure 8-4: The inverse efficiency of the three Fabry-Perot laser diodes as a function of the length to determine the internal loss. On the lower right, the series resistance of the three laser diodes is plotted as a function of inverse cavity length.

8.2.4.2 Parameters obtained from the amplified spontaneous emission

The first parameter determined from the amplified spontaneous emission of a Fabry-Perot laser diode is the group index. Figure 8-5 shows the unfiltered result from the measurement. On both sides of the measurement (low and high wavelengths) the result is less accurate since the measured signal is weak. In order to reduce the influence of noise on the result, the measured curves are fitted to the linear expression proposed in Chapter 4.

To compare the results obtained on the three Fabry-Perot laser diodes, the group index at a specific wavelength has been plotted as a function of bias current in Figure 8-6. The wavelength 1560 nm has been chosen as “average” lasing wavelength of the three laser diodes. The vertical lines in the figure indicate the threshold currents of the laser diodes. The plot shows that two laser diodes (IMC1 and IMC2) have a similar behaviour, clearly different from the result of the third laser diode (IMC3). This result is unexpected, the three curves should more or less coincide since all laser diodes originated from the same wafer of semiconductor material. The fact that the results for the IMC3 laser diode deviate can indicate that a non-uniformity is present.

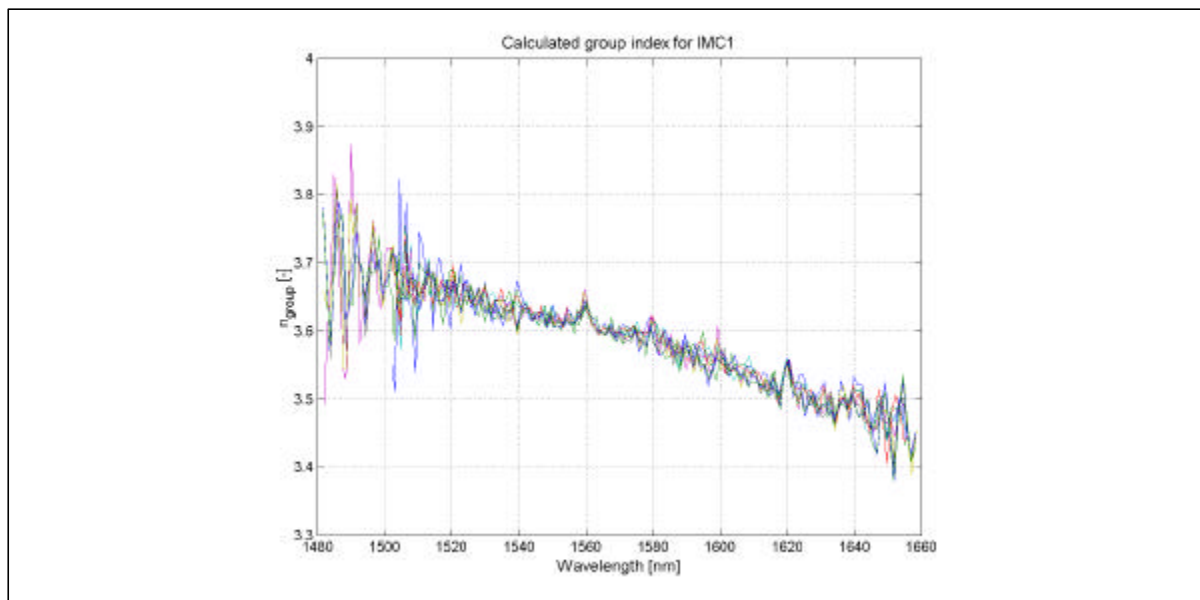


Figure 8-5: An example of the group index, as calculated based on the distance between the Fabry-Perot modes in the amplified spontaneous emission spectrum of the laser diode.

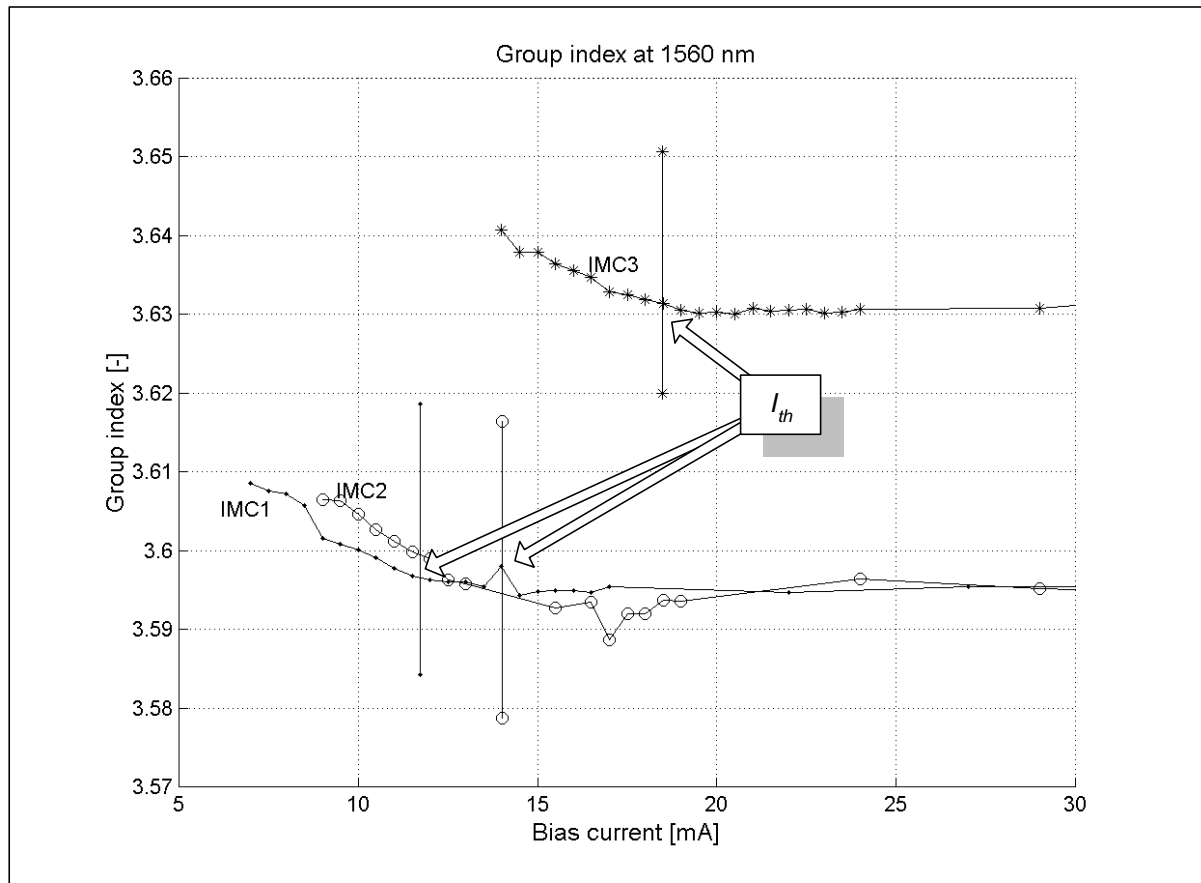


Figure 8-6: The “fitted” group index at a wavelength of 1560 nm (average peak wavelength for the three Fabry-Perot laser diodes).

Figure 8-7 shows the result of the modal optical gain calculation using the Hakki-Paoli method. The resulted displayed is based on the amplified spontaneous emission spectra measured for the IMC3 laser diode. The different curves represent the measurements performed at different bias currents. On the right hand side of the figure (the high wavelength side) the “below bandgap” region can be observed. According the method by Ketelsen, the value observed in this region should correspond with the internal optical loss. In the case of laser diode IMC3, the figure indicates $57 \pm 5 \text{ cm}^{-1}$, which is in good correspondence with the efficiency method. The shorter laser diodes (IMC1 and IMC2) did not have enough output power to fully observe the below bandgap region, which results in a smaller value for the optical loss (50 cm^{-1}).

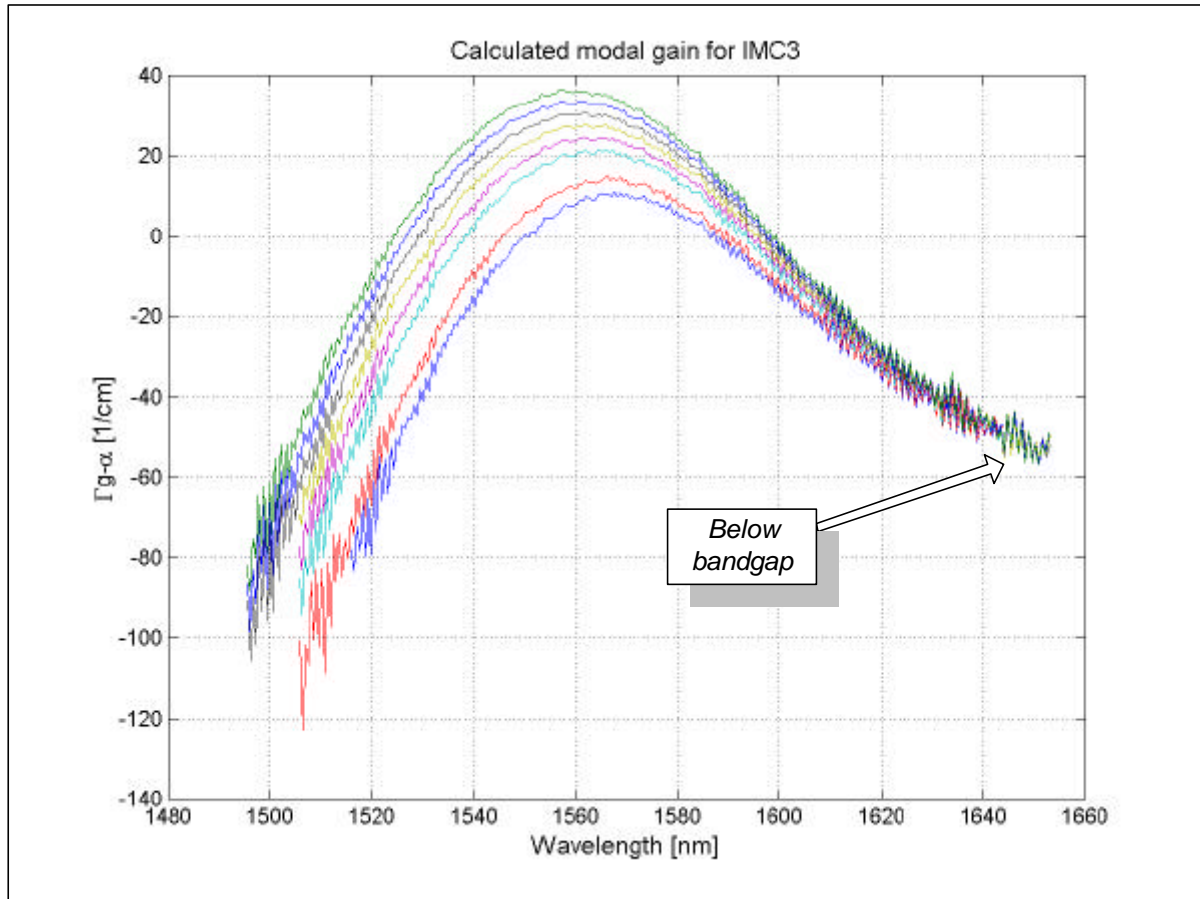


Figure 8-7: An example of the modal optical gain of the material, as determined from the amplified spontaneous emission spectrum by the Hakki-Paoli method.

In order to compare the values obtained for the three laser diodes, the maximum of the modal gain curve is plotted as a function of a normalised current. Since the optical gain is not determined by the current but by the current density, the bias current of the laser diode (I) is divided by the elementary charge (q) and the volume of the active region ($w d L$). Figure 8-8 shows these results together with a curve fitted through the points. This third degree polynome has been used to determine the value of the modal optical gain and the differential modal gain at threshold. The asterisks in the figure represent the modal optical gain at threshold, as determined by the relationship between the cavity length and the reflection coefficients of the mirrors (formula (8.32)).

$$(\Gamma g - \mathbf{a}_i)_{th} = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \quad (8.32)$$

If an error margin of $\pm 5 \text{ cm}^{-1}$ is taken into account, the results measured match the theoretical values rather well in all three cases.

However, the comparison of the results determined for the three laser diodes does not give the expected result. Since the laser diodes originate from the same wafer of semiconductor material and since they have an identical layer structure, the results are expected to match. In other terms, the three curves of modal optical gain versus normalised current should coincide. The fact that this is not observed can be explained in a number of ways: temperature effects,

measurement errors, current spread, incorrect dimensions for the waveguide specification or a different waveguide structure.

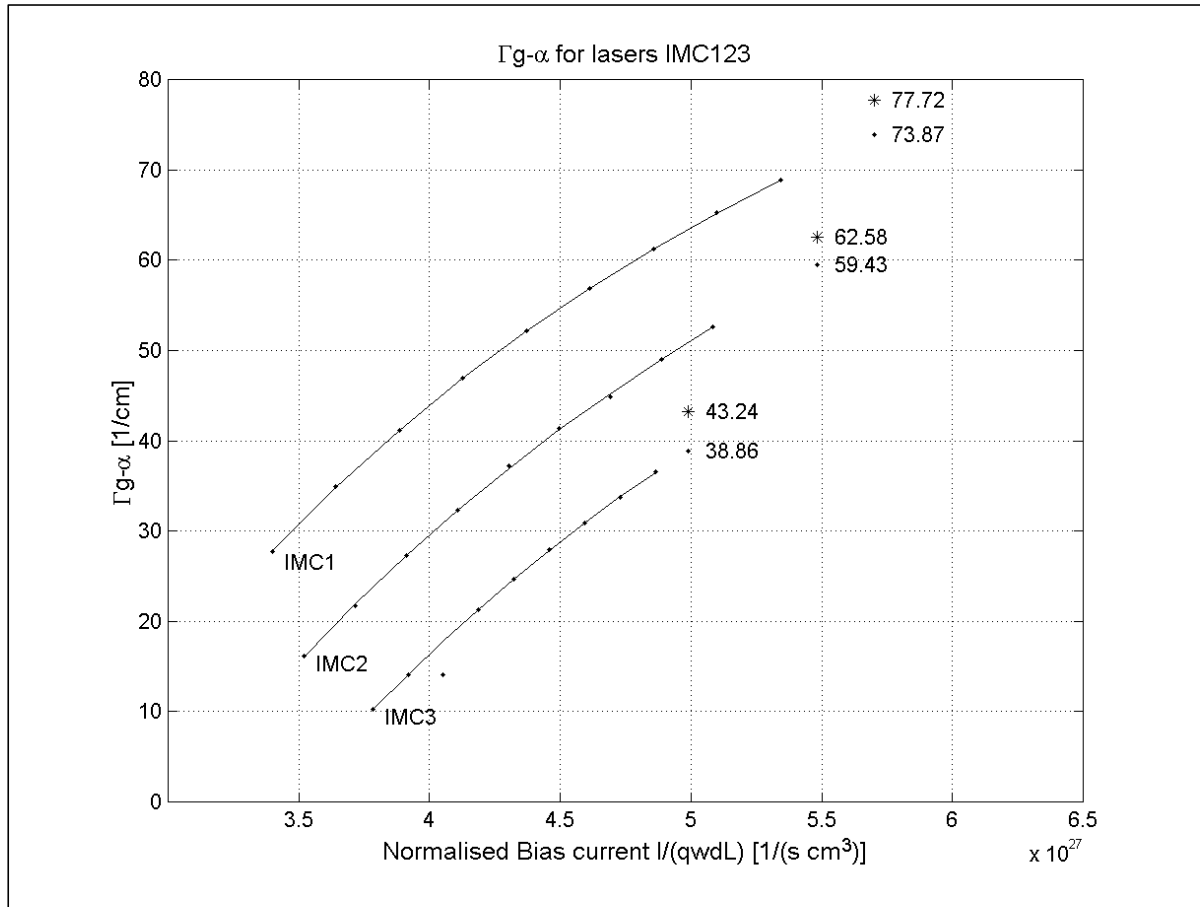


Figure 8-8: The maximum of the calculated modal optical gain for the three Fabry-Perot laser diodes plotted as a function of normalised bias current through the laser diodes.

Due to the fact that the results are based on measurements below threshold, it is possible to eliminate the explanation based on temperature effects. Although the temperature in the active region of the laser diode does not correspond with the temperature of the laser sub mount, the temperature variations needed to explain the difference are too large to be realistic. Furthermore the temperature of the sub mount was kept constant at 20°C during all measurements.

The possibility that incorrect values have been used for the reflection coefficients is also unrealistic. If only one reflection coefficient is modified to compensate the difference, it has to be set to a value of 0.8 in order to match the curves. If a different reflection coefficient is assumed for each laser diode, the values 0.2, 0.3 and 0.4 are needed to match the three curves. Both attempts to compensate the differences result in unrealistic values for non-coated facets. Especially since the laser diodes originated from the same region on the semiconductor wafer.

The measurement has been carried out with the usual care and has been cross-checked to eliminate errors due to incorrect settings. A far less obvious measurement error is the influence of the response of the optical spectrum analyser. This option has been examined in more detail from a theoretical point of view. The optical spectrum measured was convoluted with the response of the measurement instrument and the modal optical gain was calculated in

both cases. The response of the instrument was determined by measuring the “optical spectrum” of an external cavity laser (HP8168). Since the spectrum of such a laser is much smaller than the measuring capabilities of the optical spectrum analyser, it can be assumed that the spectrum measured corresponds with the response of the instrument. Besides convoluting, the Fourier transformation has been used to deconvolute the response from the spectrum measured. Both the convolution as well as the deconvolution showed that only the results for the longest laser diode (with the shortest distance between the modes) were influenced by the measurement instrument. The values determined for the modal optical gain changed by 0.2 cm^{-1} . In other terms, the possibility of a measurement error due to the limited measurement resolution of the optical spectrum analyser can be neglected.

The explanation based the current spread can also be eliminated. In that case it is expected that the effect gets worse for the longer laser diodes and increases at higher currents. The effect will appear as a larger optical loss, since the current spread results in a less efficient pumping of certain parts of the laser diode. In other terms, a smaller modal optical gain will be measured. Figure 8-8 does indicate that the longest laser diode has the smallest modal optical gain however the difference in optical gain does not increase with increasing current. Hence the option “current spread” can be eliminated.

Finally the possibility of non-uniform cavity dimensions can be eliminated due to two reasons. Firstly, the laser diodes came from the same neighbourhood of the semiconductor wafer. The second reason to eliminate non-uniform dimensions can be seen in Figure 8-9. There the peak wavelength is plotted versus the normalised bias current. The three curves for the three laser diodes are in the opposite order with respect to the three curves presented in Figure 8-8. Hence, all action taken to reduce the distances between the curves in Figure 8-8 (e.g. by modifying the width w), will increase the distance between the curves in Figure 8-9.

Since it is not possible to explain the differences between the results for the three laser diodes by means of the treated option and since the determination of the group index (Figure 8-6) indicates that the laser diodes are non-uniform, it can be concluded that the differences between the curves must originate from a more complex mechanism (e.g. a combination of non-uniform dimensions, material composition, quantum well thickness, etc.).

For clarity it has to be noted that due to this non-uniform behaviour the further extraction based on a combination of the three Fabry-Perot laser diodes is impossible.

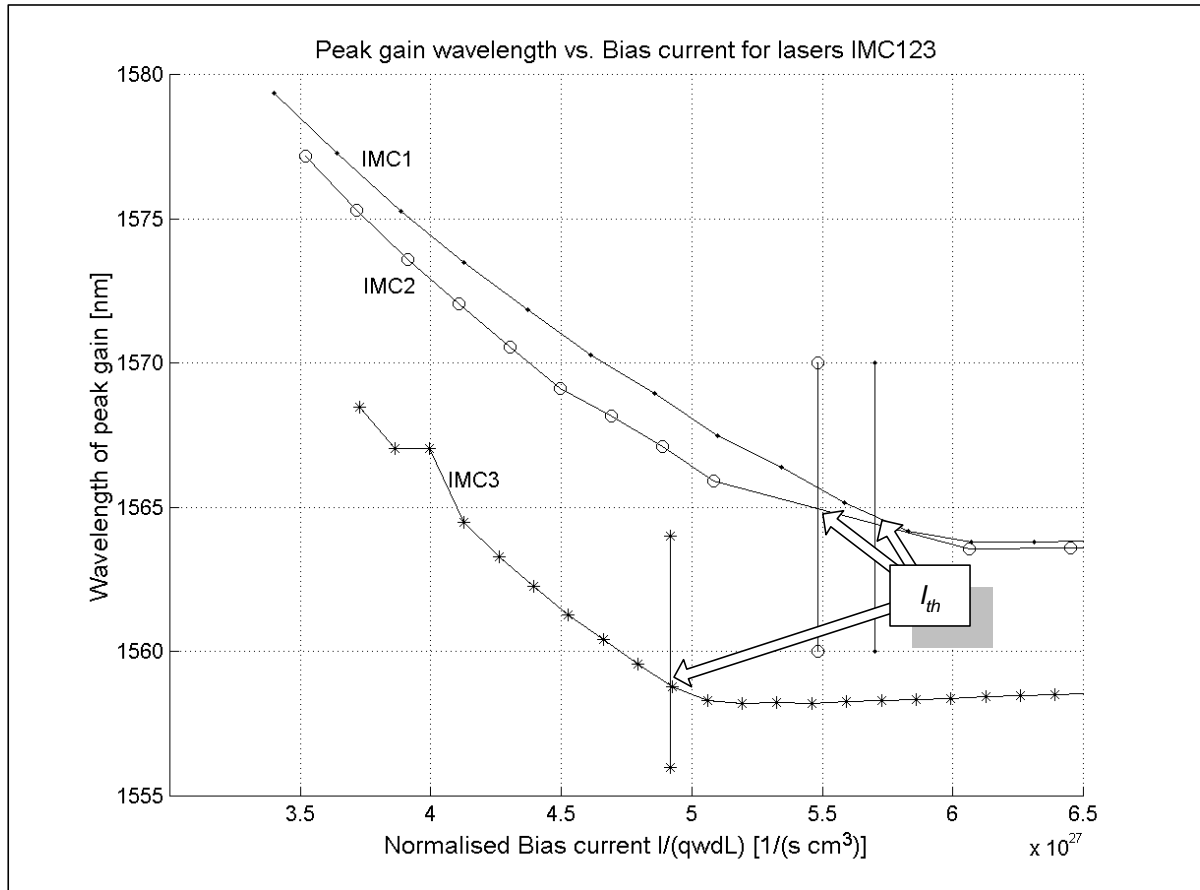


Figure 8-9: The wavelength at which the measured modal optical gain is maximum versus the normalised bias current. The vertical lines indicate the threshold current of the laser diode.

A final remark on the determination of the optical gain can be observed in Figure 8-10. It shows the peak wavelength at which the optical gain is at maximum plotted against that maximum value for the optical gain for the three Fabry-Perot laser diodes. Below threshold the maximal optical gain (horizontal axis) clearly increases. Once threshold is reached, the optical gain remains constant due to the clamping of the carrier density. Furthermore the figure shows that the peak wavelength decreases at first and once above threshold increases due to thermal effects. The same effect can be seen (although less clearly) in Figure 8-9, where the peak wavelength of the modal optical gain slightly increases for current values above threshold.

