

Fotonische geïntegreerde circuits en vezelkoppelaars gebaseerd op InP gebonde membranen

Frederik Van Laere

Promotoren: prof. dr. ir. R. Baets

prof. dr. ir. D. Van Thourhout

19 januari 2009



Photonics Research Group



<http://photonics.intec.ugent.be>

Overzicht

- **Inleiding :**
 - toepassingsgebied
 - enkele begrippen
- **Het koppelprobleem**
 - vezelkoppelaars
 - voorbeelden van fotonisch geïntegreerde circuits
- **Het polarisatieprobleem**
 - vezelkoppelaars
 - voorbeelden van fotonisch geïntegreerde circuits

Overzicht

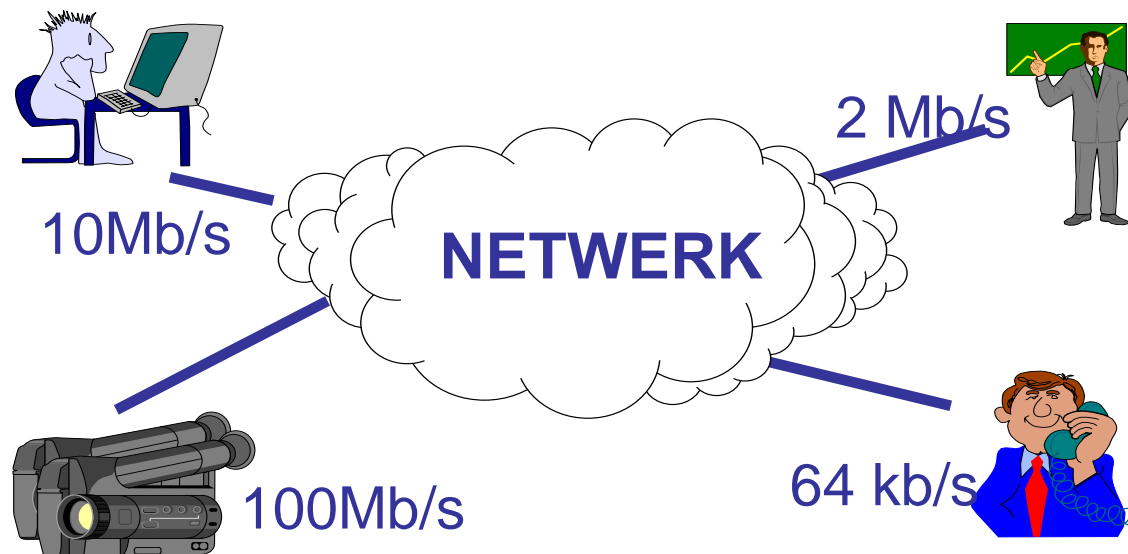
- **Inleiding :**
 - **toepassingsgebied**
 - enkele begrippen
- **Het koppelprobleem**
- **Het polarisatieprobleem**

Telecommunicatie

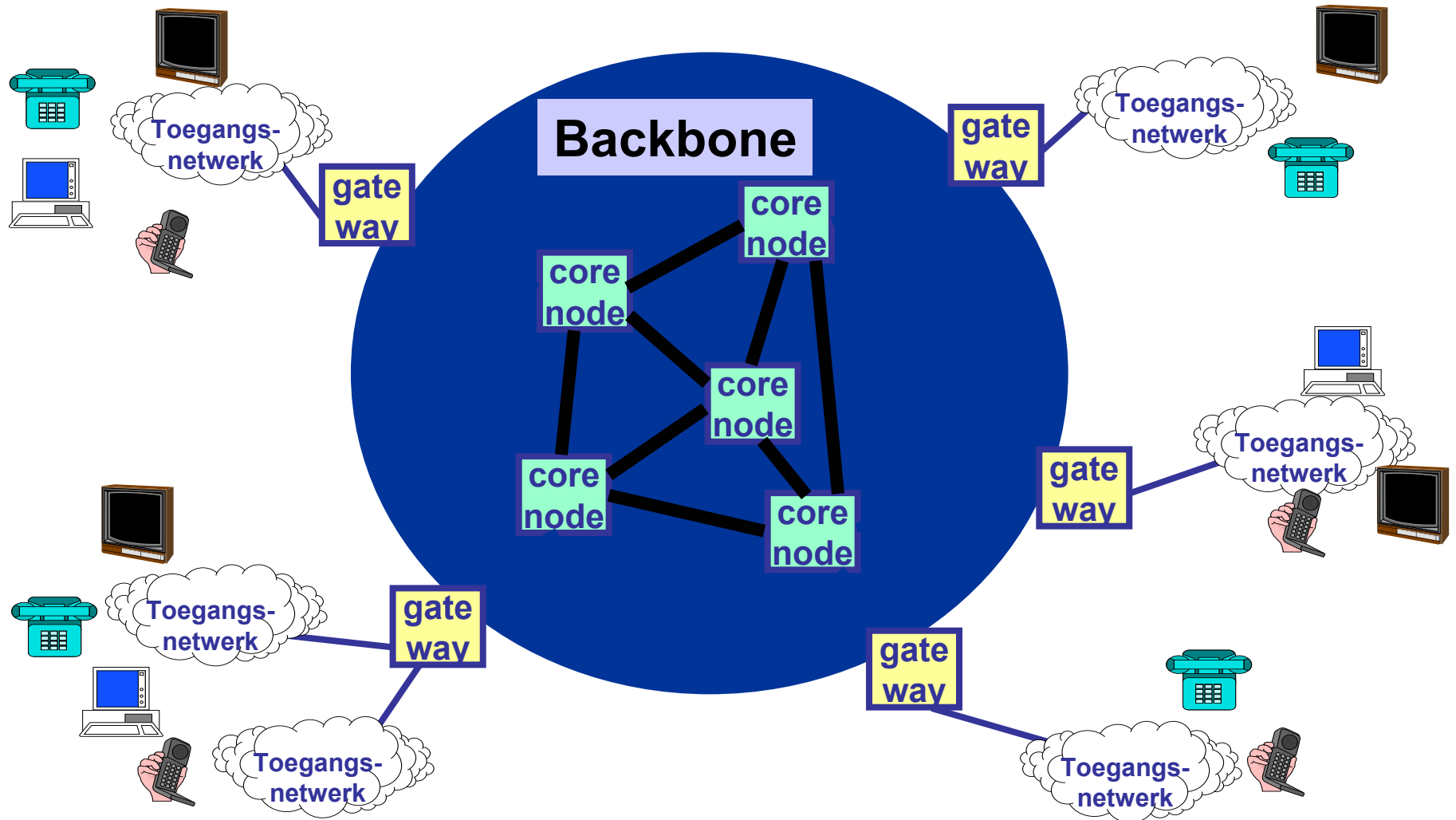
- verzenden van informatie tussen 2 plaatsen
- van alle tijden, in vele vormen :
 - rooksignalen
 - telegraaf
 - complexe hedendaagse netwerken



(1843)

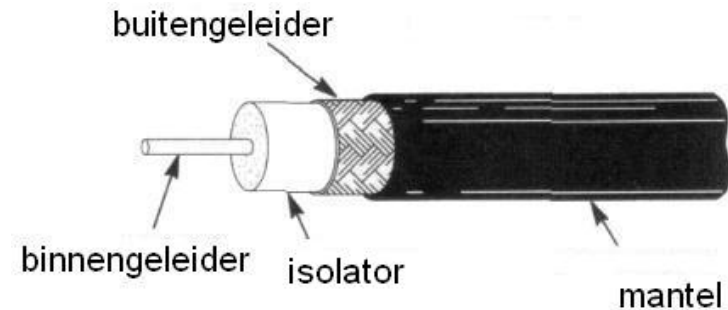


Telecom netwerk



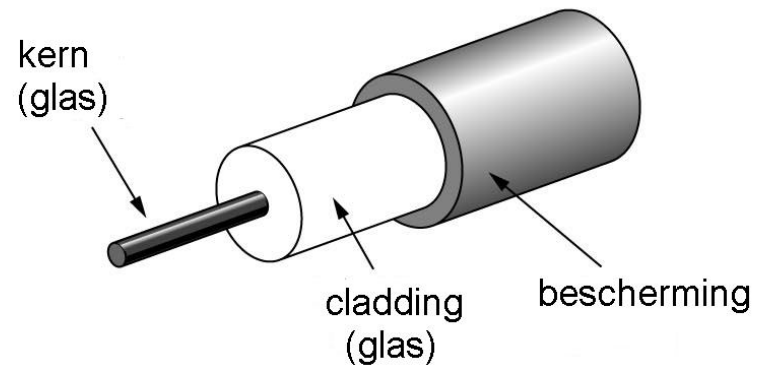
Transportmedium

- Elektrisch :
 - twisted pair
 - coax kabel



Elektrische verbindingen zijn beperkt qua capaciteit

- Optisch :
 - optische vezel
 - * lichtsignalen
 - * lage attenuatie
 - * grote bandbreedte