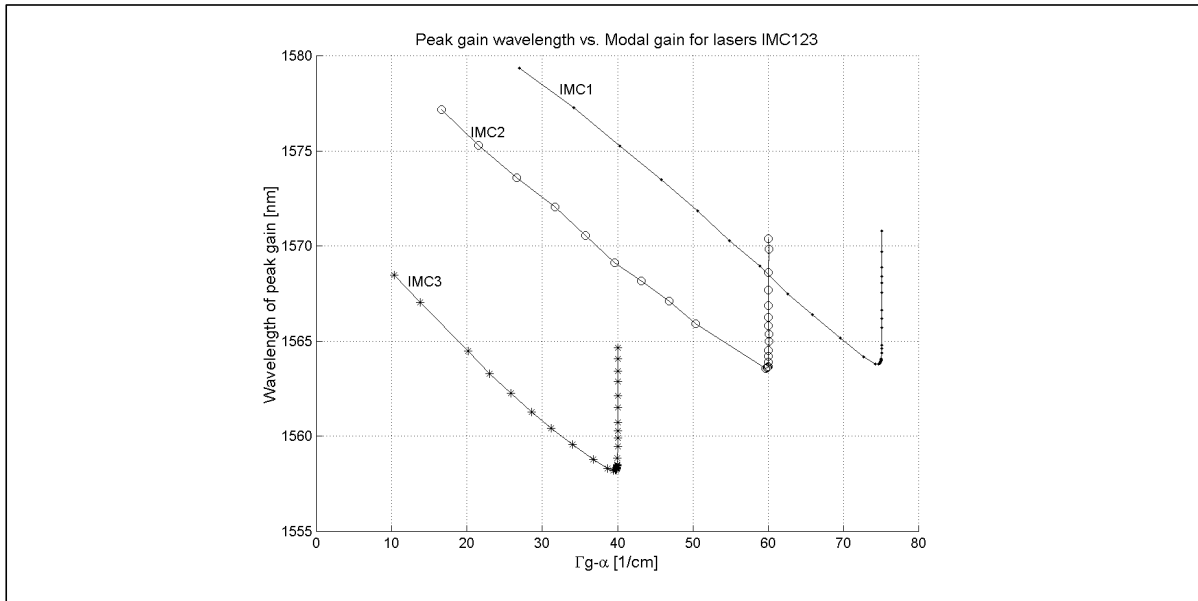


Figure 8-10: The peak wavelength of the modal optical gain plotted against the maximum value of that gain. Once the current is above threshold, the optical gain does no longer change and the peak wavelength increases due to thermal effects.

8.2.4.3 Parameters obtained from the relative intensity noise (RIN)

As described in Chapter 5, the relative intensity noise spectrum can be used to determine certain dynamic characteristics of a laser diode. This is done by measuring the spectrum, fitting the result to a model and perform further extraction based on the fitted parameters. The detailed results for each fit are not discussed within the scope of this thesis, but the further extraction is explained. The initial data (fitted parameters) for this extraction are shown in Figure 8-11.

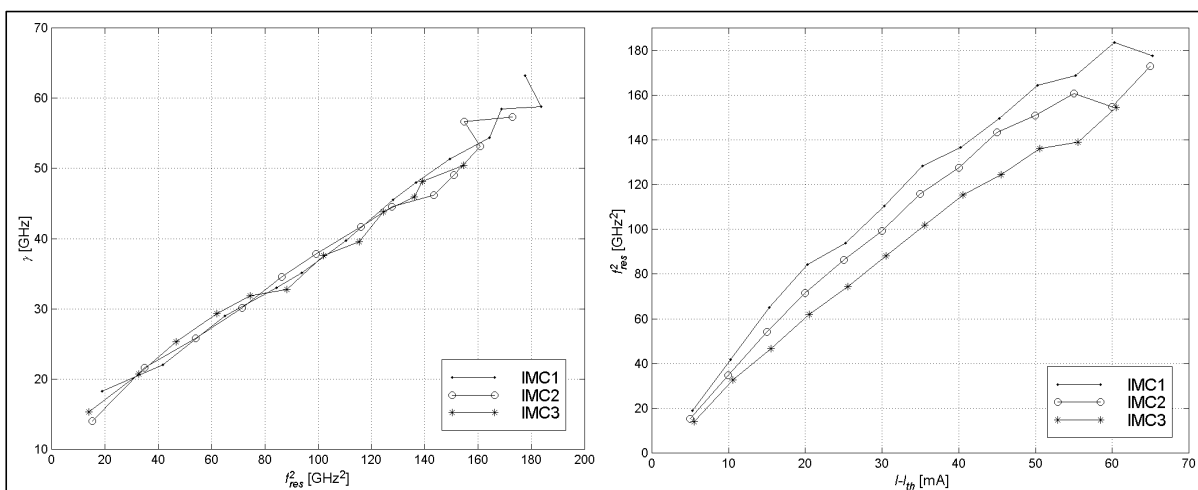


Figure 8-11: On the left hand side, the damping versus the square of the resonance frequency, on the right the square of the resonance frequency versus the bias current. These results for the three Fabry-Perot laser diodes were obtained by fitting the measurement to a numerical model for the relative intensity noise spectrum.

Starting from the determined resonance frequencies and the bias currents the “D-factor” can be calculated. This value can in turn be used to calculate the differential optical gain. As indicated in Chapter 5, a certain ambiguity exists in the determination of the “D-factor”, since the number of points used for the linear regression can be varied. Figure 8-12 shows, for the three Fabry-Perot laser diodes, how the differential gain changes as function of the number of points used to calculate the “best fitting line”. To keep the figure readable, a small offset has been introduced for the X-axis (respectively -0.2, 0 and 0.2 for the laser diodes IMC1, IMC2 and IMC3). Without the offset the calculated values and their error margins would coincide on the figure. Just as in the case of the group index, it is clearly visible that the third laser diode (IMC3) has another behaviour than the first two (IMC1 and IMC2). The error margins displayed in the figure were determined by means of the expressions given in Appendix C. Realistic values were used for the error margins of all parameters.

The values obtained correspond with the values available in the literature. Westbrook [8.1] mentions values of $2.7 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ up to $2.7 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$, Grabmaier mentions [8.2] a value of $3.2 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$. It should be noted that these values are given for a pure differential gain, in other terms, the values from Figure 8-12 are to be divided by the confinement factor ($G = 0.2$) before the comparing them with the references.

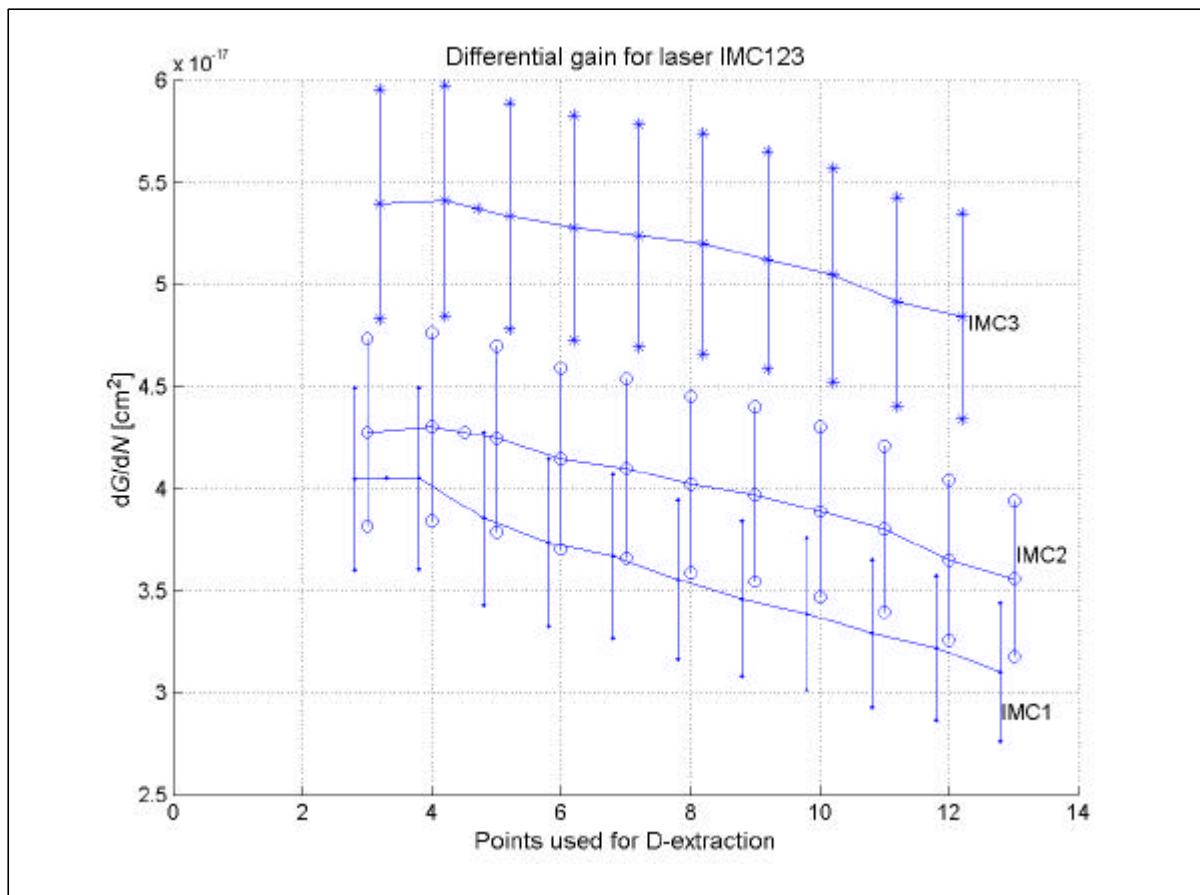


Figure 8-12: The calculated value (with error margin) of the differential optical gain as a function of the number of points used to determine the “D-factor”.

As explained in Chapter 5, it is possible specify the final “D-factor” as the value obtained when the best fitting line has an intercept zero. In the case of the three Fabry-Perot laser diodes, these values are respectively 3.5, 4.5 and 4.5, indicated in the figure as a

“measured” point without error margin. These values will be used as “D-factor” for the further calculations.

The non-linear gain (ϵ), is the second parameter that can be determined from the relative intensity noise. The value found for this parameter depends also on the number of points used to determine the “K-factor”. Since the formula for the non-linear gain contains the differential optical gain, the non-linear gain also depends on the “D-factor”. Figure 8-13 shows the results calculated for the three Fabry-Perot laser diodes. Again it is visible that the laser diodes IMC1 and IMC2 have a similar behaviour, where laser diode IMC3 clearly deviates. This is a confirmation of the non-uniformity theory to explain the differences in behaviour.

The peak that shows in the curve for laser diode IMC3, is due to the fact that the points used to determine the “K-factor” are not on a straight line, as is the case for the other laser diodes. On the left hand side of the Figure 8-11 it can be seen that the first five points are located on “another line” than the rest of the curve. Hence the different values for the “K-factor” calculations.

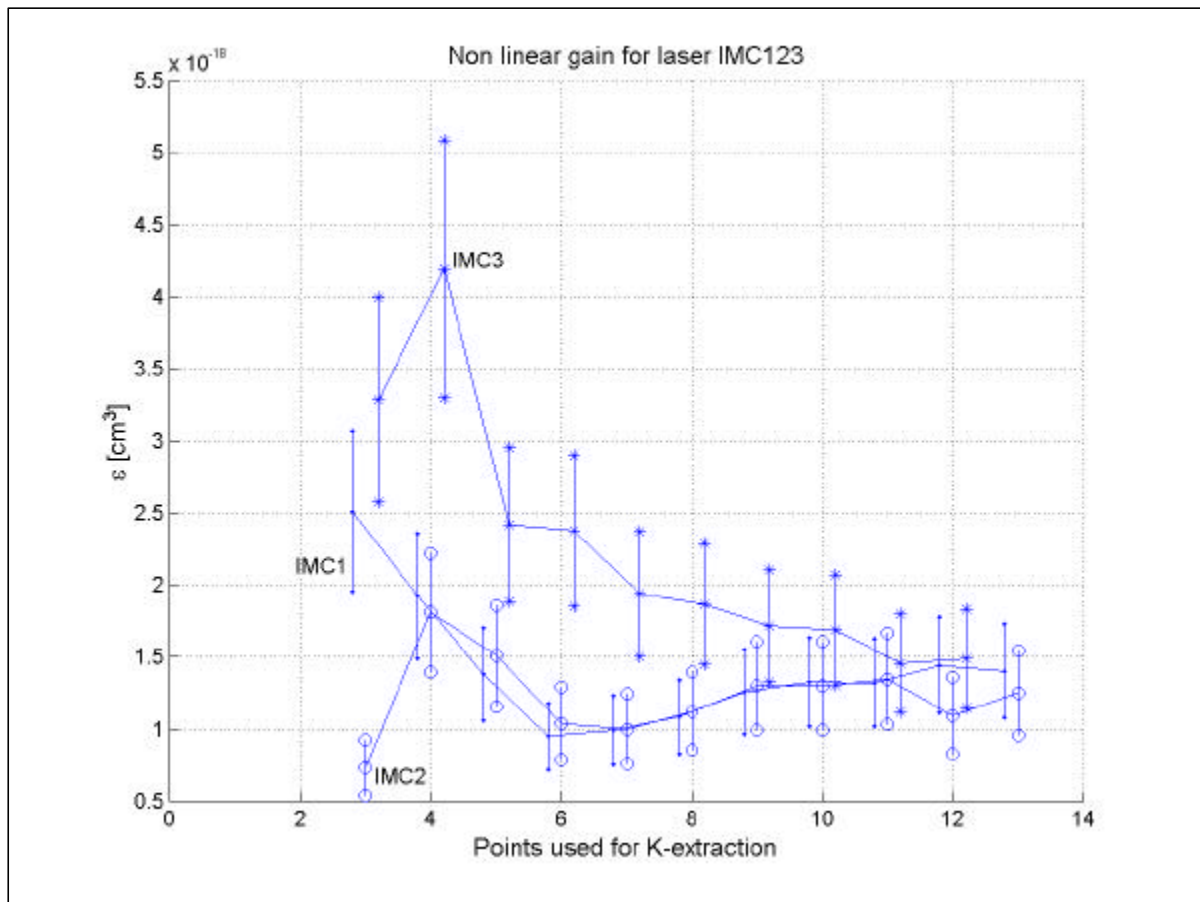


Figure 8-13: The value (with error margin) of the non-linear optical gain calculated as a function of the number of points used to determine the “K-factor”.

The third parameter that can be determined from the relative intensity noise is the maximal intrinsic bandwidth. Since this parameter is directly dependent on the value of the “K-factor”, it is difficult to calculate “the” maximal intrinsic bandwidth. A visual inspection of the graphs indicates that a “good value” is obtained when seven points are used. Table 8-3 gives this “good” value for the maximal intrinsic bandwidth, together with the minimum and

maximum values calculated. Furthermore the table contains the values obtained for the differential carrier lifetime (τ_d). From the table it is clear that the margin defined between the minimum and the maximum values is large. This spread in values is caused by the spread in the determined “K-factor” values. It is even larger in the case of the differential carrier lifetime (τ_d), due to the fact that the intercept obtained by linear regression is mathematically less well conditioned than the slope.

	$F_{\text{intrinsic,max}}$ [GHz]			τ_d [ns]		
	min	7 points	max	min	7 points	max
IMC1	25.6	59.2	61.1	-1.042	0.173	0.75
IMC2	37.3	59.6	74.3	0.134	0.221	0.825
IMC3	18.8	40.5	50.3	-4.642	0.238	0.401

Table 8-3: The values for the maximal intrinsic bandwidth and the differential carrier lifetime, given for the three Fabry-Perot laser diodes.

Table 8-4 gives an overview of the values for the differential optical gain and the non-linear optical gain. As mentioned, the value for the first parameter was determined by the zero intercept of the linear regression. Since the non-linear optical gain (e) depends on the value for the “K-factor”, the values in the table are based on the “seven-points-value” for the “K-factor”.

	$\left(\frac{g}{N}\right)$ [10^{-17} cm^2]			e [10^{-18} cm^3]		
	value	error	[%]	value	error	[%]
IMC1	4.05	0.65	15.9	0.99	0.23	23.9
IMC2	4.27	0.70	16.3	1.0	0.24	24.4
IMC3	5.37	1.2	21.4	1.9	0.43	22.4

Table 8-4: The value and error margin for the differential and the non-linear optical gain, given for the three Fabry-Perot laser diodes.

8.2.5 Discussion on the results for the Fabry-Perot laser diodes

Since all results indicate that the three Fabry-Perot laser diodes have a different behaviour, it is not possible to compare the results nor is it possible to perform a further extraction based on the combination of the results. However it is possible to validate the results for each Fabry-Perot laser diode. The differential optical gain (obtained from the relative intensity noise measurement) can be converted into modal optical gain variation (obtained from the Hakki-Paoli method), by means of the differential carrier lifetime (τ_d), the elementary charge unit (q) and the volume of the active layer (wdL) (cf. Chapter 5, Section 5.4.1). The results of this comparison for the three laser diodes is shown in Figure 8-14. The horizontal line represents the value obtained by the Hakki-Paoli method, the points with error margin indication were obtained through the extraction based on the relative intensity noise spectrum. The figure indicates that the results obtained by both methods match well.

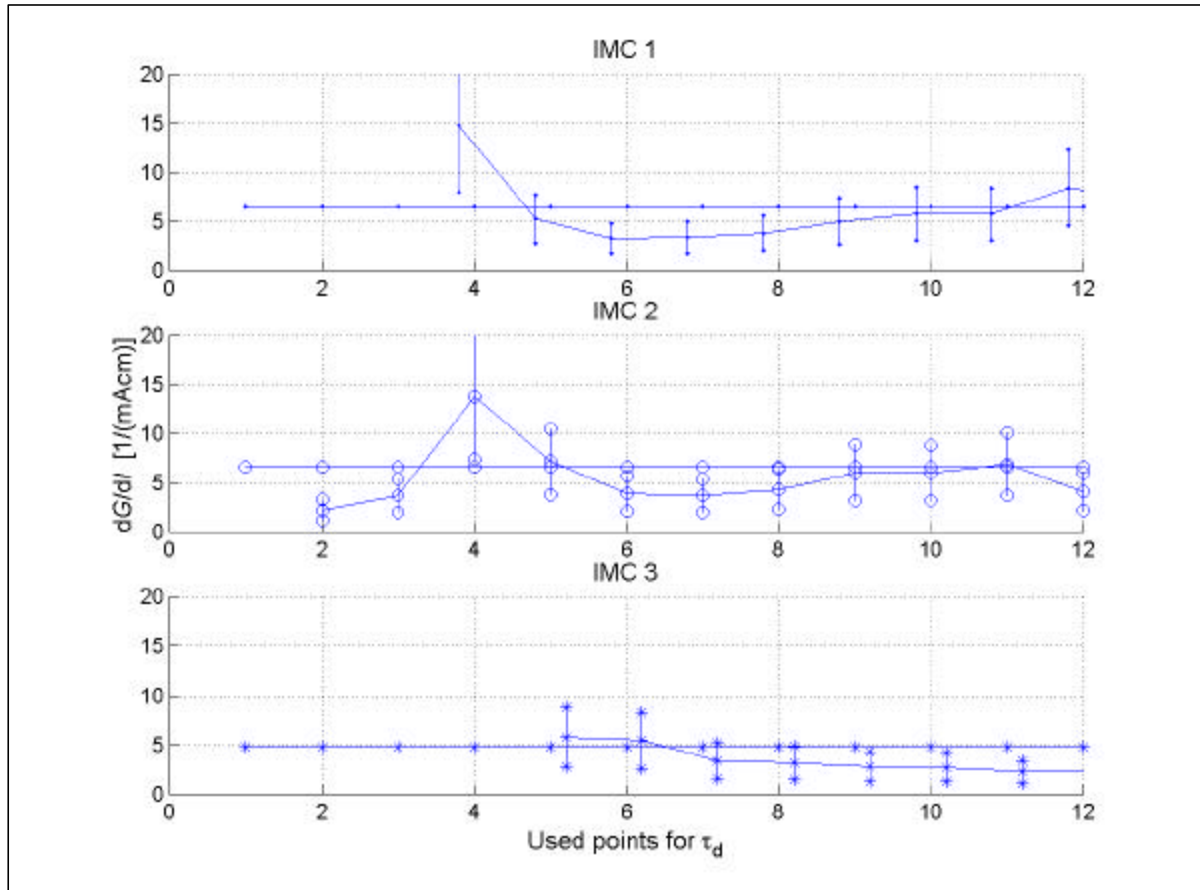


Figure 8-14: The comparison between the results obtained using the Hakki-Paoli method (horizontal line) and the results obtained through the parameter extraction on the RIN spectrum. The results for the three Fabry-Perot laser diodes are presented as a function of the number of points used to determine τ_d , the vertical lines indicate the error margin for the RIN-based points.

8.2.6 Results for the DFB laser diodes

As it was the case for the Fabry-Perot laser diodes, only the most important measurement results will be presented for the DFB laser diodes. In the case of the Fabry-Perot laser diodes, the emphasis has been put on the relative intensity noise based extraction. This choice was motivated by means of the possible validation through the Hakki-Paoli method. In the case of the DFB laser diodes, this validation is not possible since all DFB laser diodes available have at least one AR coated facet. Furthermore the results of the Fabry-Perot laser diodes clearly indicate that it is not possible to use results from one laser to another. In the scope of this work, the description of the results for the DFB laser diodes will be limited to the ASE based extraction for the double AR coated laser diodes (IMC7, IMC8, and IMC9). This extraction procedure was treated in Chapter 5.

Since the DFB laser diodes originated from the same semiconductor wafer as the Fabry-Perot laser diode, the assumptions made in Section 8.2.4 remain valid for the DFB laser diode parameter extraction.

8.2.6.1 Parameters determined from the power measurement

Table 8-5 gives an overview of the initial parameters calculated for both kinds of DFB laser diodes (AR/- and AR/AR). These parameters are: the threshold current (I_{th}), the external efficiency (h_{ext}), the external quantum efficiency ($h_{Q,ext}$), the series resistance (R_S) and the peak wavelength above threshold. The last column contains the characteristic temperature as extracted from measurements performed at different temperatures (18 up to 30°C). In the case of the series resistance two values are mentioned: the first value is the resistance in regime (currents larger than threshold), the second value is determined at threshold.

	Length [μm]	I_{th} [mA]	η_{ext} [mW/mA]	$\eta_{Q,ext}$ [%]	R_S [Ω]	λ_{peak} [nm]	T_0 [K]
IMC4	145	21.97	0.117	14.65	9.44/9.75	1550.9	42.2
IMC5	190	18.49	0.107	13.34	7.02/7.82	1551.2	48.8
IMC6	229	20.15	0.0699	8.73	5.84/7.00	1552.1	52.9
IMC7	170	30.51	0.0661	8.26	7.64/7.75	1550.0	31.6
IMC8	188	25.50	0.0983	12.29	7.04/7.50	1551.1	42.2
IMC9	230	28.00	0.0606	7.57	6.17/6.75	1551.4	42.8

Table 8-5: overview of the first measurement results for the six DFB laser diodes.

Figure 8-15 gives an example of a typical optical spectrum. The example was measured on the laser diode IMC6 for currents larger than threshold. The peak wavelength and the stopband due to the presence of the diffraction grating are clearly visible.

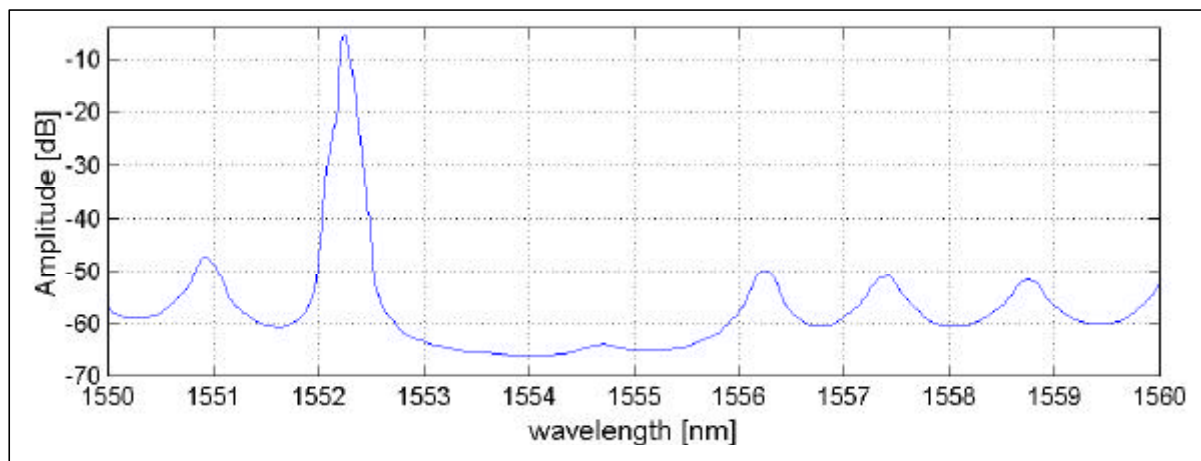


Figure 8-15: An example of a optical spectrum measured on a DFB laser diode. The figure shows the result for the laser diode IMC6 driven at a current of 50 mA.