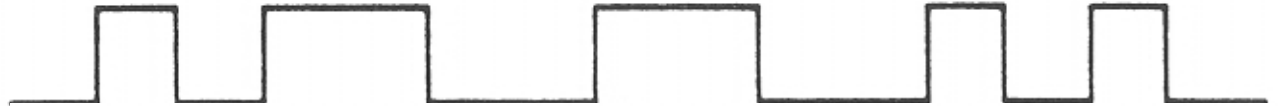
Optische verbindingen kunnen voldoen aan de stijgende vraag naar bandbreedte

Verzenden van een signaal

Te verzenden data

0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0

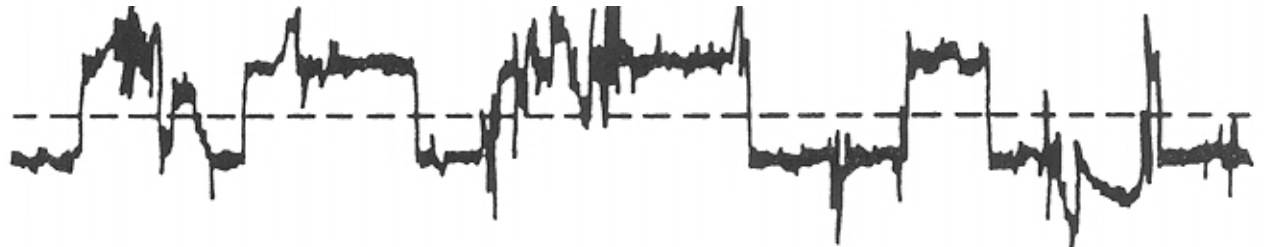
Signaal



Ruis



Signaal plus ruis



Sampling tijdstip



Ontvangen data

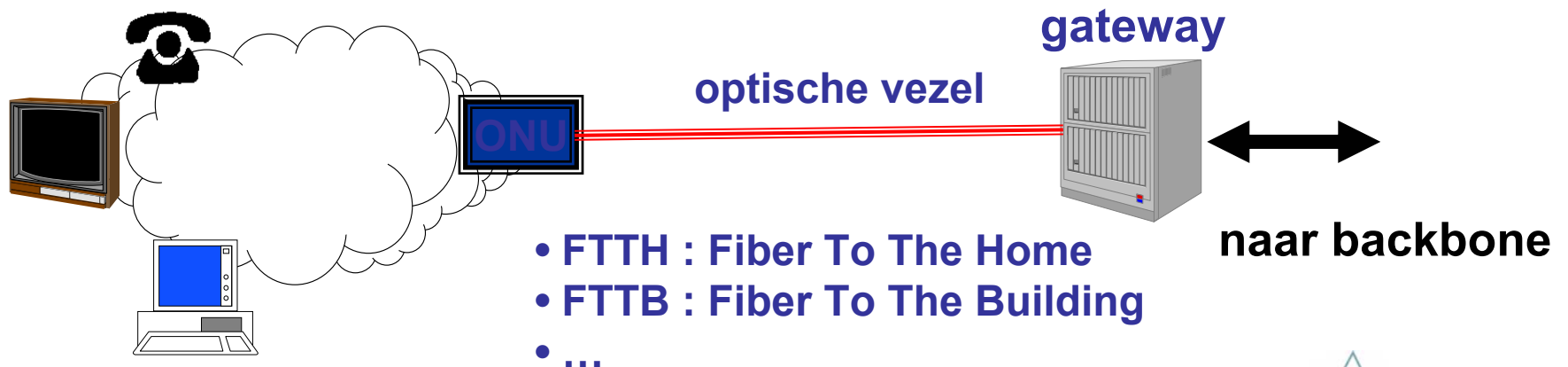
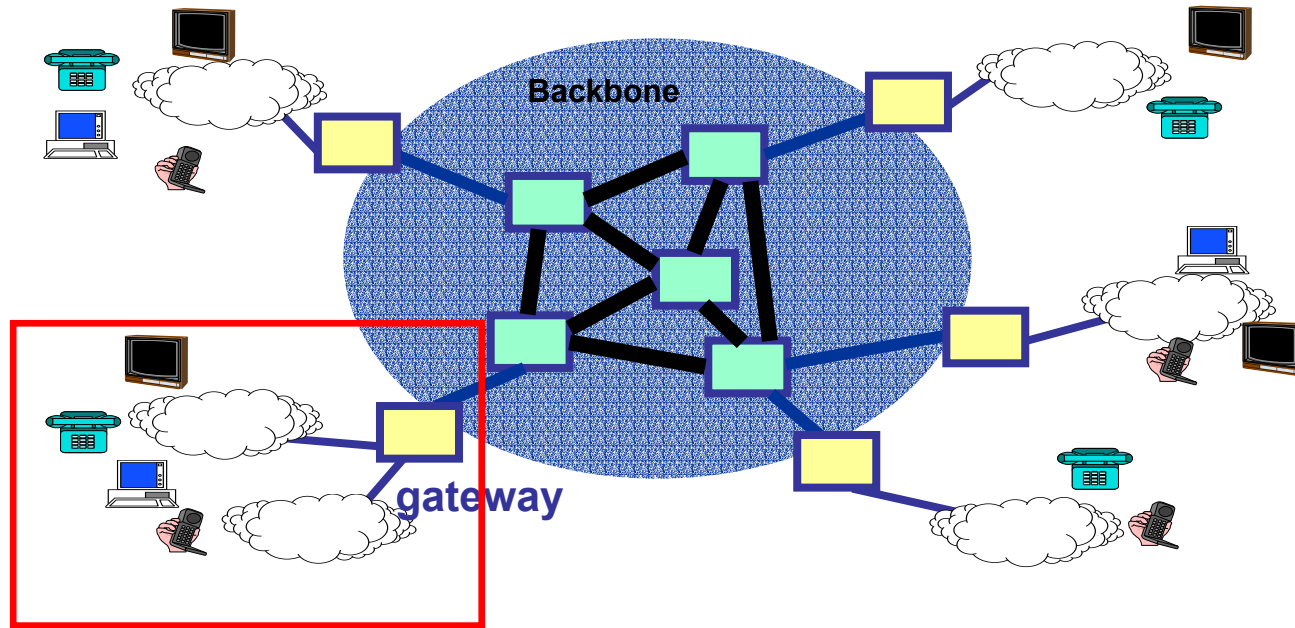
0 1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 1 0 0 0

Originele data

0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0

Foute bits

Fiber to the ... (= FTTx)



Geïntegreerd circuit

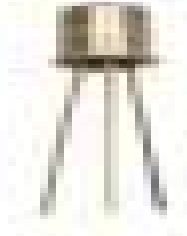