It should be noted that the peak wavelength does not correspond with the wavelength where the modal optical gain is maximum. The combination of the filtering characteristic of the diffraction grating and the modal gain determines the lasing wavelength. In the case of these DFB laser diodes a technique called “detuning” was applied. This results in the fact that the lasing wavelength is smaller than the wavelength with maximal modal gain. The technique is used to realise a smaller linewidth enhancement factor, which in turn gives the laser diode better modulation properties, since AM and FM modulation are less coupled.

8.2.6.2 Parameters obtained by fitting the amplified spontaneous emission spectrum

The most important parameters that can be determined from the amplified spontaneous emission spectrum are the coupling coefficient, the optical gain, the effective index and the reflection coefficients of the facets. This section will present the results obtained for the DFB laser diodes with two AR coatings. For each laser diode an amplified spontaneous emission spectrum was measured in a number of bias points below threshold. To each of these spectra, the method described in Chapter 5 was applied, starting with the spectrum measured at the lowest bias current. The other spectra were fitted in order of incremental bias current and the results of one fit were used as starting conditions in the next fit. It should be noted that the final fit was performed for all parameters. In other terms, all parameter values could be varied in the last optimisation step. An example of a typical end result of this procedure is given in Figure 8-16

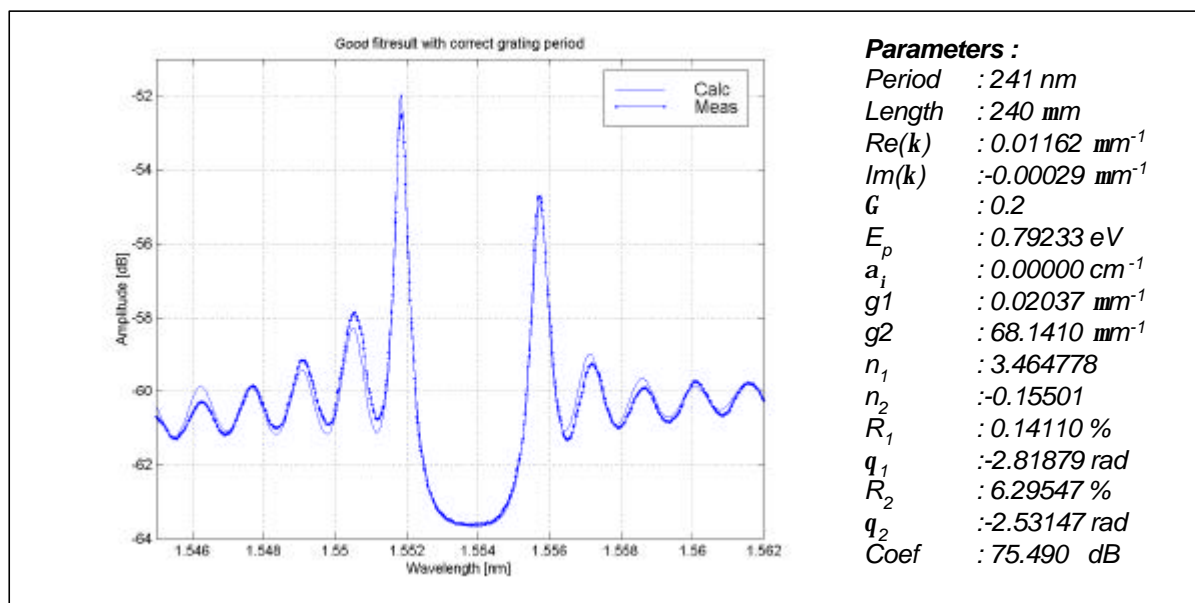


Figure 8-16: An example of a typical result obtained after optimising the parameters to fit an amplified spontaneous emission spectrum. The figure shows the result for the DFB laser diode IMC9 driven at a bias current of 23 mA.

The parameter of great importance for each DFB laser diode is the coupling coefficient. The obtained results for this parameter are shown in Figure 8-17. It should be clear that the values behave correctly: not only are the values current independent, they also match quite well for the three almost “identical” laser diodes. Although the laser diodes are designed to be purely index coupled, the extraction indicates that a small gain coupling coefficient (the curves at the bottom of the figure) is needed to obtain a sufficiently good fit. However, the small value of this parameter indicates that it most probably results from a parasitic effect.

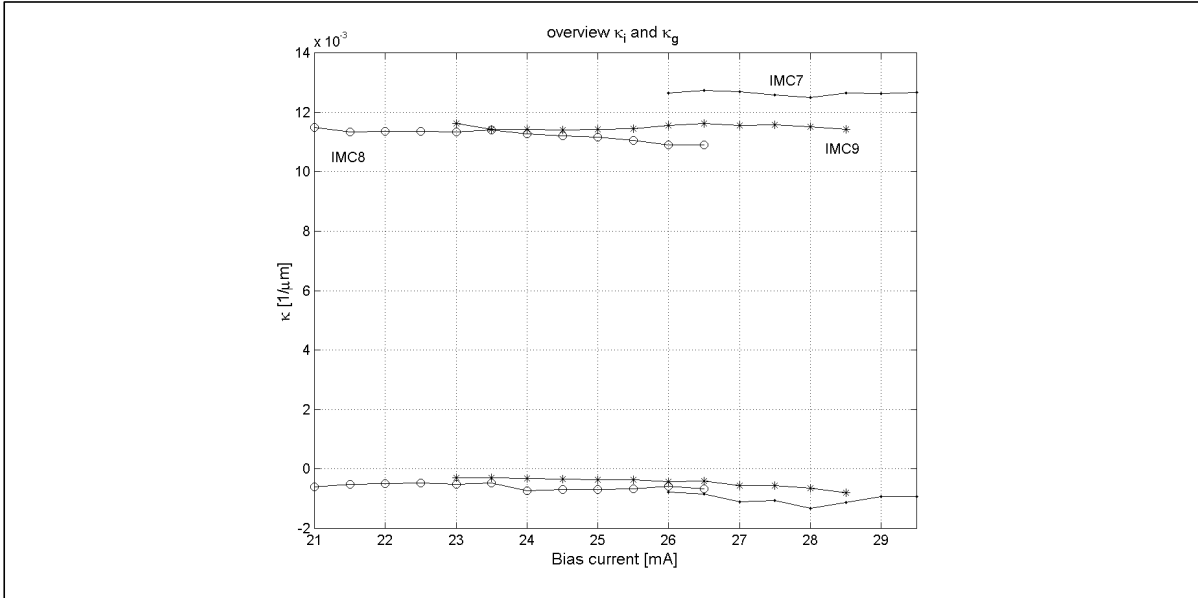


Figure 8-17: The figure shows the coupling coefficients obtained for three DFB laser diodes. Both the index coupling (upper curves) and the gain coupling (lower curves) are shown.

The second parameter is the reflection coefficient of the facets, which can only be determined by fitting the amplified spontaneous emission spectrum. Although the model uses the amplitude reflection coefficients, the power reflection coefficients are shown in Figure 8-18. The corresponding phases of the coefficients are shown in Figure 8-19.

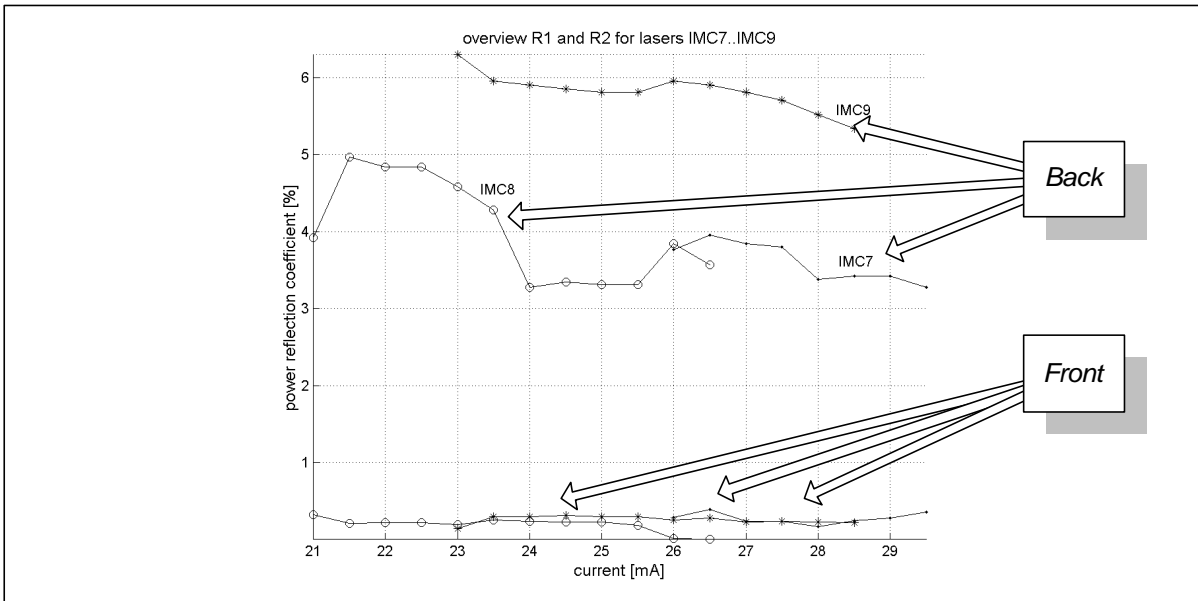


Figure 8-18: The obtained values for the power reflection coefficient [%] of the AR coated facets. The results for each facet of three DFB laser diodes are presented.

As in the case of the coupling coefficient, it is clear that the extracted values are current independent, as expected. The numerical values are sufficiently small to correspond with AR coated facets. The figure also indicates that the value found for the rear facet is less well determined than the value found for the front facet. This is logical since the reflection coefficient of the front facet has a greater importance to the spectrum measured at that same

front facet. If it had been possible to do a similar measurement and extraction at the rear side of the laser diode, the second reflection coefficient would be determined more accurately.

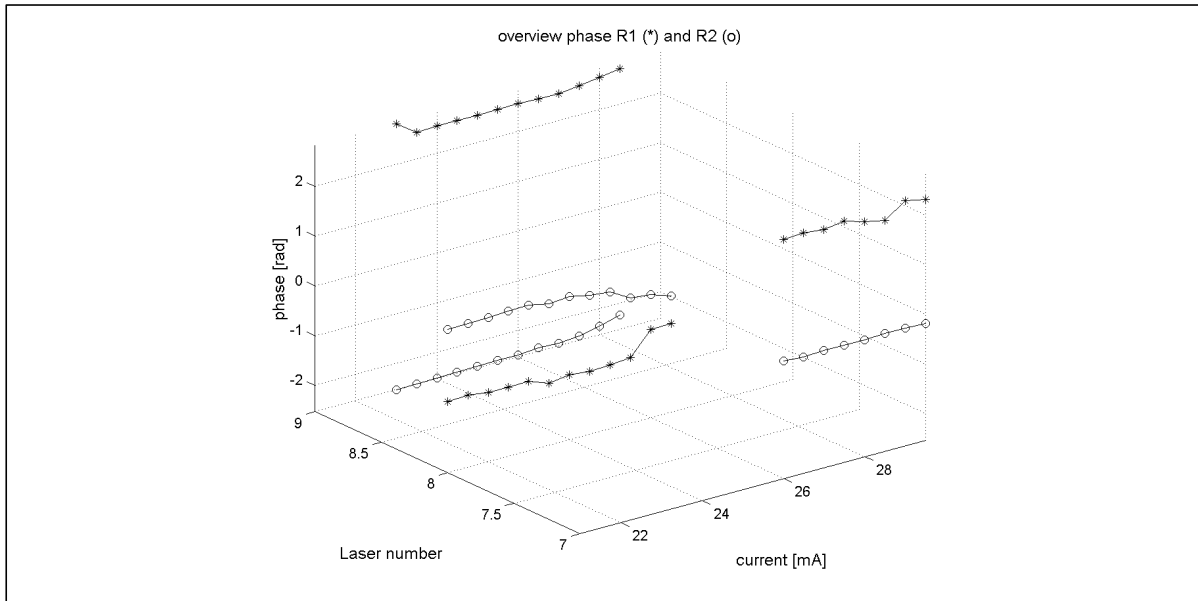


Figure 8-19: The corresponding phase of the reflection coefficients which are presented in Figure 8-18.

The last results presented in this section are the values obtained for the effective index and the modal optical gain. Figure 8-20 shows how these two parameters (calculated at the Bragg wavelength) vary as a function of the normalised current through the laser diode. It is to be expected that the curves coincide for the three laser diodes at a specific normalised current (in the absence of leakage currents). A difference of about 0.0005 in effective indices of laser diodes IMC8 and IMC9 can be observed around the value of $0.82 \cdot 10^{28} (\text{scm}^3)^{-1}$ for the normalised current. As mentioned earlier, the fitting process is not sensitive to the effective index but very sensitive to the combination of the effective index and the period of the diffraction grating. During the manufacturing of the laser diodes the diffraction grating was defined by means of an e-beam process. This guarantees that the period realised is identical for all laser diodes. Due to the presence of the semi-insulating regrowth, leakage currents can be neglected. Hence this difference should be interpreted as the accuracy of the parameter extraction process.

On the right hand side of Figure 8-20 the modal optical gain at the Bragg wavelength is shown as a function of the normalised current through the laser diode. Contrary to the results obtained for the Fabry-Perot laser diodes, the different curves do coincide.

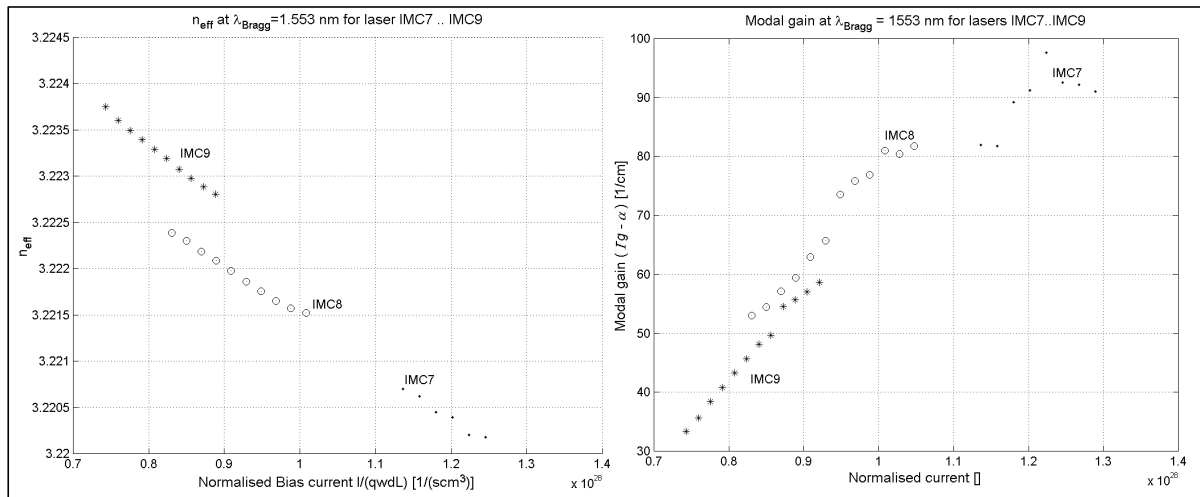


Figure 8-20: On the left, the effective index, on the right, the modal optical gain. Both were determined at the Bragg wavelength (1553 nm) and plotted as a function of the normalised current through the laser diode.

8.3 ASE based extraction for DBR laser diodes

8.3.1 Introduction

Parameter extraction based on the amplified spontaneous emission spectrum can also be applied to DBR laser diodes. Due to the presence of the multiple sections numerical model will contain more parameters. Furthermore, it is no longer possible to measure “the” ASE spectrum since it can vary as a function of the current through the phase and Bragg sections. The large number of parameters results in a more complex fitting process compared to the DFB laser diode situation. However since multiple ASE spectra can be measured and fitted, the results obtained for one laser diode can be more reliable.

This section will start with a description of the ASE model for a DBR laser diode and will discuss the results of fitting this model to measurement results. The laser diode used in this exercise [8.3] was made available by Philips Opto-electronic Centre in the framework of the European project UFOS (“User Friendly Optical Sources”).

8.3.2 The ASE model for a DBR laser diode

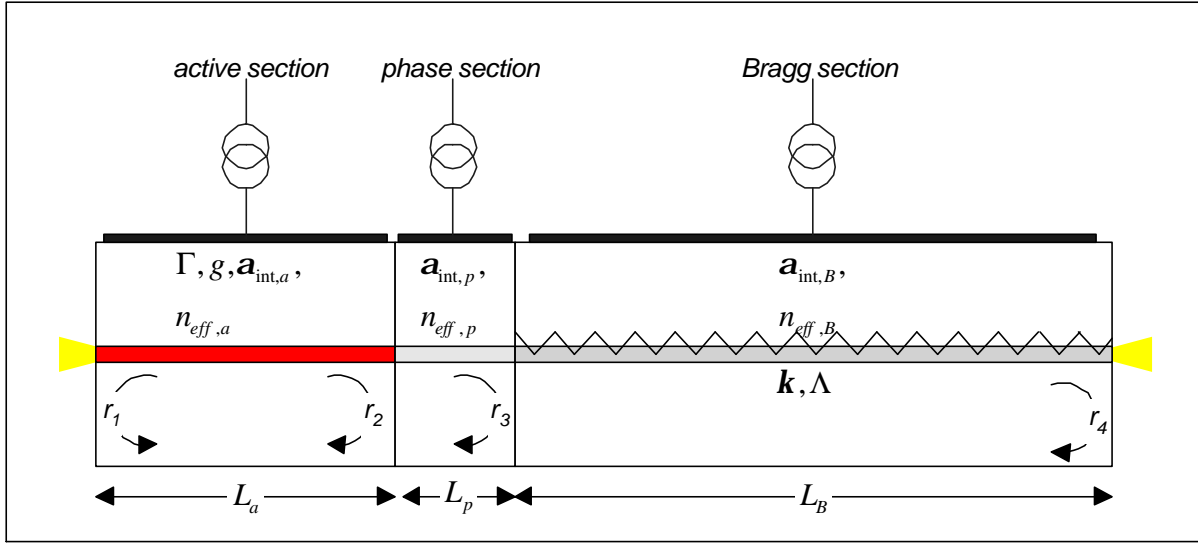


Figure 8-21: Schematic cross-section of a DBR laser diode with an indication of the parameters for the model.

In order to derive a model for the amplified spontaneous emission of a DBR laser diode, the spectral properties of the Bragg and phase sections are transformed into equivalent reflection coefficients by means of the coupled wave equations. This makes it possible to treat the DBR laser diode as a single section laser diode with a very special reflector on one side. At the end facet of Bragg section, the following relationship can be written using the coupled wave equations [8.4].

$$\begin{aligned} E^+(L) &= e^{-j\mathbf{b}_s L_B} \left\{ E^+(0) \left[\cosh(dL) - \frac{j\Delta\mathbf{b}}{d} \sinh(dL) \right] + E^-(0) \frac{\mathbf{k}}{d} \sinh(dL) \right\} \\ E^-(L) &= e^{j\mathbf{b}_s L_B} \left\{ E^+(0) \frac{\mathbf{k}}{d} \sinh(dL) + E^-(0) \left[\cosh(dL) + \frac{j\Delta\mathbf{b}}{d} \sinh(dL) \right] \right\} \end{aligned} \quad (8.33)$$

where

$$d = \sqrt{\mathbf{k}^2 - (\Delta\mathbf{b})^2} \quad (8.34)$$

and

$$\Delta\mathbf{b} = \left(\frac{2\mathbf{p}}{I} n_{\text{eff},B} - \frac{\mathbf{p}}{\Lambda_B} \right) - \frac{j\mathbf{a}_{i,B}}{2} \quad (8.35)$$

At the same time the relationship between both fields E^+ and E^- can be expressed at the same end facet. This relationship is given by the reflection coefficient at the end of that section: $E^-(L) = r_4 E^+(L)$. This can be entered in (8.33). Which in turn can be written as a new wavelength dependent reflection coefficient at the beginning of the section, given by (8.36).

$$r_B = \frac{E^-(0)}{E^+(0)} = \frac{r_4 e^{-2jb_g L} \left(\cosh(dL) - \frac{j\Delta b}{d} \sinh(dL) \right) - \frac{k}{d} \sinh(dL)}{\cosh(dL) + \frac{j\Delta b}{d} \sinh(dL) - \frac{k}{d} \sinh(dL) r_4 e^{-2jb_g L}} \quad (8.36)$$

The end result is a new section, which is a combination of the phase and the Bragg sections. The same method is used to reduce the influence of this new section to another reflection coefficient.

$$r_3' = r_3 + |t_3|^2 r_B = r_3 + \left(1 - |r_3|^2\right) r_B \quad (8.37)$$

The influence of the phase section is:

$$r_p' = r_3' e^{-j\frac{4p}{I} n_{eff,p} L_p - a_{i,p} L_p} \quad (8.38)$$

Hence:

$$\begin{aligned} r_2' &= r_2 + |t_2|^2 r_p' \\ &= r_2 + \left(1 - |r_2|^2\right) e^{-j\frac{4p}{I} n_{eff,p} L_p - a_{i,p} L_p} \left(r_3 + |t_3|^2 r_B \right) \end{aligned} \quad (8.39)$$

In other terms, the amplified spontaneous emission spectrum which emerges from the active section is given by:

$$P_{ASE}(I) = C \frac{\left(e^{(\Gamma g - a_{i,a}) L_a} - 1 \right) \left(1 - |r_2'|^2 e^{(\Gamma g - a_{i,a}) L_a} \right)}{\left(\Gamma g - a_{i,a} \right) \left| 1 - r_1 r_2' e^{-j\frac{4p}{I} n_{eff,a} L_a} e^{(\Gamma g - a_{i,a}) L_a} \right|} \quad (8.40)$$

Before the expression (8.40) can be used in any parameter extraction process, a model needs to be specified for the optical gain and the effective index for each section. The measurement is normally performed under static conditions and the laser diode is put on a thermally stabilised sub mount, thus dynamic and thermal aspects may be neglected. If it is further assumed that the values for the optical gain and the effective index are only determined by the current going through the section (and not by the leakage currents from the other sections) the expressions (5.8) and (5.9) can be written for respectively the optical gain and the effective index.

$$g_{sectie} = g_{0,sectie} + g_2 \left(E - E_{piek} \right)^2 \quad (8.41)$$

$$n_{eff,sectie} = n_{0,sectie} + n_{1,sectie} I \quad (8.42)$$

8.3.3 Evaluation of the model used

The model for the amplified spontaneous emission spectrum of a DBR laser diodes was developed from a physical point of view. Hence it is based on physical parameters. Not all of these parameters can be extracted since some always appear in combination with other parameters.

The expression (8.40) indicates that it will be impossible to independently determine the values of the optical gain, the confinement factor and the internal loss of the waveguide. Both the confinement factor and the internal loss can be interpreted as respectively a scaling factor and an offset with respect to the optical gain. Hence, only the optical gain coefficients (from expression (5.8)) will be varied during the parameter extraction process.

The expressions (8.35) and (8.38) indicate that the effective index is always used in combination with the internal loss of the waveguide, thus preventing an independent extraction. Furthermore, the expression (8.38) shows that in the case of the phase section, the length is added to that combination. So it will be impossible to extract the length of the section. However this is not a problem since the lengths of the sections can be measured by means of an optical microscope.

The expression (8.35) also indicates that the period of the diffraction grating can be compensated by the value for effective index (identical to the DFB case). Thus the determination of the grating period is an important factor in the accuracy of the other parameters extracted.

During the fabrication of a DBR laser diode, great care is taken to ensure that the reflections between the different sections are as small as possible. If this is not the case, the remnant reflections can cause the active section to function as a Fabry-Perot laser diode, thus destroying the DBR behaviour. In other terms, the parameter r_2 is small, which has implications for the parameter extraction. The expression for the model given by (8.40) can be reduced to expression (8.43) by means of the expression (8.39).

$$P_{ASE}(I) = C \frac{\left(e^{(\Gamma g - \mathbf{a}_{i,a})L_a} - 1 \right) \left(1 - |r_3 + |t_3|^2 r_B|^2 e^{-j\frac{4P}{I} n_{eff,p} L_p + (\Gamma g - \mathbf{a}_{i,a})L_a - \mathbf{a}_{i,p} L_p} \right)}{\left(\Gamma g - \mathbf{a}_{i,a} \right) \left| 1 - r_1 \left(r_3 + |t_3|^2 r_B \right) e^{-j\frac{4P}{I} (n_{eff,p} L_p + n_{eff,a} L_a) + (\Gamma g - \mathbf{a}_{i,a})L_a - \mathbf{a}_{i,p} L_p} \right|} \quad (8.43)$$

This clearly indicates the only the combination of the effective index of both the active and the phase sections (8.44) can be extracted.

$$n_{eff,a} L_a + n_{eff,p} L_p \quad (8.44)$$

Furthermore, the model is neither sensitive to the optical gain nor to the internal loss of the active section but only sensitive to the combination of both, as specified by (8.45).

$$\left(\Gamma g - \mathbf{a}_{i,a} \right) L_a - \mathbf{a}_{i,p} L_p \quad (8.45)$$

8.3.4 The fitting procedure

To extract the parameters, the optimising algorithm according to Powell [8.5] was used to fit the model to the spectrum measured. The cost function consisted of the sum of the squared errors and some a priori terms (cf. Chapter 2, Section 2.5.2) to keep the reflection coefficient within the physical limits.

It is impossible to fit all 21 parameters in one single step. First a number of start values need to be chosen (manual process) for the most important parameters (e.g. coupling

coefficient, optical gain and effective indices). By doing so, the second order aspects (e.g. dispersion of the effective indices) are neglected. These refinements to the model for the amplified spontaneous emission spectrum are added to the parameter extraction process in a later stage of the fitting procedure.

Once the start values are chosen, the maximum of the optical gain curve (E_p from the expression (5.8)) was fitted. Next, the full curves for the effective indices and the optical gain are fitted by using the optimisation algorithm. During this optimisation step the parameters from expressions (5.8) and (5.9) are varied. Eventually, a final optimisation step is executed during which all parameters from the model can be varied. Figure 8-22 shows the result of this parameter extraction procedure for a measurement taken at the bias currents of 22 mA, 0 mA and 0 mA for respectively the active, phase and Bragg sections.

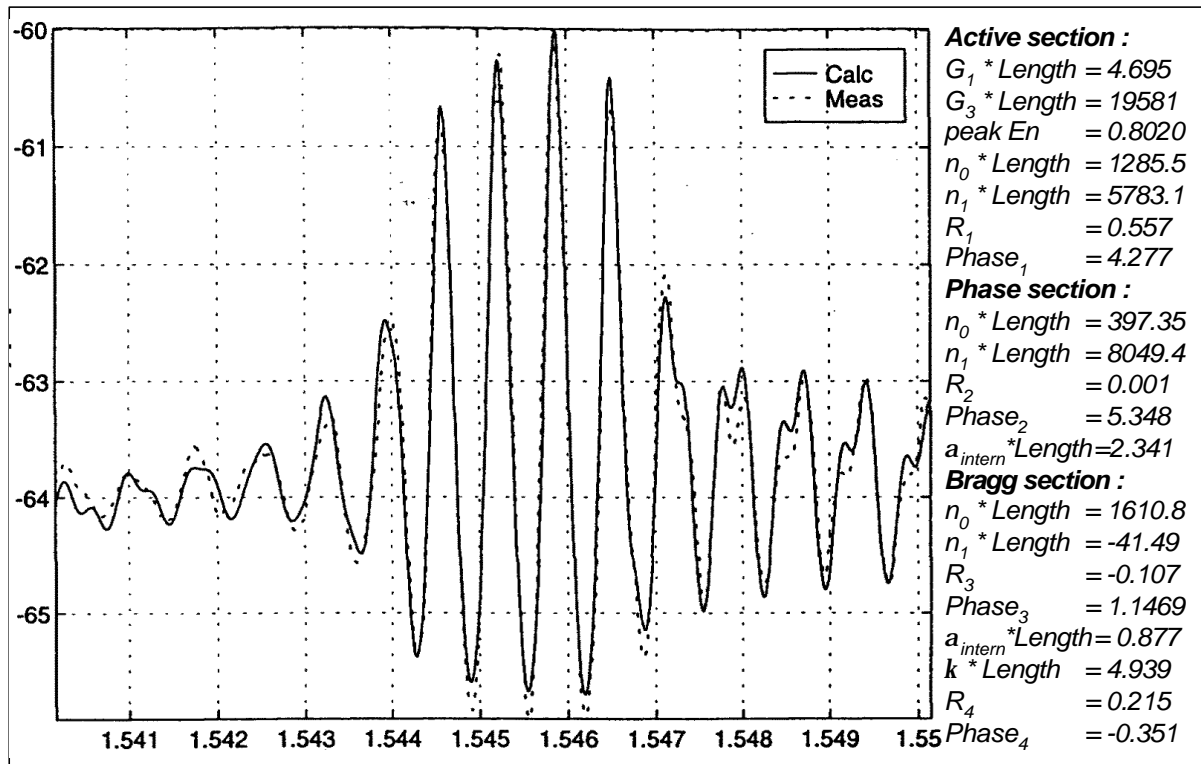


Figure 8-22: A typical example of a measured and a fitted amplified spontaneous emission spectrum of a DBR laser diode. On the left the intensity [dB] is plotted versus the wavelength [nm], on the right the corresponding parameter values for the model are given.

Since it is a DBR laser diode, there is the amplified spontaneous emission spectrum is not unique. The amplified spontaneous emission spectrum changes as a function of the bias currents for the phase and Bragg sections. So it is relevant to perform the parameter extraction on a number of amplified spontaneous emission spectra measured at different bias currents for the phase and Bragg sections.

Once a good fit is realised for one amplified spontaneous emission spectrum, the corresponding parameter set can be used as start values for the next fit, based on an amplified spontaneous emission spectrum measured under slightly different bias conditions for the phase and Bragg sections. This can be done since the small variation in the currents will result in a small change in the amplified spontaneous emission spectrum. This simple observation has

great consequences for the further parameter extraction. It can be fully automated and does no longer require manual intervention.

Furthermore, it is possible to adapt the first optimisation step with respect to the physical knowledge. In this first step, the new values are determined for the offset coefficient and the spectral parameters of the active section since they can change due to leakage currents. This approach assures that the calculated and measured spectrum have a sufficiently large overlap. In a second optimisation step, the parameters of the phase and Bragg section are determined, since these parameters should vary due to the different bias conditions for the corresponding sections. In a final step all parameters of the model are fitted to achieve a sufficiently accurate fit.

8.3.5 The results of the extraction for a DBR laser from Philips

Figure 8-22 shows the initial result, obtained for a amplified spontaneous emission spectrum measured under zero bias current conditions for the phase and Bragg sections. This solution was used as start condition for the other measured amplified spontaneous emission spectra for which the current in the phase section varied from 3 up to 30 mA and the current in the Bragg section varied from 3 up to 18 mA. Both currents were varied in steps of 3 mA.

Since the large number of parameters (21) in each measurement point, it is only possible to discuss the most important results. Therefore it has been chosen to only treat the varying parameters. These are the effective indices and internal losses for the phase and Bragg sections. The corresponding results are respectively shown in Figure 8-23, Figure 8-24 and Figure 8-25. From the figures it is clear that the parameters fitted show the correct tendencies, with respect to the varying bias current conditions. It should be noted that the internal loss of the phase section (left hand side of Figure 8-25) is rather large. This is probably due to the fact that the phase section is relatively short compared to the other sections of the DBR laser diode. Thus preventing an accurate fit of its parameters.

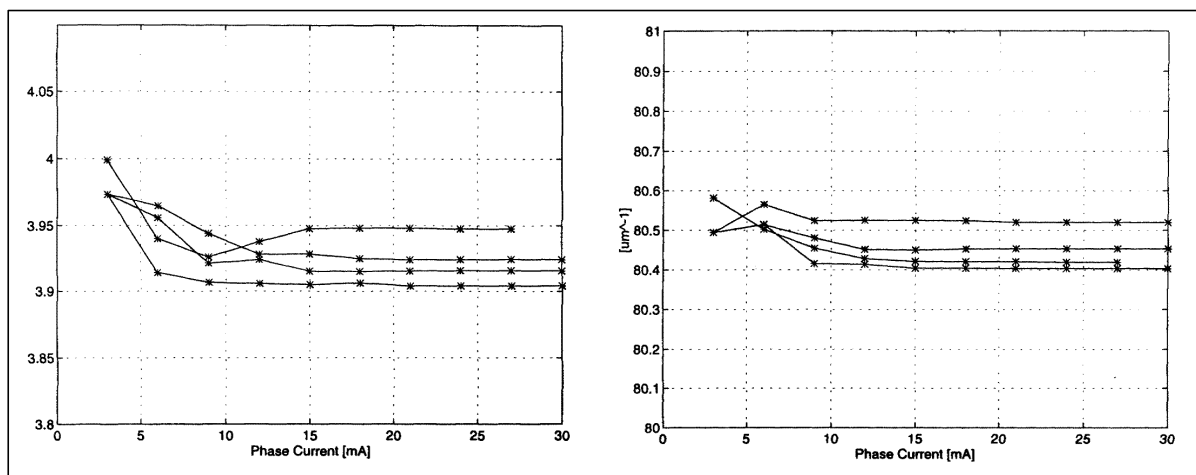


Figure 8-23: Coefficients n_0 and n_1 of the effective index of the phase section.

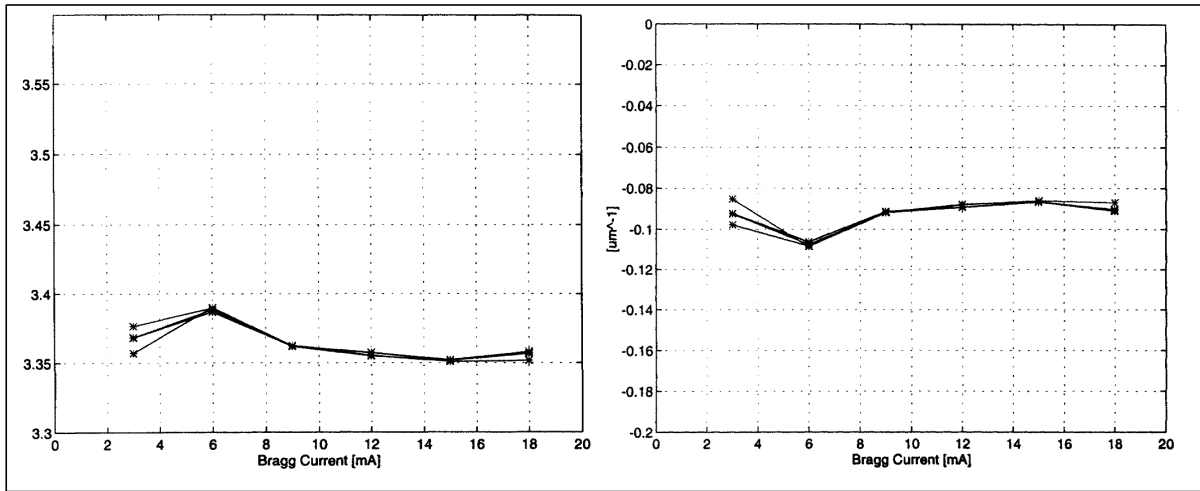


Figure 8-24: Coefficients n_0 and n_1 of the effective index of the Bragg section.

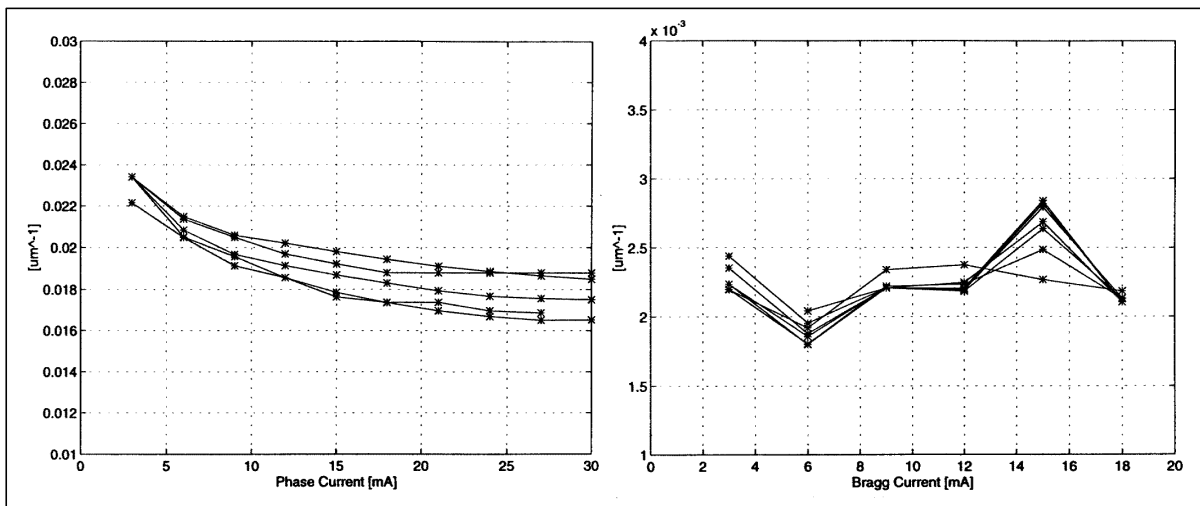


Figure 8-25: The internal losses of the phase and the Bragg sections, respectively on the left and right hand side of the figure.

The other parameters of the model should not vary since they are not influenced by the changing bias currents. However it is still useful to measure these parameters. If their fitted values remain constant, it adds to the credibility of the results obtained. As an example of such a parameter, the results for the reflection coefficient between the phase and Bragg sections is shown in Figure 8-26.

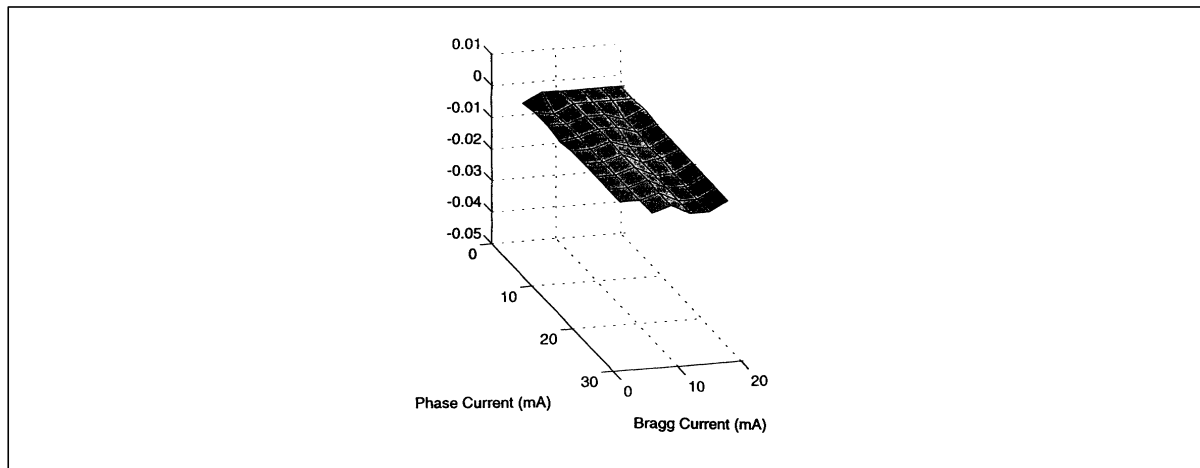


Figure 8-26: Reflection coefficient of the transitions from the phase section to the Bragg section as a function of the currents through both sections.

8.4 Conclusion

In this chapter the methods and applications developed within the scope of this thesis have been tested on real components. The parameter extraction based on the amplified spontaneous emission spectrum of a DBR laser diode has been treated and the results presented demonstrate that such a parameter extraction method can be used in practice.

The integrated tools have been used to characterise a set of laser diodes. During this characterisation, both the measurement tools and the parameter extraction procedures have demonstrated that the approach and tools developed during the course of this work perform up to expectation.

The most relevant results obtained for the set of DFB and Fabry-Perot laser diodes have been given in this chapter. The results demonstrate that it is possible to extract parameters and validate the results for the individual laser diodes. However, the results were not sufficiently uniform to apply further extraction based on the combined information of several laser diodes. The reason for this problem has been investigated thoroughly and it has been concluded that a non-uniformity of the active material of the laser diodes is the only valid explanation.

-
- [8.1] L. Westbrook, D. Cooper, P. Spurdens, 'Measurements of Linewidth enhancement, gain and spontaneous emission in InGaAs Quantum Well Lasers with InGaAsP barriers', Proc. of 11th IEEE Int'l Semiconductor Laser Conf., pp. 184-185, 1988, Boston, USA
 - [8.2] Grabmaier, Appl. Phys. Lett. 59, 1991, p. 3024
 - [8.3] A.Staring, J. Binsma, P.Kuidersma, E. Jansen, P.Thijs, D.van Dongen and G. Depovere, "Wavelength-independent output power from an injection-tunable DBR laser", Phot. Techn. Lett., Vol.6-2, pp. 147-149, 1994
 - [8.4] T. Makino, J. Glinski, "Transfer Matrix analysis of the amplified spontaneous emission of DFB semiconductor laser amplifiers", JQE, 24-8, 1988, pp. 1507-1518
 - [8.5] R. Fletcher, M.J.D. Powell, Computer Journal, Vol 6, pp. 163-168, 1963

CHAPTER 9

Conclusion and perspectives

9.1 Introduction

The constant element running through this thesis is the measurement of opto-electronic components and the determination of their parameters. Instead of “just” applying the existing measurement procedures to a number of devices, this work has focused on the measurement and parameter extraction process itself. The main goal has been to make this a more “pleasant” process for the researcher and at the same time to make the process more suitable for production environments by enabling automation. This thesis has approached the problem from three different angles: by studying advanced parameter extraction methods, by developing a measurement set-up for characterisation, and by developing a generic software approach to support the characterisation and parameter extraction.

9.2 Overview of the work accomplished

This work has investigated the procedures for advanced parameter extraction and more specifically, the methods based on the fitting of numerical models to measured characteristics. Chapter 5 describes how advanced parameter extraction can be realised for individual laser diodes. In addition it describes how the results obtained for different laser diodes can be used to obtain a better parameter set. The structured discussion provides a clear picture of the restrictions and the possibilities of the methods, including some options for making the methods more robust and thus enabling the utilisation of the methods in production environments.

Two advanced parameter extraction methods have been investigated in more detail: parameter extraction based on the amplified spontaneous emission spectrum and parameter extraction based on the relative intensity noise spectrum. Both methods were chosen because they are “relatively simple” to perform and they have a large information content. As already explained, the extraction based on the amplified spontaneous emission spectrum can be used to extract the internal parameters of the laser diode, (e.g. the coupling coefficient and the waveguide properties). The extraction based on the relative intensity noise can be used to obtain information on the dynamic behaviour of the laser diode, even though the measurement is performed under static conditions.

The proposed methods and parameter extraction procedures have been evaluated in the course of this work by applying the developed applications for a number of devices. In Chapter 8 the results of these procedures are given for a DBR laser diode and a well chosen set of Fabry-Perot and DFB laser diodes.

A powerful yet practical and multi-functional measurement set-up for characterisation has been designed and realised during the course of this work. This set-up enables the researcher to perform a large number of measurements and modify the specific measurement conditions without the need for any major modification of the hardware used in the set-up. Chapter 6 presents examples of results obtained using this set-up. Although the measurement set-up was designed for telecommunication devices, it could also be used to characterise laser diodes for optical recording systems (visible red light) and their reflection sensitivity.

To realise the software applications described in this thesis, the measurement and parameter extraction procedures were analysed in an abstract fashion (Chapters 2 and 3). This analysis made it possible to convert these specific procedures into generic software methods. In turn these methods enabled the realisation of a powerful yet multi-functional software framework. The analysis was done on four levels: the interaction between different applications, the interaction with measurement instruments, the parameter extraction and the re-usability of the applications in view of automation.

The problem of the application interaction was solved by developing a formal information structure. This structure offers a fixed frame for the interaction yet it leaves enough flexibility so as not to restrict the applications. The formal structure was named ODIF and was tested initially within the European project COST240. Practical experience proved that such a structured file format is more useful than most existing ad hoc solutions because the software interfaces can be implemented in a more general way.

The proposed method also makes it possible to use the same interaction mechanism to control an application remotely (e.g. over the Internet). Such a measurement was carried out in the course of this thesis. A laser diode located on the measurement set-up in Ghent was characterised by an application running on a computer in Brussels.

To enhance the interaction with the measurement equipment, an abstract communication principle was designed. This general approach is called “functional instrument driver”. The technique makes it possible to develop measurement applications which are not a priori dependent on the measurement equipment initially used. Hence, it is possible to replace measurement instruments without major software adaptations. Furthermore, this method enables less experienced users to write flexible software applications, without the need for any detailed software knowledge.

In the course of this work, such a functional instrument driver was realised for most of the commonly used opto-electronic measurement instruments. All these instrument drivers were tested by several users under different conditions.

To provide the researcher with a more “pleasant” and multi-functional environment for parameter extraction, the general parameter extraction procedure (model, cost function and optimisation algorithm) is analysed (using an object oriented approach) in an abstract fashion in Chapter 3. This analysis makes it possible to create a framework in which it is possible to implement laser models, cost functions and optimisation algorithms independently from each other. This enables the end user to add new models for parameter extraction without the need for any detailed software knowledge.

To realise this method such that it would be at the same time both powerful and simple, the choice was made in Chapter 7 to implement it by means of a symbiosis of two programming languages: a textual language (C++) and a graphical language (LabVIEWⁱ). This combination was also analysed and realised in an abstract style, thus enabling the end user to add new models by means of a standardised procedure without any requirements for detailed software expertise.

In view of the re-usability of the measurement applications, their implementation has been examined in a general fashion. In Chapter 7 this work identifies three basic applications and describes the specific advantages of the implementation techniques developed. The systematic approach enables the use of complex applications as a part of an even larger application (e.g. for further automation). This not only enhances the re-usability of the code developed, but it also provides the researcher with a multi-functional environment in which he can focus more on the results and spend less effort on trivial repetitive software tasks.

The different software aspects treated in this work have resulted in a number of specific measurement applications which have been distributed amongst several universities and companies in Europe, Canada and the U.S. under the general name “OLIMPEX”ⁱⁱ. The experience obtained with tools such as “OSAvieW”, “ESAvieW”, “ASEfit”, “LNWfit”, “FPgain”, “Tune4” and “TuneCo” has clearly demonstrated that the initial goals of this work can be realised by means of the methods presented in this thesis.