- Voor telecommunicatie zijn verschillende functies nodig :
 - versterken van signaal
 - regenereren van signaal
 - routeren, filteren van de signalen
 - detecteren van signalen
 - ...
- Voordelig om al die functies op 1 enkele chip te plaatsen (kost, betrouwbaarheid)
- Zoveel mogelijk componenten op een zo klein mogelijke oppervlakte = miniaturisatie

Naar analogie met de elektronica ...

vacuüm buis



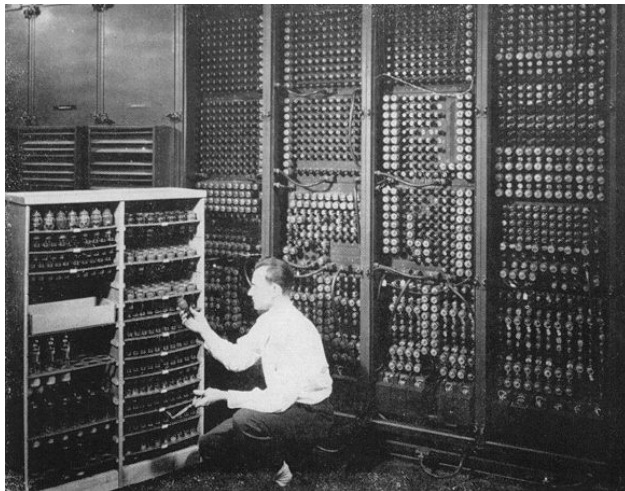
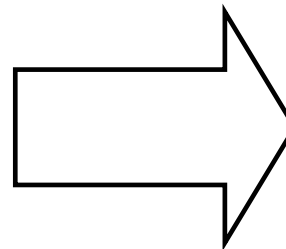
transistor
(1947)



Vandaag



Eniac, eerste computer
1946, 30 ton



Replacing a bad tube meant checking among ENIAC's 19,000 possibilities.