9.3 Final remarks

At the beginning of this thesis, the study of parameter extraction for opto-electronic components and the determination of the device parameters was defined as a goal. By investigating not only the methods but also studying the different implementation aspects, this thesis has contributed to the development of a new environment for measurement and parameter extraction techniques.

The software methods discussed in this thesis make it possible to generate measurement applications that are less dependent on the measurement instruments, and can act as plug-in components, can be controlled remotely and that are immune to the ever changing user requirements.

The parameter extraction framework and the ODIF information structure enable the future users to realise new applications with a minimum of effort, thus freeing up more time for the development of models, the interpretation of the results and the development of new parameter extraction methods.

The systematic approach made it possible to realise a set of integrated applications which realise far more than the original goals (measurement and parameter extraction). In addition to the set specific applications that are available under the name OLIMPEX, a number of other components and techniques have been developed. Due to their generic nature, these components and techniques can be applied outside the field of opto-electronics.

ⁱ LabVIEW is a product of National Instruments

ⁱⁱ OLIMPEX stands for: Opto-eLectronic Integrated Measurement and Parameter EXtraction

APPENDIX A

ODIF : Optical Data Interchange Format

Introduction

Chapter 3 has given a description of an information structure to store information on settings, measurement results, modelling results and parameter extraction results. The description in the chapter was limited to the highest hierarchical levels in order to illustrate the general ideas. This appendix treats the syntax in more detail, from a practical point of view. This appendix is treated as a stand alone document and has also been published as Appendix A of the COST240 bookⁱ.

After a brief introduction the structure of the format, its rules and the use of the different elements, are illustrated by means of specific examples (Section A.3). Section A.4 gives an complex though realistic example which is divided into its basic components. Section A.5 explains how an “information storage problem” can be converted into a file structure according to the ODIF structure. In Section A.5.5 the different steps taken are explained and illustrated with the specific rules used. The final section of the appendix gives a full syntax description of all levels.

Further information and software relating to the ODIF information structure can be found on the Internetⁱⁱ. The electronic information and software which was present on the Internet at the publication date of this thesis has been added in electronic form to Appendix D.

ⁱ G. Guekos (Editor), “How to model and measure photonic devices. Experiences from a European collaboration”, Springer Verlag GmbH (Berlin), 1998

ⁱⁱ Adres van de ODIF web site : <http://www.intec.rug.ac.be/Research/Groups/optoMC/odif/>

Appendix A : An Optical Data Interchange Format

A.1 Introduction

The problem of defining a data format appears each time when a model is implemented or when a measurement is automated. Both the input data and the results need to be stored on a computer disk and all persons or applications involved need to understand the content of the file.

Most applications have their own specific format, the numbers in a certain order, in the best case accompanied with some comments but mostly it is just a set of numbers without any reference to their meaning nor their units. When another application needs the results but wants them in a different order or unit, a conversion is needed.

When the data is to be exchanged with other parties these conversion difficulties cause the exchange format to be a paper copy, even when all parties involved have full access to electronic media.

This situation is far from optimal, since each conversion (either automatically or manual retyping) has a big error potential. Furthermore there is the loss of manpower due to the constant need for conversion (programs).

In order to prevent this proliferation of conversion applications, error potential and the manpower spent on deciphering large sets of numbers, a file format is needed which can cope with the complexity of the optical problems yet is not a limiting factor for the actual data storage. For this purpose ODIF, an Optical Data Interchange Format is proposed.

A.2 Terms and conditions of a common interchange format

The problem of data interchange actually breaks up in two parts : the first aspect is what you put in a file, the second aspect is how you put it in the file.

Deciding on what is in a file is specifying the content of that file, e.g. "L" stands for the laser cavity length. Since content is a highly problem-specific issue, it is almost impossible to cast content specification into a set of rigid yet non limiting rules.

Deciding on how to put the information in a file however can be treated in a generic way and thus it can be cast into strict rules, which are commonly known as a "syntax description". All programming languages have a strict syntax on how to write a program (i.e. which characters and in what order they can be in the file), yet it doesn't limit what the actual program achieves (i.e. the content or the performance of the algorithm the program describes). In the same way, a data file syntax description can be made such that it is a strict definition of how to write the file yet doesn't limit what can be stored in the file.

In order to successfully design this syntax, the boundary conditions and restrictions for the files must be outlined on a general level

The demands can be summarised as follow :

- *Flexibility* : the syntax must be designed such that all types of results (from modelling, measurements and parameter extraction) can be incorporated into the same file. This without increasing the overall complexity of the file or syntax.

- *Uniformity* : Since all types of results can be incorporated into one file, they should be treated in a similar way, in order to simplify the usage of the syntax and reduce the number of rules.
- *Platform compatibility* : The syntax must be designed such that every partner can generate and read files on the computer platform he normally uses (UNIX-Workstation, Mac, PC, ...).
- *E-mail compatibility* : Possibility to use modern media for transmission of data (e-mail) is essential to the long term success of such a syntax.
- *Readable by "normal" applications* : The user of the syntax must be able to read a file and manipulate its data without specialised applications or translators. Most of the "normal" programs on the different platforms (e.g. commercially available text editors, word processors, spreadsheets, ...) should be able to read the files and plot the data inside.
- *Not only results* : The origin of results in a file is often as relevant as the results themselves (e.g. the used model and its parameters, the measurement method and settings of the instruments, extraction tools and reference to original data, ...). In order to keep this information during data exchange, the best way is to enclose the information in the "result" file in a structured way.
- *Comments are useful* : As with programming languages, data files need comments added to the results (e.g. used methods, definitions, etc.). The syntax should also incorporate a standard way to include such comments, without damaging the integrity or readability of the data.
- *Simplicity first* : Although the syntax must be able to cope with highly complex data (e.g. a combination of several measurement, modelling and extraction results), it should still be able to store simple results (e.g. a one value measurement) with a minimal overhead.
- *Dynamic to the future* : The syntax must be designed such that it has no hard constraints to future needs, nor should it have hard constraints towards the complexity of the file contents.
- *No strict order* : When storing and recalling results, most errors occur when the numbers need to be in a strict order, referencing the results by a name is more natural and reduces the errors.

Each of these demands has implications on the definition of the syntax. Figure A.1 gives a summary of how the demands are linked to the most important restrictions of the syntax definition.

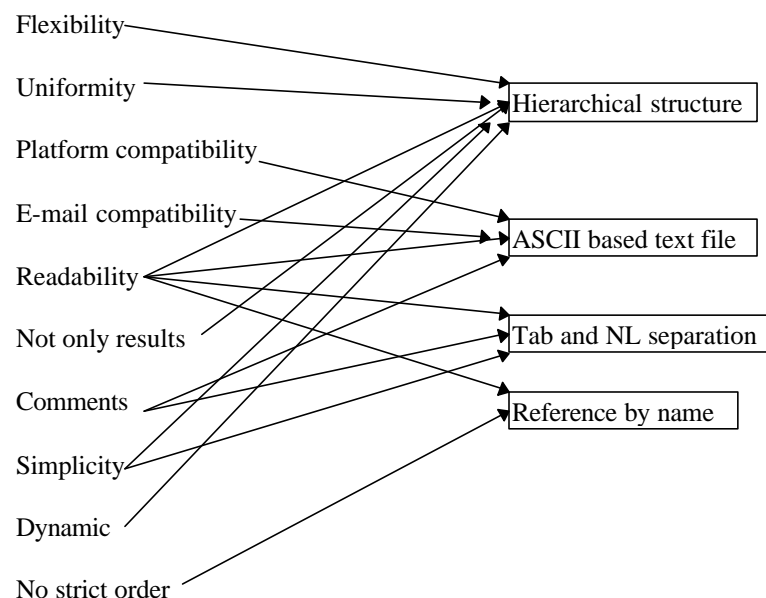


Figure A.1: Summary of the demands and restrictions of the syntax definition.

The ODIF syntax like most syntax definitions, will be a hierarchically structured file format stored in ASCII. It will allow to store and retrieve information based on a name rather than a position in the file. But contrary to most syntax definitions, it will have a strict limitation with respect to white spaces : since most spreadsheet applications use tab and new line characters as separators, ODIF will have to impose restrictions to enable the spreadsheet compatibility.

If the demands for readability (both software and human) would be given up, the strict limitations towards white spaces as well as the ASCII limit can be removed and a more compact, yet binary version of ODIF could be specified.

A.3 The syntax description

A.3.1 Introduction

Describing a syntax is not a trivial task and errors are very likely to occur due to misinterpretation of the standard. For this reason, a formal specification of the ODIF syntax has been written using the classical syntax notation according to N. Wirth, which is given in sections 6 and 7 of this appendix together with some explanation to the method of notation. This part will explain the syntax in less exact terms but will give a better understanding of the ideas and concepts behind the ODIF syntax.

A.3.2 Basic concepts of an ODIF file

An ODIF file is a hierarchical storage place for results of all kinds. In order to keep the different data in place, the ODIF file is divided into *blocks*. Each block has a specific task and can contain a number of other *blocks*, which also have a specific task (storage purpose) and will in turn contain either the data itself or a number of lower order *blocks*.

The *blocks* are indicated using keywords (typically starting with “@” and ending on “.begin” or “.end”) at the beginning and end of each section. Since name referencing is requested, each *block* can obtain a name to clarify its purpose and help accessing the right *block*.

At the lowest level, the data are stored in different lines (with name reference) or in a table if the data come in a matrix form.

A.3.3 The highest level

On the highest level is the *file block*, which can consist of a number of *global blocks*. Each *global block* is a container of results and all results stored in such a container are considered to be related. E.g. several measurements on a device can be stored within one *global block*, measurements on several devices would typically be stored in several *global blocks*.

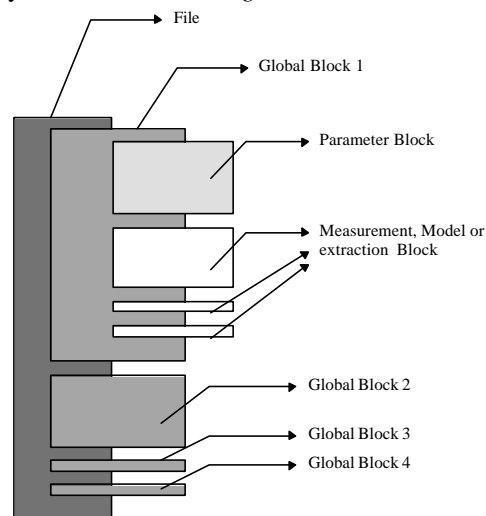


Figure A.2: The high level structure of an ODIF file

Since a *global block* is describing a device and measurement/modelling results it will contain a section (*block*) describing the parameters of that device : the *parameter block*. Following that section, multiple sections for results of measurements, modelling or extraction experiments are possible.

In Figure A.2, a schematic of the ODIF file on the highest level is shown. It should be noted that the figure shows a more complex example and that most ODIF files will consist of only one *global block* which contains a *parameter block* and one *measurement/model/extraction block*.

A.3.4 The parameter block

The *parameter block* is meant for storing information about the device parameters as the name indicates. Device parameters are typically “data” and will be stored directly in the *parameter block* which can not contain other blocks.

Data can take two forms : simple numbers (with indication of name and unit for each one) or more complex tables of numbers (with indication of name and unit for each column). Both can be stored in a parameter block, but only one at a time. When the need exists to combine both, two consecutive parameter blocks should be used. Some examples of valid and invalid *parameter blocks* are shown in Figures A.3 to A.5.

<pre>@parameter.begin <waveguide> L 300 um W 10 um @parameter.end</pre>	<pre>@parameter.begin <loss> wav int_loss nm cm^-1 1550 2 1551 2.1 1552 2 @parameter.end</pre>
---	---

Figure A.3: Two correct *parameter blocks*.

 <pre>@parameter.begin<waveguide&loss> L 300 um W 10 um wav int_loss nm cm^-1 1550 2 1551 2.1 1552 2 @parameter.end</pre> 	<pre>@parameter.begin <waveguide> L 300 um W 10 um @parameter.end @parameter.begin <loss> @data.begin loss<int_loss> wav int_loss nm cm^-1 1550 2 1551 2.1 1552 2 @data.end</pre>
--	--

Figure A.4: An incorrect *parameter block* containing both line and table information.

Figure A.5 : The correct version of Figure A.4, using two separate *parameter blocks*.

A.3.5 The measurement, model and extraction block

In an abstract approach, data originating from a measurement, data calculated by a model or data obtained by parameter extraction methods can be treated in a similar fashion. For this reason, the three blocks associated with these data have a similar internal structure and differ only by the keywords which indicate the kind of the data inside.

As all blocks, the measurement, model and extraction blocks have keywords which indicate the beginning and the end of the block. (respectively : “@measurement.begin”, “@model.begin”, “@extraction.begin” and “@measurement.end”, “@model.end”, “@extraction.end”). The blocks can again consist of a number of *setting blocks* and *data blocks*.

The purpose of the *setting block* is to store the information about how the data were obtained e.g. the settings of the measurement equipment (current sources, power meters, ...), the calculation parameters (step size, number of iterations, ...) or the method used for extraction (fitted using downhill simplex algorithms with minimax cost function, ...).

Following the *setting blocks*, the data itself can be stored in *data blocks*, which either can contain a number of single lines or a table with data. As it was the case with the *parameter block*, it is one or the other and no combinations (lines and data) are possible; if there is a need to store both, two *data blocks* should be used.

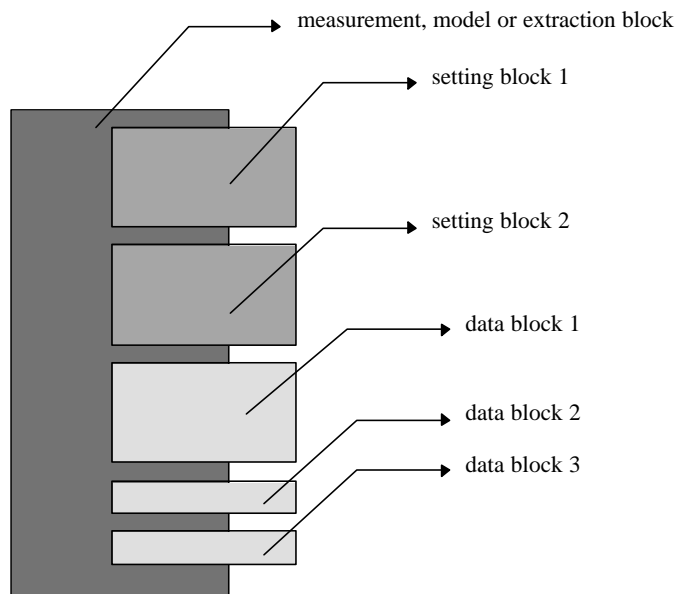


Figure A.6: Structure of a measurement, model or extraction block.

A.3.6 The setting block

The *setting block*, designed for storing the information which explains how the results are obtained, stores that information using lines. In general tables are never used to store “setting” information and therefore tables are not allowed in a *setting block*.

Information about instrument or software settings, is probably the least general information stored in a file, e.g. similar instruments (like optical spectrum analysers) still have a largely different set of control parameters. For this reason, the name reference of the *setting block* has been extended with an obligatory “labname”. This ensures that the interpretation of the numbers inside the *setting block* can always be related to the person, software or standard that defined the content of the block. The “labname” is written between square brackets (“[” and “]”) to distinguish it from regular reference names (denoted between “<” and “>”).

```
@setting.begin [OLIMPEX] <HP90751>
RBW      5      nm
SPAN     100    nm
@setting.end
```

Figure A.7: Example of a valid *setting block*.

A.3.7 The data block

The *data block* can be considered as the main part of an ODIF file; after all, the whole purpose is to store data in a file. As it was the case with parameters, data normally come in two ways : either single

numbers or a tabular format. Similar to the case of the *parameter block*, a *data block* can contain one or the other and if both are required two *data blocks* need to be used.

Since tabular data are mainly used for graphing purposes, the syntax states that tables have to consist of two lines (one for the name of the column and one with the unit) followed by numbers only. Although it is not possible to impose the “rectangular” restriction using the syntactical notation by N. Wirth, ODIF does impose the restriction that all tables need to be rectangular i.e. all rows must have the same number of columns. In case the numbers are not available for parts of the table (e.g. due to the impossibility of measuring linewidth below the threshold of a laser) the value “NaN” (“Not a Number”) should be used.

```
@DATA.BEGIN LI<laser_1>
I          Power
mA         mW
0.0        0.001
1.0        0.013
2.0        0.159
3.0        0.957
4.0        1.568
@DATA.END
```

```
@DATA.BEGIN LI<laser_1>
peak_wav  1550  nm
@DATA.END
```

Figure A.8: Two correct *data blocks*.

```
@DATA.BEGIN LI_WAV<laser_1>
peak_wav  1550  nm
I          Power
mA         mW
0.0        0.001
1.0        0.013
2.0        0.159
3.0        0.957
4.0        1.568
@DATA.END
```

Figure A.9: An incorrect *data block* containing both line and table information.

```
@DATA.BEGIN LI<laser_1>
I          Power
mA         mW
0.0        0.001
1.0        0.013
2.0        0.159
3.0        0.957
4.0        1.568
@DATA.END
@DATA.BEGIN WAV<laser_1>
peak_wav  1550  nm
@DATA.END
```

Figure A.10: The correct version of Figure A.9, using two separate *data blocks*.

```
@DATA.BEGIN LI_LNW<laser_1>
I          Power  LNw
mA         mW     MHz
0.0        0.001
1.0        0.013
2.0        0.159
3.0        0.957
4.0        1.568  5.6
5.0        2.315  4.4
6.0        3.687  2.3
7.0        5.012  1.7
@DATA.END
```

Figure A.11: An incorrect *data block*, the missing numbers where linewidth could not be measured create a

```
@DATA.BEGIN LI_LNW<laser_1>
I          Power  LNw
mA         mW     MHz
0.0        0.001  NaN
1.0        0.013  NaN
2.0        0.159  NaN
3.0        0.957  NaN
4.0        1.568  5.6
5.0        2.315  4.4
6.0        3.687  2.3
7.0        5.012  1.7
@DATA.END
```

Figure A.12: The correct version of Figure A.10, the non existing measurement results are indicated with the

non rectangular table.

value “NaN” which stands for “Not a Number”.

A.3.8 Rules for comments

Comments in ODIF files are quite similar to C++ style comments, both the “block style” comment (between “/*” and “*/”) as well as the “line style” comment (all text after “//”) exist. However they are not identical in usage : contrary to the C++ way where comments are disregarded and therefore can appear almost everywhere in the text, the comments in an ODIF file can only appear on very specific locations.

The formal syntax notation is very clear on these locations, but as a rule of thumb it can be stated that :

*“comments are allowed after every line of ODIF syntactical text, **except** in tables”*

The latter to ensure compatibility with spreadsheet applications.

A.3.9 Advanced aspects of ODIF syntax

As is the case with programming languages, there are extra features in ODIF besides the general structure. By providing features like inclusion and recursion, the ODIF syntax is more powerful and provides sufficient flexibility to the future.

Inclusion allows to use and reference files, without having to copy the contents each time. This example can be very useful for default settings or extractions based on many measurements. The rule for includes is the following :

“Each block on its own and only entire blocks can be included”

Recursion is provided on the block level : each block can contain an infinite number of the same kind. This is especially useful in the case of a *setting block*. When a program is using another to do the measurement, it “encapsulates” the latter. This property is duplicated in the setting block structure using recursion (cf. the example in section A.4).

A.4 Example of a realistic ODIF file

In this section a complete example of a realistic ODIF file is shown and analysed into its components. It should be noted that this example illustrates most facets of ODIF files, yet it can not be seen as a template showing how all ODIF files should look like. Information on how to adapt a specific file format problem to ODIF syntactical rules, is given in the next section (section A.5).

In order to make the example more comprehensive, Figure A.13 gives a schematic overview of the structure of the file and the positions of all the blocks used in the example.

The first part of the data, which describes the device that has been measured, is stored in the *parameter block*, inside the *global block*. Following the device specification, there is a *measurement block* with the actual measurement data, in turn followed by an *extraction block* which contains the results of the performed parameter extraction (loss calculation in this case). Inside the *measurement block*, there are a number of *setting blocks* followed by a *data block*. These are respectively describing the measurement conditions, the equipment and the actual results.

The *extraction block* contains a *setting block* describing the extra inputs needed to make the extraction possible, followed by a number of *data blocks* containing the results of the extraction.

In order to keep the example compact in this text, only a few data points are shown (the original file counts over 500 points).

```

@file.title : rib waveguide loss
@global.begin <Fpgain_OLIMPEX_Data_file>
  @parameter.begin
  @parameter.end
  @measurement.begin
    @setting.begin [OLIMPEX] <CONDITION_OPX>
    @setting.end
    @setting.begin [OLIMPEX] <Fpgain_P_Wav>
      @setting.begin [OLIMPEX] <HP8168>
      @setting.end
      @setting.end
      @setting.end
    @setting.end
    @data.begin OS <R43.2a>
    @data.end
  @measurement.end
  @Extraction.begin <Fpgain_Extr>
    @setting.begin [OLIMPEX] <Fpgain_Extr>
    @setting.end
    @data.begin CALC <Peaks>
    @data.end
    @data.begin CALC <Valleys>
    @data.end
    @data.begin CALC <Gain_Loss>
    @data.end
    @data.begin CALC <Average>
    @data.end
    @data.begin CALC <Group_Index>
    @data.end
  @Extraction.end
@global.end
@File.end

```

Figure A.13: Schematic overview of the file structure.


```

@File.Title : rib waveguide loss
// FPgain Olimpex Data File $Ver: 1.0
@Global.Begin <Fpgain_Olimpex_Data_File>
@Parameter.Begin <DEVICE_OPX>
    type                waveguide        -
    ID                  R34.2a           -
    L                   5.00000000E-1    mm
    R_left              3.20000000E+1    %
    R_right             3.20000000E+1    %
@Parameter.End
@Measurement.Begin
@Setting.Begin [OLIMPEX] <CONDITION_OPX>
    temp                25.00            deg C
    tunable_laser       HP8168           -
    power_meter         AQ2105_1A        -
    application         FPgain_P_Wav     -
@Setting.End //CONDITION_OPX
@Setting.Begin [OLIMPEX] <FPgain_P_Wav>
@Setting.Begin [OLIMPEX] <HP8168>
    Source              MEAS              WAV <FTLS>
    // FTLS             $Ver: 1.0
    Instrument          HP8168           -
    Name                none             -
    Power               2.000            mW
    Start_Wav          1550.000          nm
    Stop_Wav           1551.000          nm
    Wav_Inc             0.001            nm
@Setting.End
@Setting.Begin [OLIMPEX] <AQ2105_1A>
    Source              MEAS              OP <FOPM>
    // FOPM             $Ver: 1.0
    Power_Meter         1                 enum //AQ2105_1A
    power_units         1                 enum //mW
    Wavelength          1550              nm
    Light_Mode          0                 enum //CW
    Corr_Value          1.0000E+0         -
    Corr_Value_unit     1                 enum //---
    Average             1                 -
@Setting.End
@Setting.Begin [OLIMPEX] <Data_Specs>
    //                  $Ver: 1.0
    Operator            No_operator_selected -
    Labname             0                 enum //INTEC
    Number_Notation     1                 enum //Exponential
    Precision           8                 -
    Temp_Units          1                 enum //deg C
@Setting.End //Data_Specs
@Setting.End //FPgain_P_Wav
@Data.Begin OS <R34.2a>
    Wav                 P_out
    nm                  dBm
    1.54273900E+3      -7.41000000E+1
    1.54278000E+3      -7.33200000E+1
@Data.End //R34.2a
@Measurement.End

```


Figure A.14: First part of the ODIF example file.

```

@Extraction.Begin <FPgain_Extra>
@Setting.Begin [OLIMPEX] <FPgain_Extra>
    L                5.00000000E-1    mm
    R_left           3.20000000E+1    %
    R_right          3.20000000E+1    %
@Setting.End
@Data.Begin CALC <Peaks>
    Wav              P_peak
    nm               dBm
    1.54293852E+3    -6.88180255E+1
    1.54348402E+3    -6.91819083E+1
@Data.End
@Data.Begin CALC <Valleys>
    Wav              P_valley
    nm               dBm
    1.54325013E+3    -7.47994704E+1
    1.54379930E+3    -7.49567065E+1
@Data.End
@Data.Begin CALC <Gain_Loss>
    Wav              Gain
    nm               1/cm
    1.54309433E+3    6.95776054E-1
    1.54336707E+3    -4.70907270E-1
@Data.End
@Data.Begin CALC <Average>
    Avg_Gain         1.60992509E+0    1/cm
@Data.End
@Data.Begin CALC <Group_Index>
    Wav              Group_Index
    nm               -
    1.54321127E+3    4.36572404E+0
    1.54352471E+3    4.33829148E+0
@Data.End
@Extraction.End
@Global.End
@File.End

```

Figure A.15: Second part of the ODIF example file.