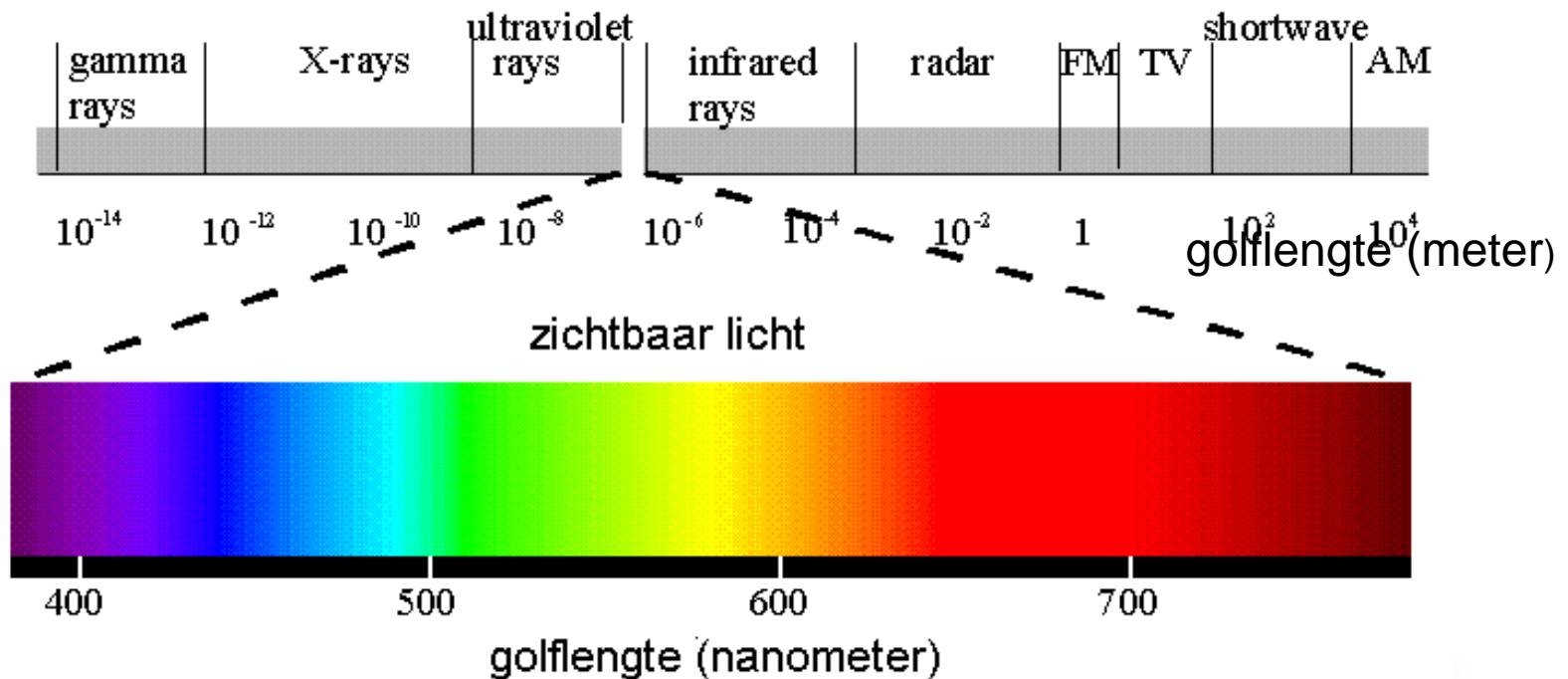


Overzicht

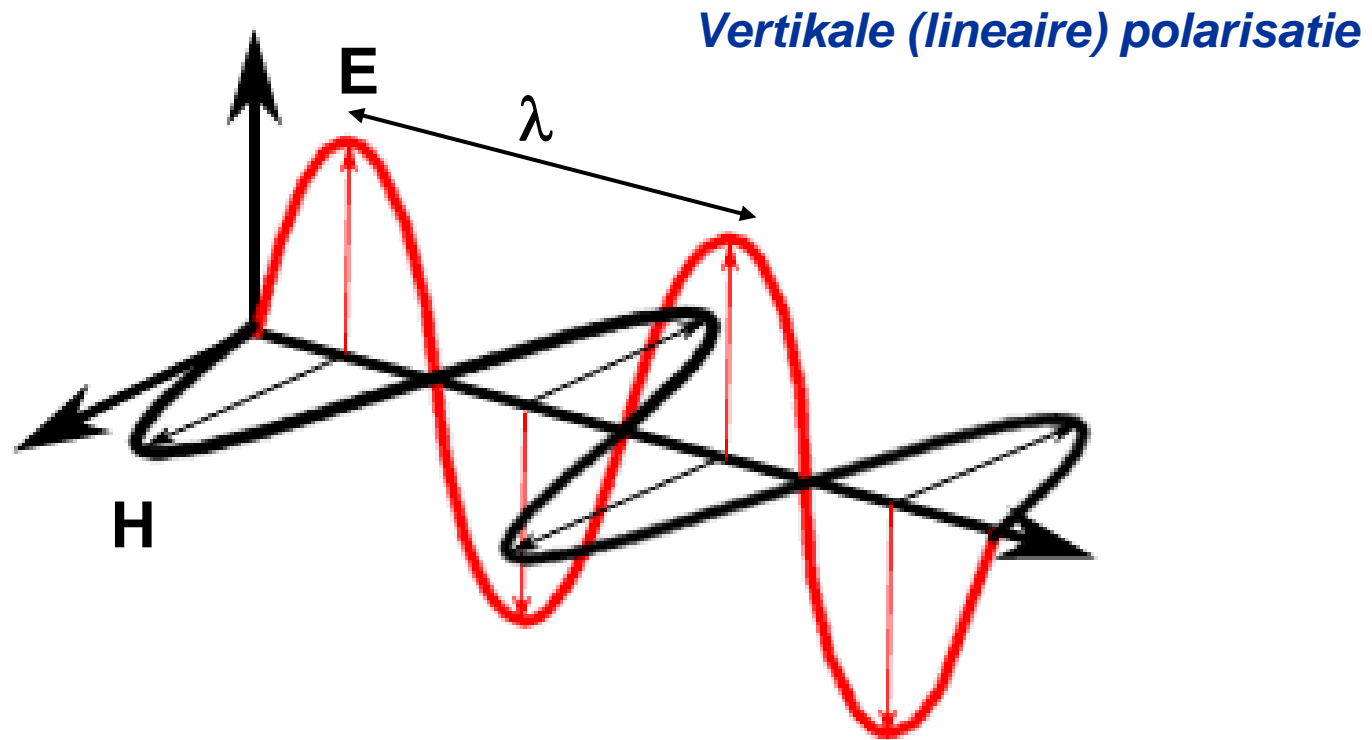
- **Inleiding :**
 - toepassingsgebied
 - enkele begrippen
 - * **Wat is licht ?**
 - * **Wat is een golfgeleider ?**
 - * **Wat zijn InP membranen ?**
- **Het koppelp probleem**
- **Het polarisatieprobleem**

Wat is licht ?

- Licht = elektromagnetische straling.
- foton = elementair lichtdeeltje
- Lichtsnelheid in vacuum : $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s
- golflengte λ
- telecom : λ rond 1300 en 1550 nm (dus infrarood)