A.5 How to build ODIF files

A.5.1 Introduction

When applying the ODIF syntax to specific data storage problems, one should always keep in mind that ODIF is designed as a file interchange format with enormous flexibility and possibilities for implementing very complex structures. However, although it is possible to realise these complex structures, ODIF can still implement simple things without adding a large overhead. E.g. omitting the

information in the *setting blocks* and leaving out all reference to the origin of the numbers can provide a far less complex looking ODIF file which consists almost purely of data itself.

A.5.2 The minimal ODIF file for storing one number

In order to save one measurement result only, a measurement block is needed, containing a data block with one entry line. Putting this a measurement block into an ODIF file requires, a *global block* and a *file block*. So the resulting file should look like this

```
@File.Title : one measurement
@global.begin
@measurement.begin
@data.begin POWER<single>
power 10      mW
@data.end
@measurement.end
@global.end
@file.end
```

Figure A.16: Minimal ODIF file example.

A.5.3 The minimal ODIF file for storing one table of numbers

This is an identical problem as the one in the previous point, with as only difference the fact that the data block will now contain a table instead of an entry line. The file should look like this :

```
@File.Title : PI measurement
@global.begin
@meas.begin
@data.begin PI<sweep>
I          P
mA         mW
0          0
1          0.001
2          0.002
3          0.003
@data.end
@meas.end
@global.end
@file.end
```

Figure A.17: Minimal ODIF file example for a table.

A.5.4 Multiple results

Although ODIF can put multiple results of different nature (or even on different devices) into one file, it is not an obligation. The user can still create a new file for each measurement, modelling or extraction result that needs to be saved. It is up to the user of ODIF to decide how big the file may get.

A.5.5 The creative process of making an ODIF file

A.5.5.1 The problem

Suppose one wants to put the following into the ODIF format :

1. One file for each measurement (simplest case).
2. Each measurement has defined conditions
3. Each measurement consists of a number of results (e.g. power vs. wavelength).

A.5.5.2 Basic form of the ODIF file

Since the data come in a tabular form (power vs. wavelength) and it will be one measurement result only, a file containing a *measurement block* is needed. As explained in section 5.3, this implies that we need to add a *global block* and a *file title*.

The base of the file will be :

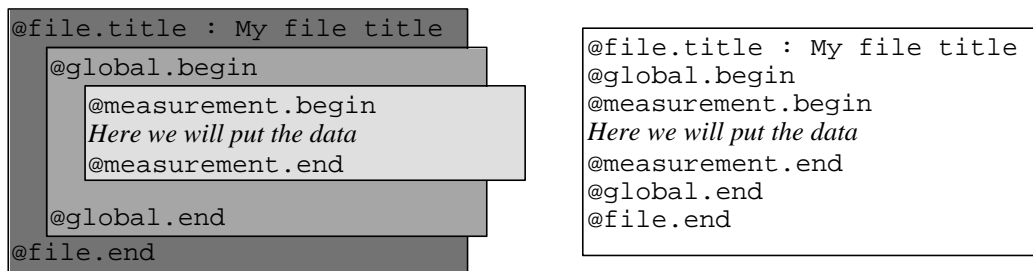


Figure A.18: Base structure and file contents of the ODIF file.

A.5.5.3 Dividing the information

When the base is laid out, one can start thinking about the nature of the actual information that needs to be stored in the ODIF file. In this case (as in most cases) this information can be split into two categories :

1. Settings or stuff you need to specify when you do the measurement
2. The actual measurement results, the table of power versus wavelength

This translates directly into ODIF syntax elements :

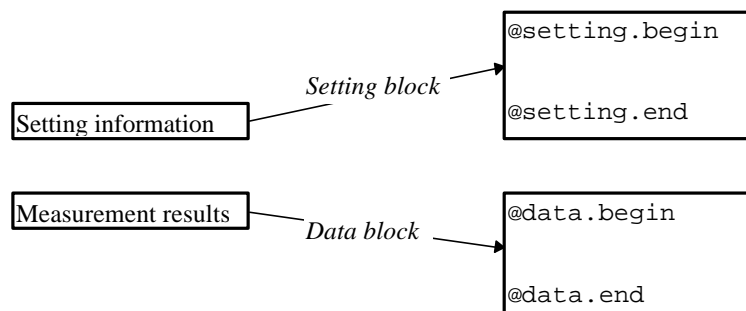


Figure A.19: Mapping information to syntax elements.

So the ODIF file looks now like this :

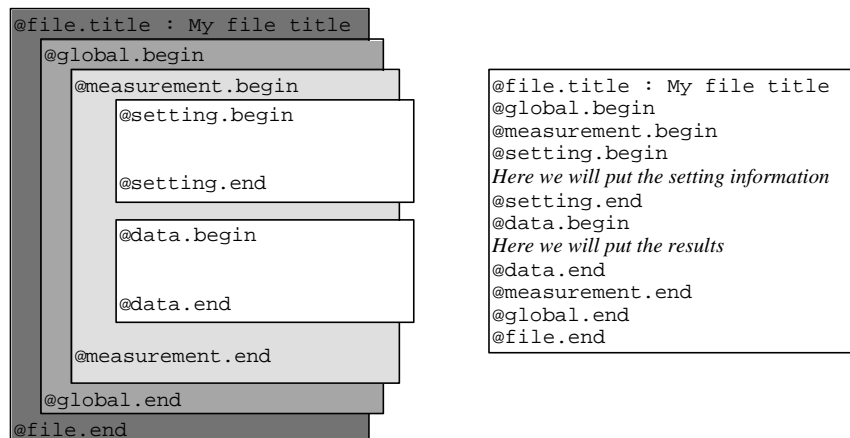


Figure A.20: Schematic and textual overview of a high level ODIF file.

A.5.5.4 The syntactical details of each block

Once the detailed structure of the ODIF file is available, one has to check the formal syntax in order to be able to write the correct strings into the file. In this example only the more complicated rules for the setting block and the data block will be treated in detail. The other blocks (measurement, global and file block) can be treated in the same fashion.

A.5.5.4.1 The setting block

The syntactical definition of a *setting block* is :

```

Setting_Block =   Setting_Begin LabName Reference_name NewLine
                  {Setting_Line | Source_Line | Comment}
                  Setting_End   ( Comment | NewLine )

```

These refer to the following syntax elements :

```

Setting_Begin   = "@" Setting_key "." Begin_key
Reference_name  = "<" Name ">"
LabName        = "[" Name "]"
Setting_End     = "@" Setting_key "." End_key

```

Which in turn refer to the following terminal symbols

```

Setting_key    = "Set" | "Setting"
Begin_key      = "B"   | "Begin"
End_key        = "E"   | "End"

```

The first line (opening line of the *setting block*) specifies that the corresponding line in the file should look like :

```
@set.begin [ XXXXXXX ] < YYYYYYYY >
```

where the "XXXXXX" stand for the name of your lab or the authority responsible for the content definition (e.g MyLab or OLIMPEX). "YYYYYYY" is the particular reference name of this setting block, i.e. the name on which one will be able to search for the data in the future.

Since reference names of institutions, measurement or equipment is part of the content of a file and not of a file format, they are not specified in the syntax. This is a similar situation with

programming languages : although the syntax of the C or PASCAL programming language is well defined, they do not specify which variable names should be used.

A.5.5.4.2 The data block

The syntactical definition of a *data block* is :

```
Data_Block      = Data_Begin Data_ID NewLine
                  { Comment }
                  ( Table | { Entry_Line } )
                  Data_End ( Comment | NewLine )
```

These refer to the following syntax elements [1] :

```
Data_ID          = Data_enum Reference_name
Reference_name = "<" Name ">"
Data_enum      = "PI" | "RIN" | "OS" | "LNW" | "PARAM" | "CALC".....
Data_Begin    = "@" Data_key "." Begin_key
Data_End      = "@" Data_key "." End_key
```

Which in turn refer to the following terminal symbols:

```
Data_key       = "Dat" | "Data"
Begin_key     = "B" | "Begin"
End_key       = "E" | "End"
```

The first line (opening line of the *data block*) specifies that the corresponding line in the file should look like :

```
@data.begin XXXXXX < YYYYYYYY >
```

where the "YYYYYYY" stands for the referencing name (E.g. "device1") as in the setting block case and the "XXXXXX" stands for the data enum. The latter is designed to be an identifier common to all similar data, a special name. Although ODIF does not provide a complete list of possible identifiers, it is recommended to use a limited list

A.5.5.4.3 The ODIF file with syntactical details

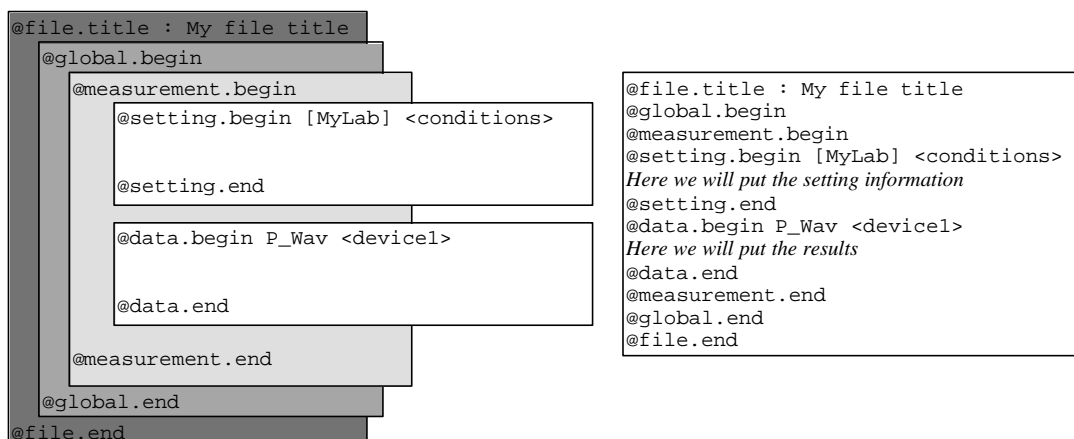


Figure A.21: Schematic and textual overview of a high level ODIF file with correct syntax.

A.5.5.5 Putting in the data : settings and results

According to the syntactical definition (cf. 5.5.4.2) settings can be written using multiple *setting lines* or *source lines*. The first to be used to store information, the latter to be used to store a reference to the origin of the data (in case this is wanted).

The syntax specifies [2]:

Setting_Line = Entry_Line | Hex_Block

Entry_Line =

Name <TAB> (Number | Plain_Text)<TAB> Unit ([<TAB> CommentLine] | NewLine)

Source_Line = Source_key <TAB> Source_type <TAB> Source_Names NewLine

Source_Names = Data_ID { <TAB> Data_ID }

Since the *Hex block* is meant for storing binary data and since our example is numbers only, we can focus on the *entry line* and disregard the *hex block* option as well as the *source line* (no reference needed). As previously indicated, the name itself is not specified by the syntax and should be chosen wisely. In our case we want to store the temperature and the resolution bandwidth of the measurement, so the two resulting lines could look like :

```
temp  20  degC
RBW   0.1 nm
```

Each item separated by tab-characters

As for the data which come in a tabular form the syntactical rule states [3-4]:

Table = Column_Name_Line

Column_Unit_Line

{Data_Point_Line }

Column_Name_Line = Name { <TAB> Name } <NL>

Column_Unit_Line = Unit { <TAB> Unit } <NL>

Data_Point_Line = Number { <TAB> Number } <NL>

This means that we have to specify a name and unit for each column. Since the measurement results are power versus wavelength, the names “Pwr” and “lambda” with respective units “mW” and “nm” can be a logical choice.

A.5.5.6 The ODIF file : end result

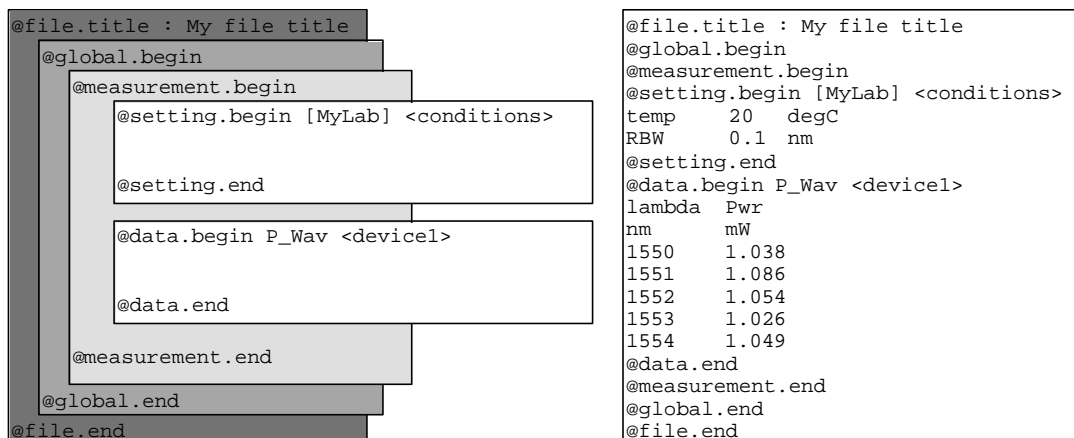


Figure A.22: Structure and contents of the complete ODIF file.

A.6 Introduction to syntax notation according to N. Wirth

The syntax is written down using a meta-language, which describes the total format from a top-down hierarchical approach. This notation method was first proposed by N. Wirth in 1977 [5] and treats syntax using a top down description. It first expresses the syntax in an abstract way using "non-terminals", i.e. words or symbols that will not appear as such in the file. These are then expanded in several levels, until the terminal level is reached, where the exact characters that appear in the file are specified.

In order to make a formal notation possible the following rules are used :

- Words written in bold are "non-terminal"-symbols (this means an abstract symbol).
- Tokens written between double quotes (e.g. "@Parameter") are "terminal symbols" : tokens that will appear literally (without adding any extra spaces) in the resulting file.
- If the syntax rule lets the user choose *exclusively* between two or more things, it will use the symbol : "|". E.g. the rule specifying : "a" | "b" | "c", indicates that a file containing "a" is correct according to the syntax, a file containing "b" also, but a file containing "ab" is not allowed.
- The square brackets "[" and "]" are used to denote the optional presence of something. e.g. ["a"] means that "" (empty string) and "a" are valid, but a repetition "aa" is not.
- The curly brackets "{" and "}" are used to denote infinite repetition (i.e. zero, one, two or more times). E.g. the rule specifying : {a}, means that files containing : "", "a", "aa", "aaa", "aaaa", etc. are correct.

A.7 The complete syntax description

```
File = File_Begin ":" Text NewLine
      {Global_Set}
      File_End
```

```
Global_Set = Global_Block | Global_Include | Comment
Parameter_Set = Parameter_Block | Parameter_Include | Comment
Model_Set = Model_Block | Model_Include | Comment
Measurement_Set = Measurement_Block | Measurement_Include | Comment
Extraction_Set = Extraction_Block | Extraction_Include | Comment
Setting_Set = Setting_Block | Setting_Include | Comment
Data_Set = Data_Block | Data_Include | Comment
```

```
Global_Block = Global_Begin [ Reference_name ] NewLine
               {Parameter_Set}
               {Model_Set | Measurement_Set | Extraction_Set}
               {Global_Set}
               Global_End ( Comment | NewLine )
```

```
Parameter_Block = Parameter_Begin [ Reference_name ] NewLine
                  ( {Setting_Line | Source_Line } | Data_Set )
                  {Parameter_Set}
                  Parameter_End ( Comment | NewLine )
```

```
Model_Block = Model_Begin [ Reference_name ] NewLine
               {Setting_Set}
               Data_Set
               {Model_Set}
               Model_End ( Comment | NewLine )
```

```

Measurement_Block= Measurement_Begin [ Reference_name ] NewLine
                    { Setting_Set }
                    { Data_Set }
                    { Measurement_Set }
                    Measurement_End ( Comment | NewLine )

Extraction_Block = Extraction_Begin [ Reference_name ] NewLine
                    { Setting_Set }
                    { Data_Set }
                    { Extraction_Set }
                    Extraction_End ( Comment | NewLine )

Data_Block =       Data_Begin Data_ID NewLine
                    { Comment }
                    ( Table | { Entry_Line } )
                    Data_End ( Comment | NewLine )

Setting_Block =    Setting_Begin LabName Reference_name NewLine
                    { Setting_Line | Source_Line | Comment }
                    Setting_End ( Comment | NewLine )

Data_ID = Data_enum Reference_name

Reference_name = "<" Name ">"

LabName = "[" Name "]"

Source_Line = Source_key <TAB> Source_type <TAB> Source_Names NewLine

Source_Names = Data_ID { <TAB> Data_ID }

Setting_Line = Entry_Line | Hex_Block
Hex_Block = ":" Hex_digit { Hex_digit } ";" <NL>          ([6])
Entry_Line =
    Name <TAB> ( Number | Plain_Text ) <TAB> Unit ([ <TAB> CommentLine ] | NewLine )

Data_enum = "PI" | "RIN" | "OS" | "LNW" | "PARAM" | "CALC" ..... ([7])
Source_type = "MODL" | "MEAS" | "EXTR" | "PARAM"

Table = Column_Name_Line
        Column_Unit_Line
        { Data_Point_Line }

Column_Name_Line = Name { <TAB> Name } <NL>
Column_Unit_Line = Unit { <TAB> Unit } <NL>
Data_Point_Line = Number { <TAB> Number } <NL>

Comment = CommentBlock | CommentLine ([8])
CommentBlock = "/*" { Text | NewLine } "*/" NewLine
CommentLine = "///" TextLine

File_Begin = "@File_key".Title_key
File_End = "@File_key".End_key

Global_Begin = "@Global_key".Begin_key
Global_End = "@Global_key".End_key
Global_Include = "@Global_key".Include_key FileName NewLine

```


Parameter_Begin = "@Parameter_key".Begin_key
Parameter_End = "@Parameter_key".End_key
Parameter_Include = "@Parameter_key".Include_key FileName NewLine

Model_Begin = "@Model_key".Begin_key
Model_End = "@Model_key".End_key
Model_Include = "@Model_key".Include_key FileName NewLine

Measurement_Begin = "@Measurement_key".Begin_key
Measurement_End = "@Measurement_key".End_key
Measurement_Include = "@Measurement_key".Include_key FileName NewLine

Extraction_Begin = "@Extraction_key".Begin_key
Extraction_End = "@Extraction_key".End_key
Extraction_Include = "@Extraction_key".Include_key FileName NewLine

Setting_Begin = "@Setting_key".Begin_key
Setting_End = "@Setting_key".End_key
Setting_Include = "@Setting_key".Include_key FileName NewLine

Data_Begin = "@Data_key".Begin_key
Data_End = "@Data_key".End_key
Data_Include = "@Data_key".Include_key FileName NewLine

File_key = "Fil" | "File" ([9])
Global_key = "Glo" | "Global"
Parameter_key = "Par" | "Param" | "Parameter"
Model_key = "Mod" | "Model"
Measurement_key = "Mea" | "Meas" | "Measurement"
Extraction_key = "Ext" | "Extr" | "Extraction"
Setting_key = "Set" | "Setting"
Data_key = "Dat" | "Data"

Title_key = "T" | "Title"
End_key = "E" | "End"
Begin_key = "B" | "Begin"
Include_key = "I" | "Include"

Source_key = "Source"

NewLine = <NL> { <NL> }

TextLine = [Text] NewLine

Text = {Plain_Text | <TAB>}

Plain_Text = {letter | digit | non_control_char }

Name = letter {letter | digit | "_" | "."} ([10])

letter = uppercase | lowercase

lowercase = "a" | "b" | "c" | "d" | "e" | "f" | "g" | "h" | "i" | "j" | "k" | "l" | "m" | "n" | "o" | "p" | "q" | "r" | "s" | "t" | "u" | "v" | "w" | "x" | "y" | "z"

uppercase = "A" | "B" | "C" | "D" | "E" | "F" | "G" | "H" | "I" | "J" | "K" | "L" | "M" | "N" | "O" | "P" | "Q" | "R" | "S" | "T" | "U" | "V" | "W" | "X" | "Y" | "Z"

non_control_char = "_" | "!" | "@" | "#" | "\$" | "%" | "^" | "&" | "*" | "(" | ")" | "=" | "" | "[]" | "<" | ">" | ";" | ":" | "/" | "?" | "~" | "," | "." | " " | sign ([11])

Unit = Number Unit_combination

```

Unit_combination = Simple_Unit { ("/" Simple_Unit) | Simple_Unit }
Simple_Unit = ( prefix Plain_Unit Real ) | (" Unit ")
prefix = "f" | "n" | "u" | "m" | "c" | "d" | "da" | "h" | "k" | "M" | "G" | "T"
Plain_Unit = "-" | "g" | "m" | "s" | "A" | "Hz" | "W" | "dB" | "deg" | "rad" | "C" | "%" | "YYMMDD" | .... ([12])

```

```

Number = ( [sign] (positive_real | positive_integer | "inf" ) ) | "NaN"           ([13])
positive_real = positive_integer [fraction] [exponent]
fraction = "." positive_integer
exponent = ("e"|"E" ) integer
integer = [sign] positive_integer
positive_integer = digit { digit }
sign = "+" | "-"
Hex_digit = digit | "A" | "B" | "C" | "D" | "E" | "F" | "a" | "b" | "c" | "d" | "e" | "f"
digit = "0" | "1" | "2" | "3" | "4" | "5" | "6" | "7" | "8" | "9"

```

note on terminal symbols :

<NL> stands for one and only one NewLine ('\n' from C)

<TAB> stands for one and only one tab ('\t' from C)

References

- [1] **Data_enum** describes the type of the data, a complete list is available and can be extended when needed.
- [2] Remark: the Hex block is mainly introduced as an alternative way to write down (compressed) binary information. The actual interpretation of this binary information is up to the user.
- [3] Although the syntax doesn't describe it, a table has to have a rectangular form, which means that all rows must have equal number of columns (divided by the tabs).
- [4] Remark: <NL> means one and only one linefeed, this means that empty lines are not allowed in tables.
- [5] N. Wirth, "What can we do about the unnecessary diversity of notation for syntactic definitions ?", Communications of the ACM, vol. 20, 11 (1977).
- [6] Format of the binary data according to the INTEL-Hex standard.
- [7] **Source_type** describes how the original data has been obtained, a complete list is available and can be extended when needed.
- [8] Although they resemble to common C++ comment identifiers, the usage is only allowed at very strict locations through the file.
- [9] Not explicitly mentioned in the syntax, but keywords are case Insensitive.
- [10] Standard programming language convention.
- [11] Probably some chars will have to be eliminated.
- [12] Remark: space is NOT allowed for no unit, use "--" instead.
- [13] Classical numbers, extended with two special numbers: NaN (Not a Number) and infinity.

APPENDIX B

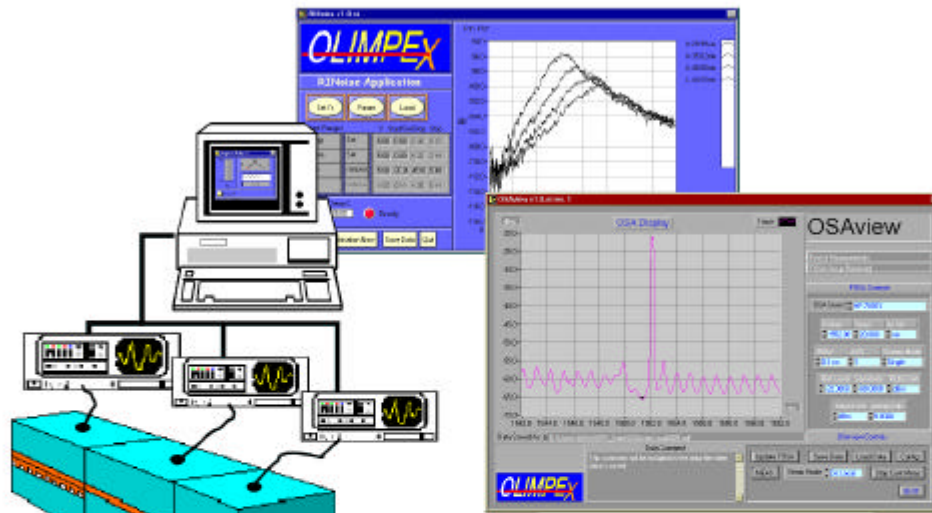
Introduction to the measurement tools of the package “OLIMPEX”

Introduction

The principles and methods described in this thesis resulted in a number of implemented applications. The set of tools has been distributed under the common name “OLIMPEX” amongst a number of companies and universities in Europe, Canada and the United States. This appendix is a copy of the first brochure on OLIMPEX. It was sent to the partners of the European ACTS project called BLISS (“*Broadband Lightwave Sources and Systems*”: AC065). The brochure contains a brief introduction to OLIMPEX, the technical requirements and an overview of the implemented applications.

More recent and more comprehensive information on the tools implemented can be found in Appendix D (on the CD-ROM).

For clarity it should be noted that certain applications presented in Appendix B and Appendix D have been implemented by another partner of the BLISS project (i.e. UCD, University College Dublin).



Introductory guide to





© IMEC-Univ. of Gent, Univ. College of Dublin
 Distributed for evaluation to the partners of
 ACTS-BLISS (AC065)

CONTAINING OVERVIEW OF CURRENT SOFTWARE TOOLS

Authors : P. Verhoeve
 T. Farrell

P01 - IMEC
 P09 - UCD

Table of Contents

1. Introduction.....	203
1.1 What is  ?.....	203
1.2 Technical requirements for 	203
2. LIV.....	204
2.1 Description.....	204
2.2 Technical Details.....	205
3. RINoise	206
3.1 Description.....	206
3.2 Technical Details.....	207
4. Peak1	208
4.1 Description.....	208
4.2 Technical Details.....	209
5. RINFit.....	210
5.1 Description.....	210
5.2 Technical Details.....	211
6. IntLoss	212
6.1 Description.....	212
6.2 Technical Details.....	213
7. TempChar	214
7.1 Description.....	214
7.2 Technical Details.....	215
8. OSAview.....	216
8.1 Description :	216
8.2 Technical details :	217
9. FPgain.....	218
9.1 Description :	218
9.2 Technical details :	219
10. Tune4.....	220
10.1 Description :	220
10.2 Technical details :	221
11. ASEfit.....	222
11.1 Description :	222
11.2 Technical details :	223

About this document

This document describes the collection of tools for laser characterisation and parameter extraction within the OLIMPEX package.

A brief introduction is given to explain the OLIMPEX framework and the philosophy behind the approach toward measuring opto electronic devices. Following that, more detailed information (what it can measure), an image of the graphical user interface (front panel) and some technical information (which instruments are supported) will be given for each application.

1. Introduction

1.1 What is ?

OLIMPEX stands for **O**pto-**e**lectronic **I**ntegrated **M**easurements and **P**arameter **E**xtraction.

OLIMPEX is a collection of software tools for semi-automated laser characterisation which also performs parameter extraction from measurements taken.

OLIMPEX is an open structure (framework) in which different tools can cooperate and be integrated into larger control modules. All tools are elaborated into user-friendly and robust software, i.e. software in which measurements and parameter extraction can be done without a large amount of interaction from the user.

OLIMPEX is a software standard (design philosophy) which guarantees interoperability of all components (tools) and portability across different measurement set-ups. This means that all applications have a specific output file format, which in turn can be used as input file for other tools within the OLIMPEX package.

OLIMPEX is a flexible and portable solution. Instruments are represented in an abstract fashion making the applications less dependent on the physical instruments used. This ensures that the software can operate on many different measurement set-ups.

All applications described by this guide are to be considered OLIMPEX compatible, complying with the above aspects.

1.2 Technical requirements for

As with all software, the OLIMPEX package has technical requirements which make it possible to be used on a system. The software has been developed within the LabVIEW environment (which is not a part of OLIMPEX), for this reason the user must have a version of the **LabVIEW full development package version 4.0** or higher.

It has no extra computer hardware demands than those imposed by LabVIEW itself, although especially for the more advanced parameter extraction tools a high performance PC is advised.

Although LabVIEW code is portable across 7 platforms, the OLIMPEX code is not. It has been developed for the **Windows95** platform and parts of the code may work on other platforms but they are not supported at the moment.

All instrument drivers are based on the GPIB-bus communication method between the computer and the instrument.

2. LIV

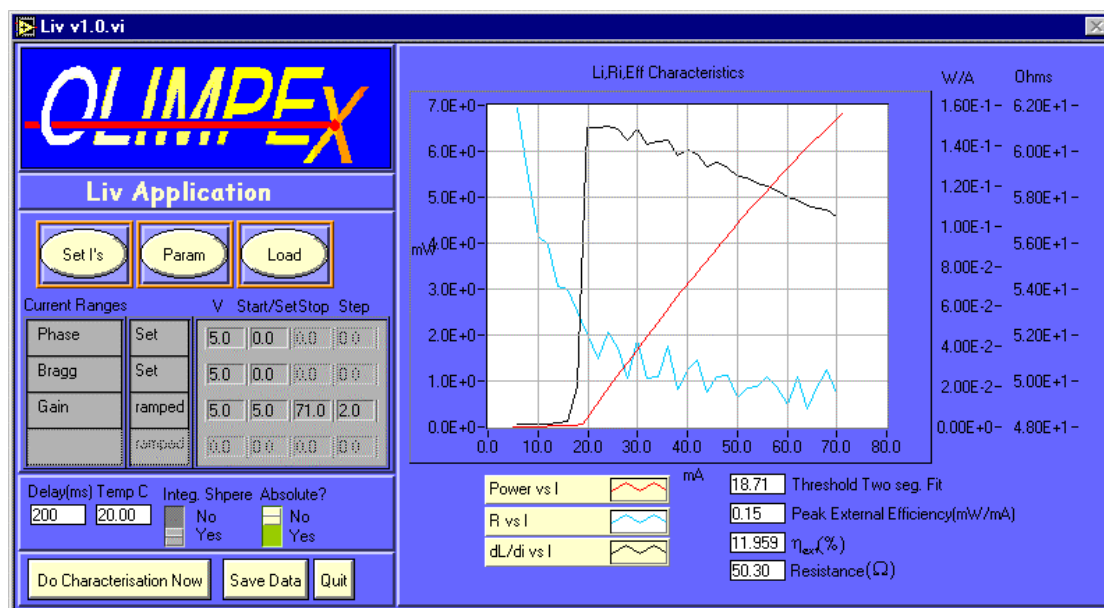
2.1 Description

This application performs a static light power vs. laser drive current measurement. It will also measure the voltage on the laser while the drive current is ramped.

The user can set the biasing conditions on up to three sections and an additional section is ramped using user defined values for the start, stop current as well as the current step.

The user can also specify the temperature (either using an installed temperature controller or entering the value for the temperature manually) so that measurements as a function of temperature can be made.

The application gives the threshold current, external efficiency and resistance of the laser as a function of drive current, which are calculated from the power and voltage measurements respectively. Diode resistance at high currents and peak efficiency is also given.



2.2 Technical Details

Originating Partner: P09-UCD

File Format:

Olimpex LIV File

Contains:

Table of laser drive current vs. light power and applied voltage, external efficiency, threshold, and resistance.

All information needed to repeat the measurement.

Instrument Driver Type: PID

Supported Instruments:

Current Sources:

ILX : LDX3207B, LDX3207C, LPD3811

Profile : LDC1002, LDC1005

HP : HP6625A

Optical Power Meters:

ANDO : AQ2105

Newport : 2832-C

Advantest : TQ8215

Multimeters :

Phillips : PM2525

Temperature Controllers:

ILX : LDT-5910B

Notes:

Threshold current is extracted from the intersection of the extrapolated curves below and above the turn on.

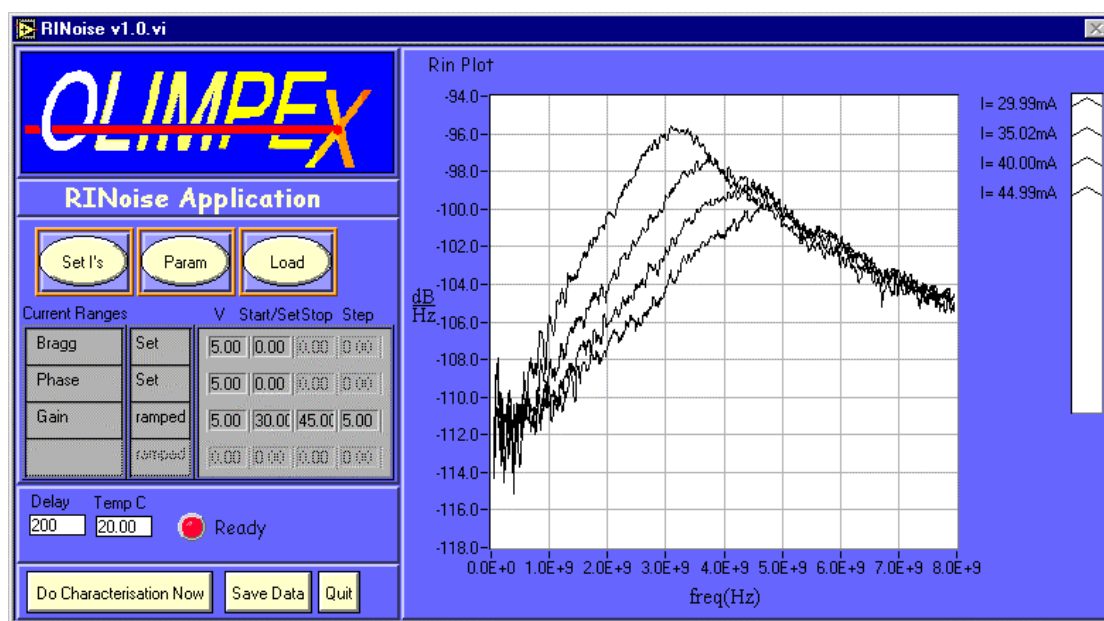
3. RINoise

3.1 Description

This application enables the measurement of the RIN (Relative Intensity Noise) of a laser.

The user can set the biasing conditions on up to four sections. Multiple RIN measurements can be made by specifying a value for the start and stop current as well as the current step.

The user can also control the temperature of the laser so that measurements as a function of temperature can be made.



3.2 Technical Details

Originating Partner : P09-UCD

File Format :

Instrument Driver Type : PID

Supported Instruments :

Current Sources:

ILX : LDX3207B, LDX3207C, LPD3811

Profile : LDC1002, LDC1005

HP : HP6625A

Lightwave - electrical spectrum Analysers :

HP: HP74100

Multimeters :

Phillips: PM2525

Temperature Controllers :

ILX: LDT-5910B

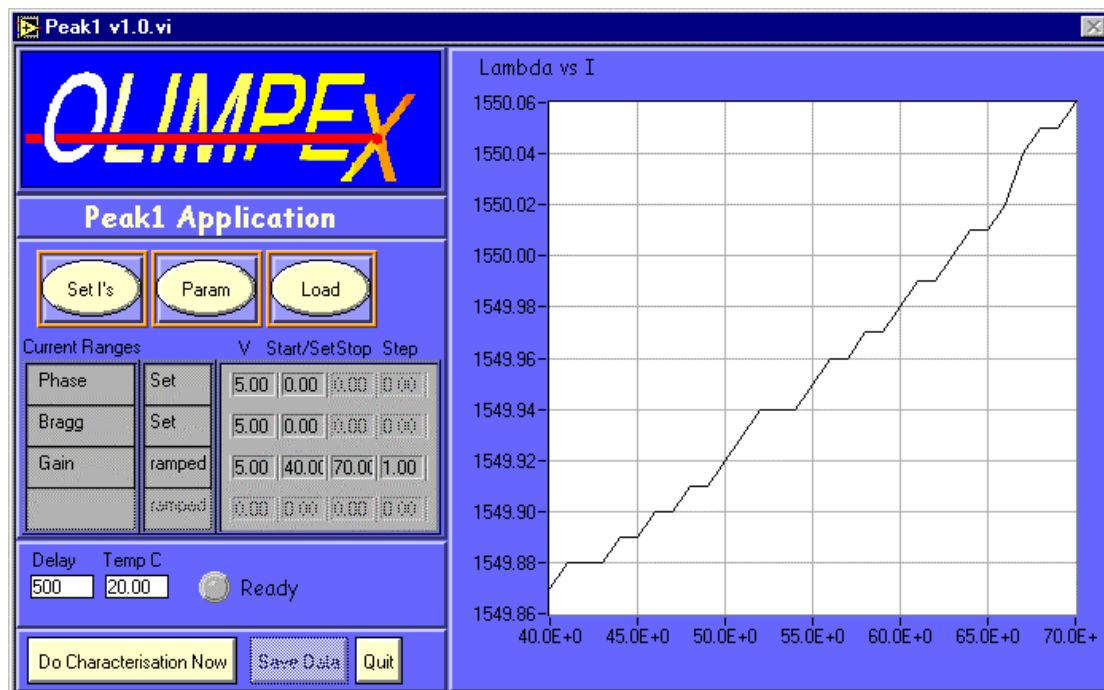
Notes :

4. Peak1

4.1 Description

This application enables the measurement of the peak wavelength of the laser while ramping one section. The wavelength is plotted against the ramped drive current.

The user can set the biasing conditions on up to three sections and a fourth section is ramped with a user defined start, stop and step. The user can also specify the temperature (either using an installed temperature controller or entering the temperature manually) so these measurements can be made as a function of temperature.



4.2 Technical Details

Originating Partner : P09-UCD

File Format :

Instrument Driver Type : PID

Supported Instruments :

Current Sources:

ILX: LDX3207B, LDX3207C, LPD3811

Profile : LDC1002, LDC1005

HP: HP6625A

Wavelength Meters and Optical Spectrum Analysers :

ANDO: AQ-6310B

Advantest: TQ-8325

Multimeters :

Phillips: PM2525

Temperature Controllers :

ILX: LDT-5910B

Notes :

5. RINFit

5.1 Description

This application extracts parameters from the RINoise measured data. The user must find the Olimpex files from the RINoise application for the extraction. To do a full extraction additional parameters are needed. If the input parameters e.g. cavity length are not specified in the Olimpex files the user is prompted for them. If only some are known the application will extract all the parameters possible with the given set of user inputs.

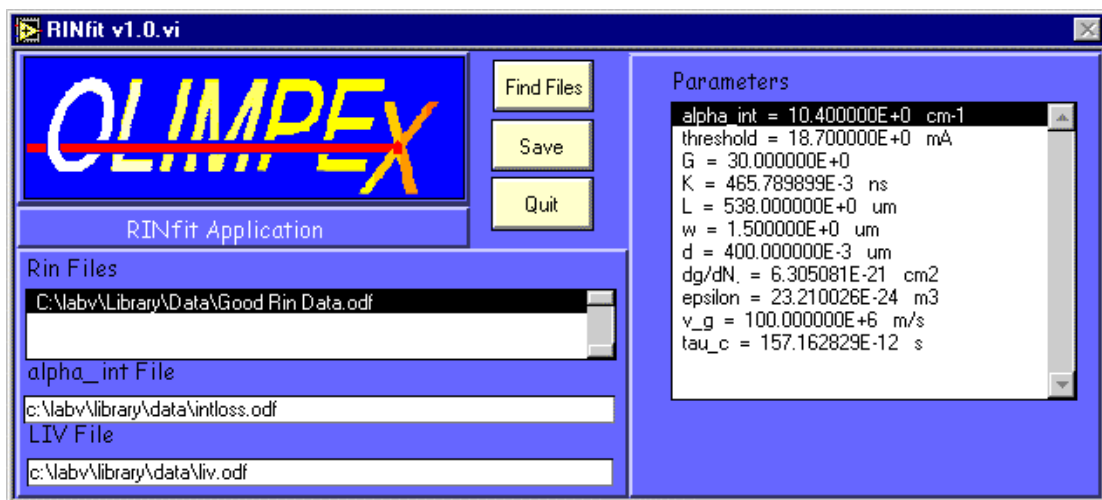
Inputs :

RIN Measurement Data (Power vs. Frequency)

α_{int} , I_{th} , G , L , w , d , v_g

Outputs :

damping ($\gamma(I)$), resonance frequency ($f_r(I)$) as function of current and derived parameters (K , dG/dN , ϵ , v_g , τ_c)



5.2 Technical Details

Originating Partner : P09-UCD

File Format :

Notes :

6. IntLoss

6.1 Description

This application extracts the internal loss of a Fabry Perot laser from a set of LIV measurement files. The LIV measurements must be made on lasers of the same type with different lengths. If the laser length is not specified in the LIV files the user is prompted for a value. To complete the extraction the refractive index or the reflection coefficient must be specified.

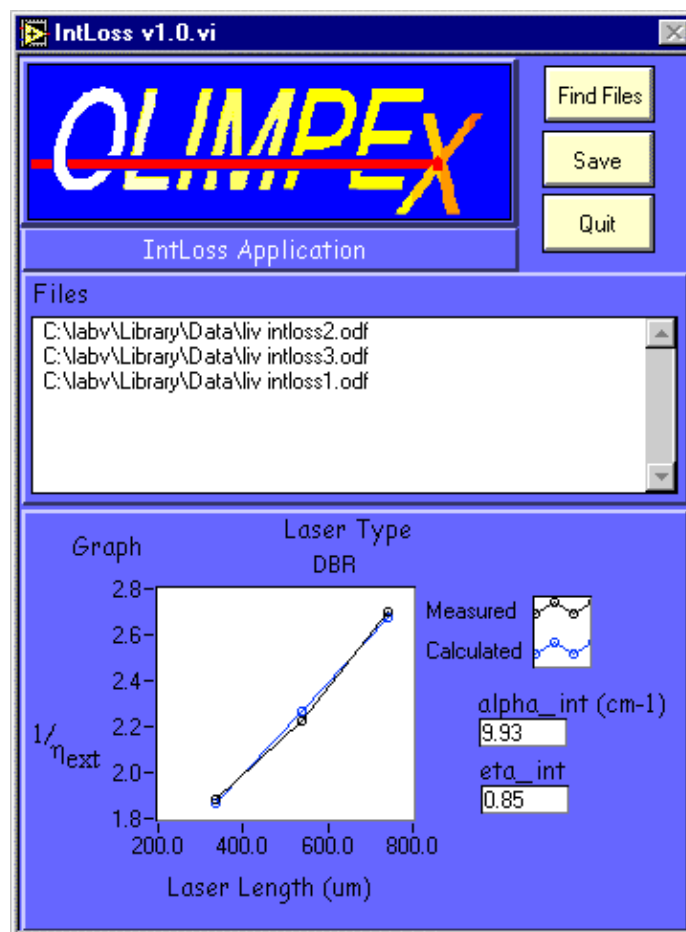
Inputs :

Multiple measurement files from the LIV application. These must be for FP lasers at different lengths. The application uses more specifically the external efficiency (η_{ext}) and the laser length.

The effective refractive index or the product of facet reflectivities is used. If the laser is AR coated the product of the facet reflectivities is used, otherwise the effective refractive index is used.

Outputs :

$\alpha_{\text{int}}, \eta_{\text{int}}$



6.2 Technical Details

Originating Partner : P09-UCD

File Format :

Notes :

7. TempChar

7.1 Description

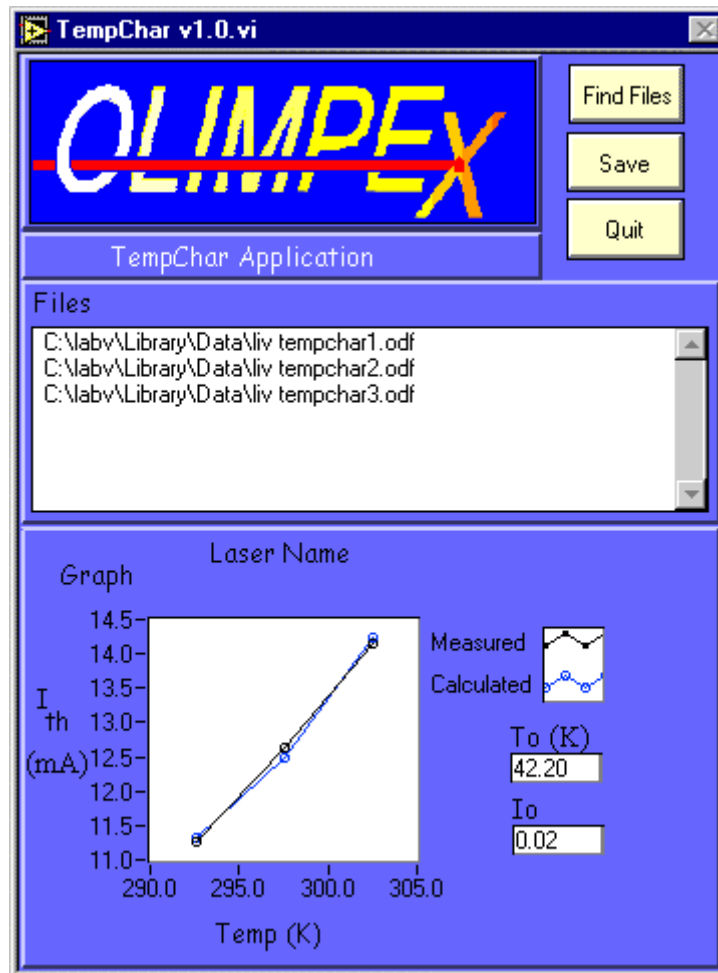
This application extracts the characteristic temperature of a laser from multiple LIV measurements as a function of temperature. The user must locate the Olimpex files generated by the LIV application where each file is a LIV measurement of the same laser at different temperatures.

Inputs :

Measurement files from the LIV application with same laser but different temperatures. The application uses more specifically the threshold current (I_{th}) and the temperature.