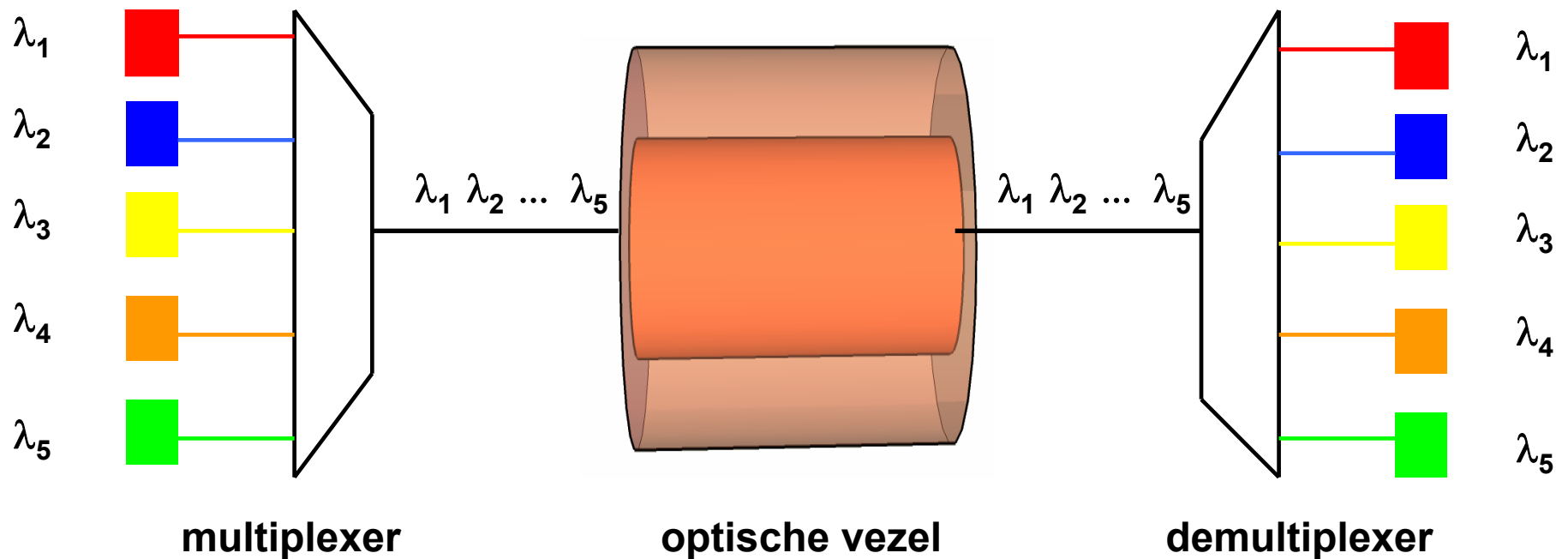
Polarisatie



Elektrisch veld E en magnetisch veld H hebben een bepaalde richting.

WDM netwerk

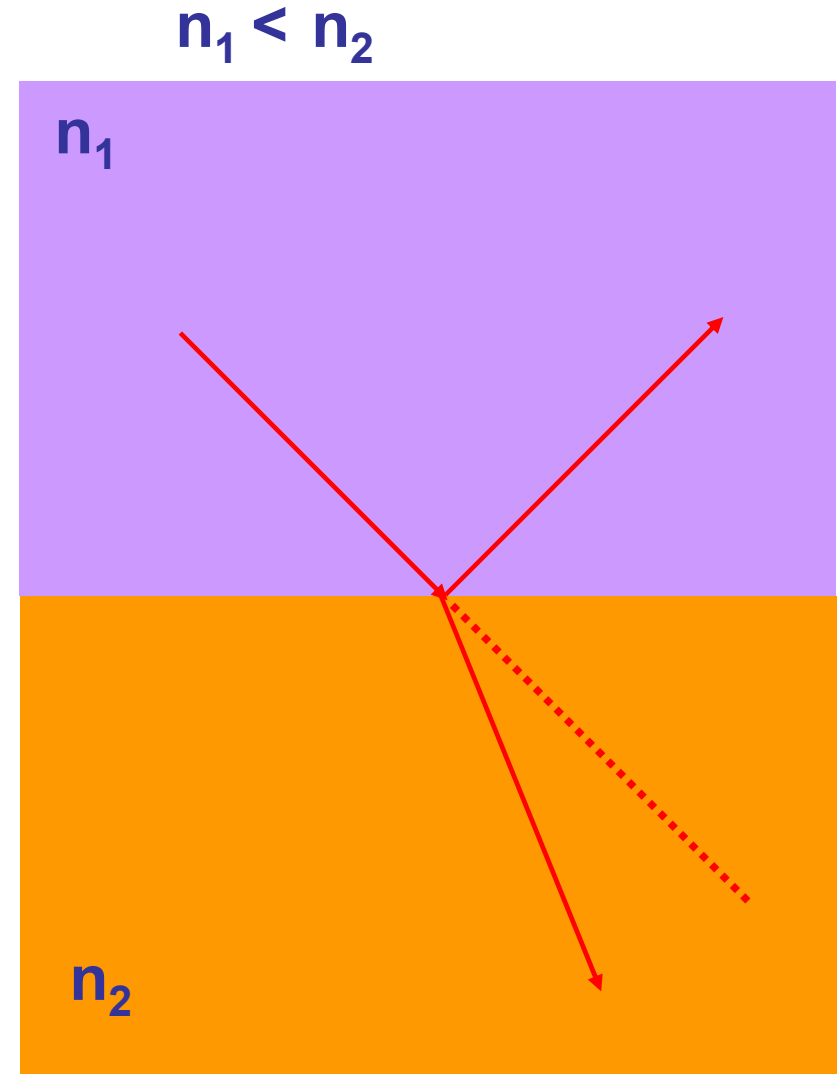
- optimaal benutten van de capaciteit van de optische vezel