Outputs :

T_0



7.2 Technical Details

Originating Partner : P09-UCD

File Format :

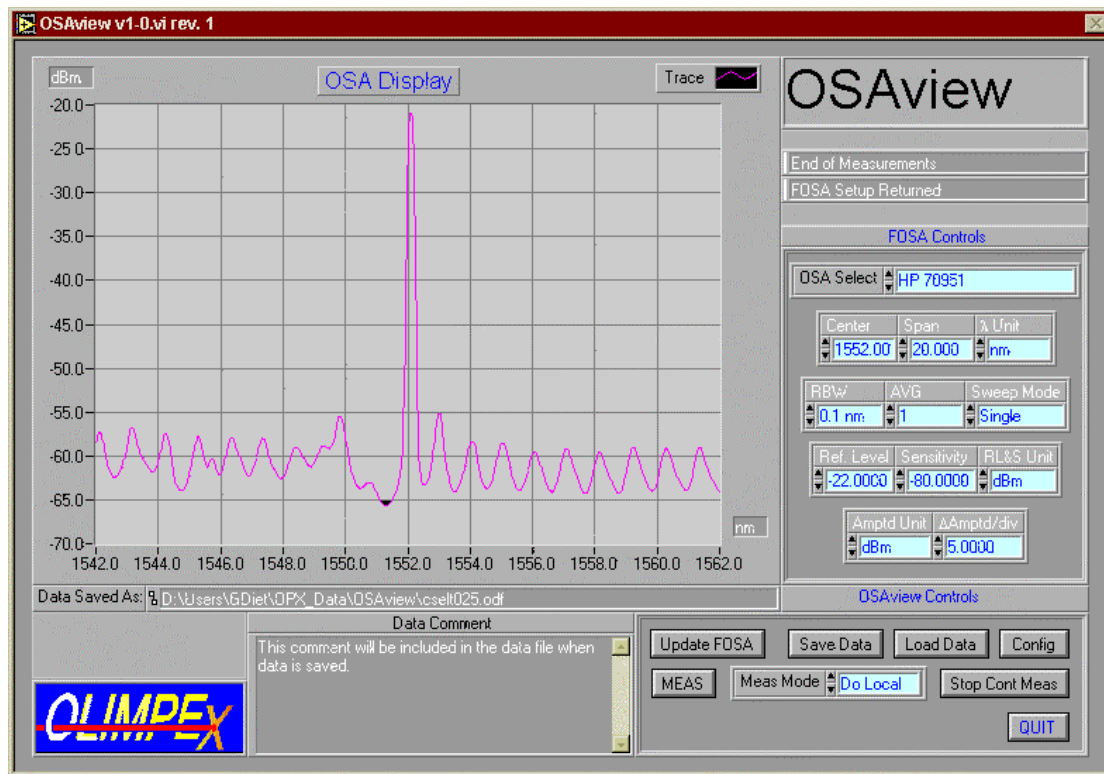
Notes :

8. OSAview

8.1 Description :

This application implements and mimics the functionality of an optical spectrum analyser on a computer. It allows the user to perform measurements of optical spectra on an interactive basis. As on regular optical spectrum analysers, the user can work in continuous or in single sweep mode while he can modify the settings for the measurement through the front panel on the computer.

The resulting optical spectrum can be saved to disk, together with all the information about the measurement settings. All this information can be loaded and viewed as well by the OSAview application.



8.2 Technical details :

Originating partner : P01 : IMEC

File format :

Instrument driver type : functional instrument

Supported instruments :

Optical spectrum analysers :

HP : HP-7095X

Advantest : Q8381A¹

Anritsu : MS9701B (*scheduled*)

ANDO : AQ-6310

Notes :

The application can be used for direct operation through the front panel, but it can also be used as a sub module for other applications (some specific measurement scenarios are available).

¹ Does not support the SMSR measurement

9. FPgain

9.1 Description :

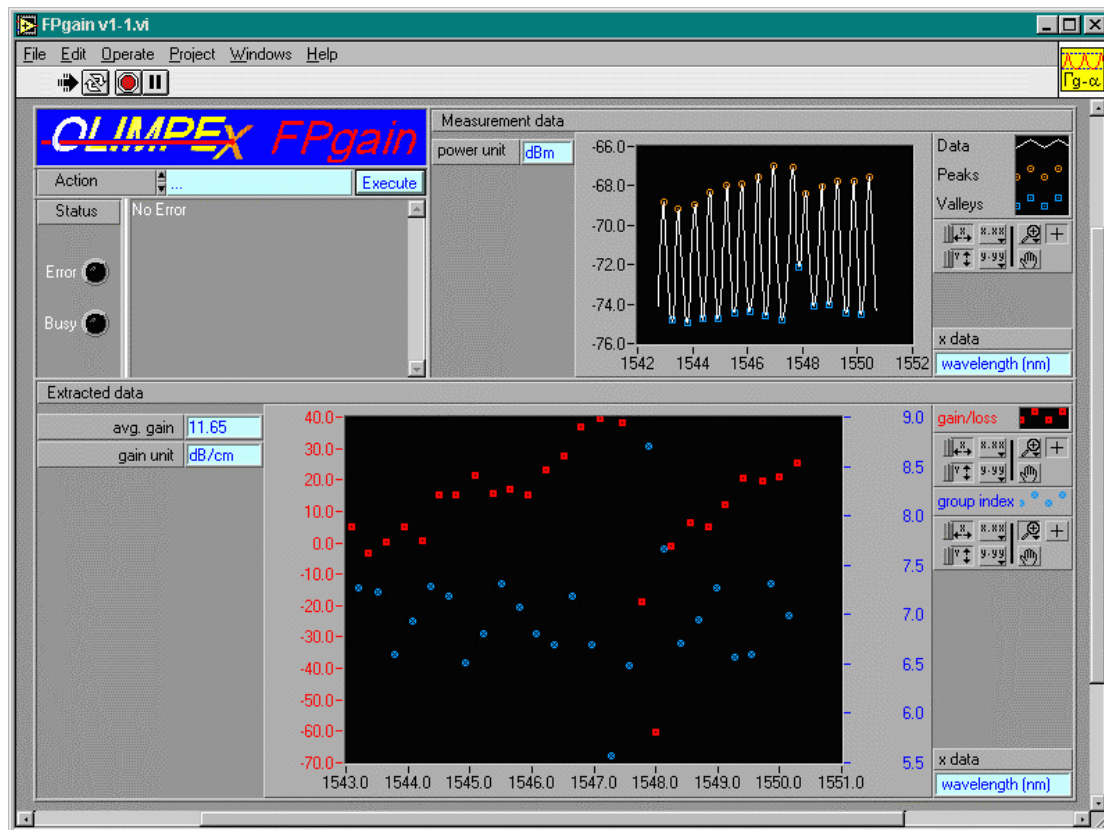
This application allows the user to calculate the gain/loss for an optical waveguide or laser based on a measured spectrum.

The user can also perform the necessary measurements through this tool :

In case of a laser, an optical spectrum is to be measured. This measurement can be selected on the front panel of the application which calls up OSAview, the optical spectrum analyser application for the measurement.

In the case of an optical waveguide, the measurement of the Fabry-Perot fringes needs to be done with the aid of a tuneable laser source, or by changing the temperature and thus changing the optical length of the cavity. Both measurements are available to the user through a menu selection on the front panel.

The gain/loss calculations are done using the method described by Hakki and Paoli. If the Fabry-Perot fringes are measured as function of wavelength, i.e. for a laser spectrum measured with OSAview or for a waveguide spectrum measured with the tuneable laser, also the group refractive index is extracted.



9.2 Technical details :

Originating partner : P01 - IMEC

File format :

Instrument driver type : functional instrument

Supported instruments :

Optical spectrum analysers :

HP : HP7095X

Advantest : Q8381A²

Anritsu : MS9701B (scheduled)

ANDO : 6310 (scheduled)

Tunable laser source :

HP6818

Notes :

² Does not support the SMSR measurement

10. Tune4

10.1 Description :

This application allows the user to measure the static tuning characteristics of multi-section lasers (up to 4 sections can be controlled).

The application allows to measure peak wavelength, side mode suppression ratio (if the used optical spectrum analyser supports this function) and optical output power.

The application assumes the both the power and the optical spectrum can be measured at the same time, using a power splitter in the set up. The necessary calibration factors to correct the absolute power level can be entered into the program.

The image displays four screenshots of the Tune4 application interface:

- Top Left:** A window titled "Tune4 Manual rev. 1" showing measurement settings. The "Measurement" dropdown is set to "DS SMSR/Peak" and the "Function of" dropdown is set to "Current". The "Manual Control" section includes buttons for "Do Core Settings", "Measure", and "QUIT".
- Top Right:** A window titled "DS_SMSR/Peak_Settings rev. 1" for configuring the DS SMSR/Peak application. It includes sections for "DS SMSR/Peak Meas Controls", "Data File Coordinates", and "Manual Control".
- Bottom Left:** A window titled "2Current rev. 1" showing a table of current settings and manual control buttons.

Type	Name	Start	Stop	Increment
1	LDC1000_1A	open	0.00	0.50
2	LDC1000_1B	close	0.00	0.25
- Bottom Right:** A window titled "Actual Status Currents rev. 1" showing the "Actual Current Values" table and an "ABORT Measurements!" button.

ID	Value	Unit
11	45.00	mA
12	0.25	mA
13	NaN	mA
14	NaN	mA

Annotations with arrows point to the following elements:

- Start window of Tune4
- Configuration window for the meas. core (OSA and Power meter settings are shown)
- Selection window for the 2 current case
- Status window during measurement

10.2 Technical details :

Originating partner : P01 - IMEC

File format :

Instrument driver type : functional instrument

Supported instruments :

Optical spectrum analysers :

HP : HP7095X
Advantest : Q8381A³
Anritsu : MS9701B (scheduled)
ANDO : AQ6310 (scheduled)

Optical power meters :

ANDO : AQ2105
Advantest : TQ8215
Newport : 2832-C
Profile : PDA1000

Current sources :

ILX : LDX3207B, LDX3207C, LPD3811
Profile : LDC1002, LDC1005, ITC1102

Notes :

³ Does not support the SMSR measurement

11. ASEfit

11.1 Description :

This application allows the user to fit a model of the ASE spectrum of a single section DFB laser to a measured spectrum. The spectrum can be loaded from an OLIMPEX file, as generated by OSAview.

The user can specify a start value for all parameters and can select whether or not he wants to fit this parameter with the optimisation algorithm provided. In order to have a more flexible approach to the optimisation, the user can also enter a multiplication factor between the actual parameter and the value used in the optimisation algorithm. In this way it can be assured that all parameters, which are used by the optimisation algorithm, are of the same order of magnitude.

INPUT :

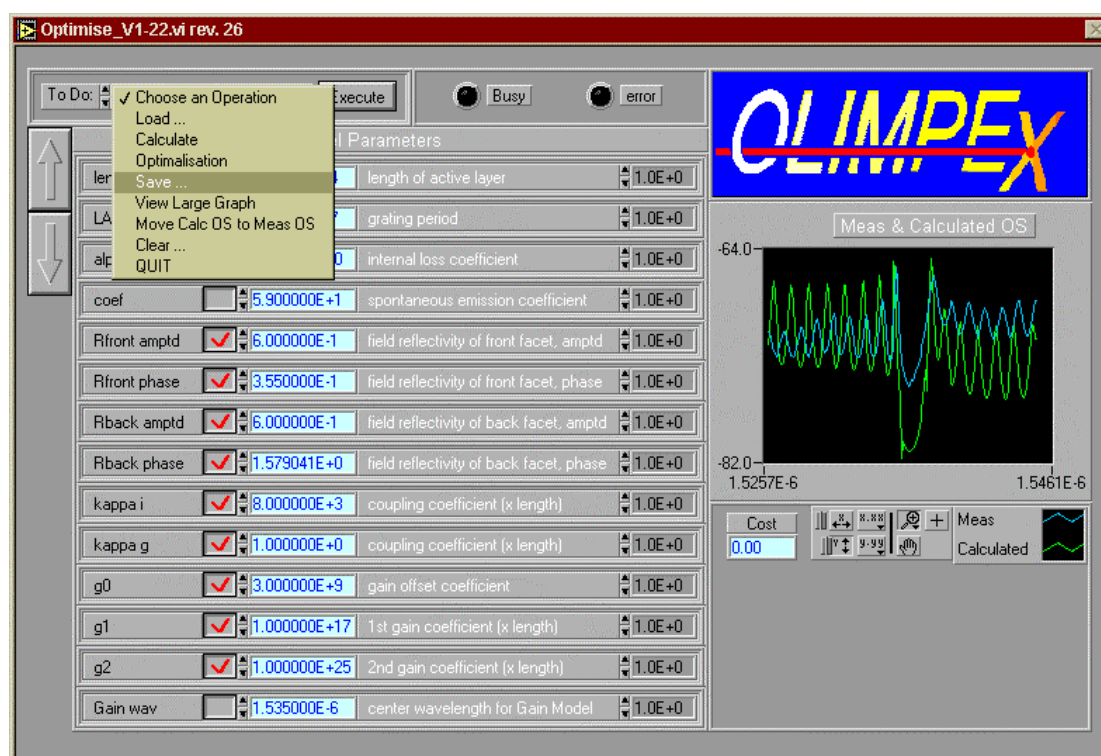
ASE measurement (Intensity vs. wavelength, logarithmic scale)

L and Λ

Estimate for R_1 , R_2 , κ_i , κ_g

OUTPUT :

R_1 , R_2 , ϕ_1 , ϕ_2 , κ_i , κ_g , n_g , gain



11.2 Technical details :

Originating partner : P01

file format : OSView file with extra parameter block

APPENDIX C

Expressions and calculations

C.1. Introduction

This appendix describes the error analysis by differentiating the expressions used to calculate the parameters. The relevant expressions are copied and the end result of the differentiation is given.

C.2 Error analysis of the RIN based parameter extraction

This section gives the expressions which make it possible to calculate the error margins for the differential optical gain and the non-linear gain coefficient. The calculations are based on the error margins of the laser parameters and the extracted “D-factor” and “K-factor”.

C.2.1 The differential optical gain

The differential optical gain can be calculated according to the expression (C.1) as derived in Chapter 5. The injection efficiency (h_i) is assumed to be equal to one.

$$\left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right) = \Phi(w, d, L, D, v_g) = \frac{4\mathbf{p}^2 qwdL}{h_i v_g} D \quad (\text{C.1})$$

The group velocity (v_g) is given by expression (C.2), where c represents the speed of light and n_g represents the group index.

$$v_g = \frac{c}{n_g} \quad (\text{C.2})$$

To determine the error margin for the differential optical gain, the partial derivatives to all parameters are needed. These are given in expressions (C.3) till (C.7)

$$\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}w} = 4 \frac{\mathbf{p}^2 qdLDn_g}{c} \quad (\text{C.3})$$

$$\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}d} = 4 \frac{\mathbf{p}^2 qwLDn_g}{c} \quad (\text{C.4})$$

$$\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}L} = 4 \frac{\mathbf{p}^2 qwdDn_g}{c} \quad (\text{C.5})$$

$$\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}D} = 4 \frac{\mathbf{p}^2 qwdLn_g}{c} \quad (\text{C.6})$$

$$\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}n_g} = 4 \frac{\mathbf{p}^2 qwdLn_g}{c} \quad (\text{C.7})$$

The error margin for the differential optical gain (C.8), is calculated by adding all partial derivatives each one multiplied by the error margin of the corresponding parameter.

$$\Delta\left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N}\right) = \left(\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}w}\right)\Delta w + \left(\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}d}\right)\Delta d + \left(\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}L}\right)\Delta L + \left(\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}D}\right)\Delta D + \left(\frac{\mathcal{I}\Phi}{\mathcal{I}n_g}\right)\Delta n_g \quad (\text{C.8})$$

C.2.2 The non-linear optical gain coefficient

Just as for the differential optical gain, the partial first derivatives will be calculated for the non-linear optical gain coefficient. It is important that this is done until the basic parameters are reached. The expression for the non-linear optical gain is given in (C.9).

$$\mathbf{e} = \left(\frac{K}{4\mathbf{p}^2} - t_p\right) v_g \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N}\right) \quad (\text{C.9})$$

The group velocity is given by expression (C.2), the differential optical gain by (C.1) and the photon lifetime is given by (C.10). These expressions are combined to expression (C.11), under the assumption that both facets have an equal reflection coefficient R .

$$t_p = \frac{1}{v_g(\mathbf{a}_i + \mathbf{a}_m)} = \frac{1}{v_g\left(\mathbf{a}_i + \frac{1}{L}\ln\left(\frac{1}{R}\right)\right)} \quad (\text{C.10})$$

$$\mathbf{e} = 4\mathbf{p}^2 qwdLD \left(\frac{K}{4\mathbf{p}^2} - \frac{n_g}{c\left(\mathbf{a}_i + \frac{1}{L}\ln\left(\frac{1}{R}\right)\right)} \right) \quad (\text{C.11})$$

The partial derivatives of this expression are given by expressions (C.12) till (C.19). The error margin of the non-linear optical gain is defined as the sum of all partial derivatives multiplied with the tolerance of the corresponding parameter.

$$\frac{\mathcal{I}\mathbf{e}}{\mathcal{I}\mathbf{a}_i} = 4\mathbf{p}^2 \frac{qwdL^3 Dn_g}{c\left(\mathbf{a}_i L + \ln\left(\frac{1}{R}\right)\right)^2} \quad (\text{C.12})$$

$$\frac{\mathcal{I}\mathbf{e}}{\mathcal{I}n_g} = -4\mathbf{p}^2 \frac{qwdL^2 D}{c\left(\mathbf{a}_i L + \ln\left(\frac{1}{R}\right)\right)} \quad (\text{C.13})$$

$$\frac{\mathcal{I}e}{\mathcal{I}D} = \frac{qwdL}{c} \left(\frac{c\mathbf{a}_i KL + cK \ln\left(\frac{1}{R}\right) - 4\mathbf{p}^2 Ln_g}{\mathbf{a}_i L + \ln\left(\frac{1}{R}\right)} \right) \quad (\text{C.14})$$

$$\frac{\mathcal{I}e}{\mathcal{I}L} = \frac{qwdD}{c} \left(\frac{cK\mathbf{a}_i^2 L^2 + 2cK\mathbf{a}_i L \ln\left(\frac{1}{R}\right) + cK \ln\left(\frac{1}{R}\right)^2 - 4\mathbf{p}^2 \mathbf{a}_i n_g L^2 - 8\mathbf{p}^2 n_g L \ln\left(\frac{1}{R}\right)}{\mathbf{a}_i L + \ln\left(\frac{1}{R}\right)} \right) \quad (\text{C.15})$$

$$\frac{\mathcal{I}e}{\mathcal{I}R} = -4\mathbf{p}^2 \frac{qwdL^2 D n_g}{cR \left(\mathbf{a}_i L + \ln\left(\frac{1}{R}\right) \right)^2} \quad (\text{C.16})$$

$$\frac{\mathcal{I}e}{\mathcal{I}K} = qwdLD \quad (\text{C.17})$$

$$\frac{\mathcal{I}e}{\mathcal{I}w} = \frac{qdLD}{c} \left(\frac{c\mathbf{a}_i KL + cK \ln\left(\frac{1}{R}\right) - 4\mathbf{p}^2 Ln_g}{\mathbf{a}_i L + \ln\left(\frac{1}{R}\right)} \right) \quad (\text{C.18})$$

$$\frac{\mathcal{I}e}{\mathcal{I}d} = \frac{qwLD}{c} \left(\frac{c\mathbf{a}_i KL + cK \ln\left(\frac{1}{R}\right) - 4\mathbf{p}^2 Ln_g}{\mathbf{a}_i L + \ln\left(\frac{1}{R}\right)} \right) \quad (\text{C.19})$$

C.2.3 The control calculation

As explained in Chapter 5 it is possible to calculate the variation of the modal optical gain versus the current through the laser diode, in two ways. One based on the Hakki-Paoli method and one based on the parameter extraction of the relative intensity noise spectrum. The relationship between both ways is given in (C.20).

$$\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}I} = \frac{t_d}{qwdL} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N} \right) \quad (\text{C.20})$$

The partial derivatives for this calculation are given by expressions (C.21) till (C.25).

$$\frac{\mathcal{I}\left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}I}\right)}{\mathcal{I}\left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N}\right)} = \frac{t_d}{qwdL} \quad (\text{C.21})$$

$$\frac{\mathcal{I}\left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}I}\right)}{\mathcal{I}t_p} = \frac{1}{qwdL} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N}\right) \quad (\text{C.22})$$

$$\frac{\mathcal{I}\left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}I}\right)}{\mathcal{I}w} = -\frac{t_d}{qw^2dL} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N}\right) \quad (\text{C.23})$$

$$\frac{\mathcal{I}\left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}I}\right)}{\mathcal{I}d} = -\frac{t_d}{qwd^2L} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N}\right) \quad (\text{C.24})$$

$$\frac{\mathcal{I}\left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}I}\right)}{\mathcal{I}L} = -\frac{t_d}{qwdL^2} \left(\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}N}\right) \quad (\text{C.25})$$

C.3 Error analysis of the Hakki-Paoli method

The expression used by the method is given in (C.26). The variables in this expression are: two measured powers (P_{max} and P_{min}), the length of the laser (L) and the reflection coefficient (R). It is assumed that the reflection coefficient is identical for both facets

$$\Gamma g - \mathbf{a}_i = G = \frac{1}{L} \left(\ln \left(\frac{\sqrt{P_{max}} - \sqrt{P_{min}}}{\sqrt{P_{max}} + \sqrt{P_{min}}} \right) + \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right) \quad (\text{C.26})$$

The partial derivatives are given by expressions (C.27) till (C.30). When realistic values are entered for the parameters ($P_{max} = -66$ dBm, $P_{min} = -77$ dBm, $L = 153$ μm and $R = 0.3$) the modal optical gain is $G = 40$ cm^{-1} . The specifications of the used optical spectrum analyser are used as tolerances and the accuracy of the reflection coefficient and the length are assumed to be respectively 0.1 and 2. In that case the error margin for the modal gain is 5 cm^{-1} .

$$\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}L} = -\frac{1}{L^2} \left(\ln \left(\frac{\sqrt{P_{max}} - \sqrt{P_{min}}}{\sqrt{P_{max}} + \sqrt{P_{min}}} \right) + \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right) \quad (\text{C.27})$$

$$\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}R} = -\frac{1}{LR} \quad (\text{C.28})$$

$$\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}P_{max}} = \frac{1}{2L} \left(\frac{\sqrt{P_{max}} + \sqrt{P_{min}}}{\sqrt{P_{max}} - \sqrt{P_{min}}} \right) \left(\frac{1}{(\sqrt{P_{max}} + \sqrt{P_{min}})\sqrt{P_{max}}} - \frac{\sqrt{P_{max}} - \sqrt{P_{min}}}{(\sqrt{P_{max}} + \sqrt{P_{min}})^2 \sqrt{P_{max}}} \right) \quad (\text{C.29})$$

$$\frac{\mathcal{I}G}{\mathcal{I}P_{min}} = -\frac{1}{2L} \left(\frac{\sqrt{P_{max}} + \sqrt{P_{min}}}{\sqrt{P_{max}} - \sqrt{P_{min}}} \right) \left(\frac{1}{(\sqrt{P_{max}} + \sqrt{P_{min}})\sqrt{P_{min}}} + \frac{\sqrt{P_{max}} - \sqrt{P_{min}}}{(\sqrt{P_{max}} + \sqrt{P_{min}})^2 \sqrt{P_{min}}} \right) \quad (\text{C.30})$$

APPENDIX D

Detailed information on the tools and the components of the package “OLIMPEX”

Introduction

The information in this appendix is available on the CD-ROM included in this thesis. The CD-ROM contains more detailed information on the applications and components realised during the course of this work. The CD-ROM has been designed as an Internet site and was realised in the HTML format. Hence it can be viewed with any Internet browser which can view frames.

To explore the CD-ROM, the file “overview.html” in the root directory of the CD-ROM has to be opened. All further information can be reached through the hyperlinks.

Content of the CD-ROM

OLIMPEX

This appendix contains a copy of the CD-ROM which has been sent to the partners of the European Acts project called BLISS (“*Broadband Lightwave Sources and Systems*”: AC065). It contained a short introduction to OLIMPEX, the technical requirements and an overview of the applications implemented. For each application a short user manual is available illustrated with a picture of the graphical user interface.

The OLIMPEX section of the CD-ROM also contains an example of the documentation available for the different components of the parameter extraction framework and the functional instrument driver. For a number of components, the C++ source code is available.

ODIF

This section of the CD-ROM contains a copy of the information on ODIF which has been published on the internet. This includes the LabVIEW file interface software. During the course of this thesis a prototype of an ODIF parser in C++ has been implemented. This is illustrated with an example on how to use it for further file interfaces. The C++ source code is available for the parser as well as for the interface example.

LabVIEW

This section gives an overview of the symbiosis between LabVIEW and C++, as discussed in Chapter 7. Some examples are illustrated by means of the corresponding source code.