WDM = Wavelength Division Multiplexing

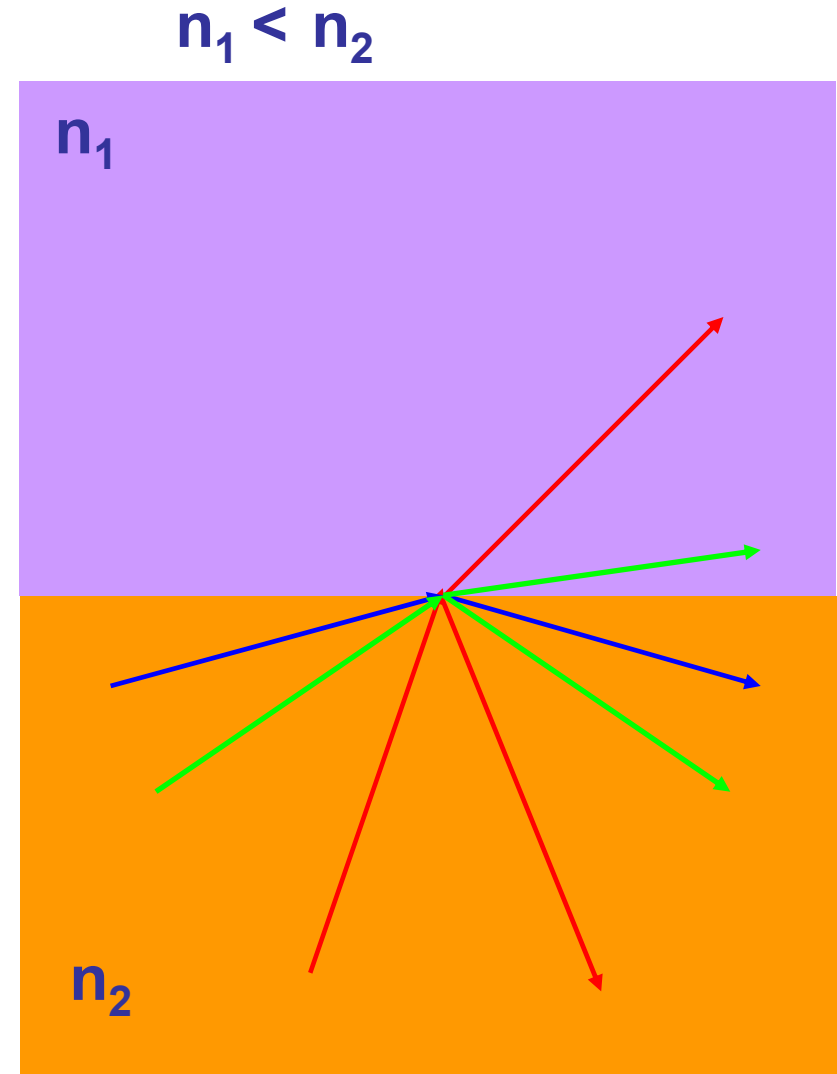
Lichtbreking

- materiaal heeft een brekingsindex n
- vb. vacuum : $n=1$
water : $n=1.33$
- lichtsnelheid in materiaal
 $= c/n$
- bij overgang van materiaal 1 naar materiaal 2 :
 - gedeeltelijke reflectie
 - afbuigen van lichtstraal



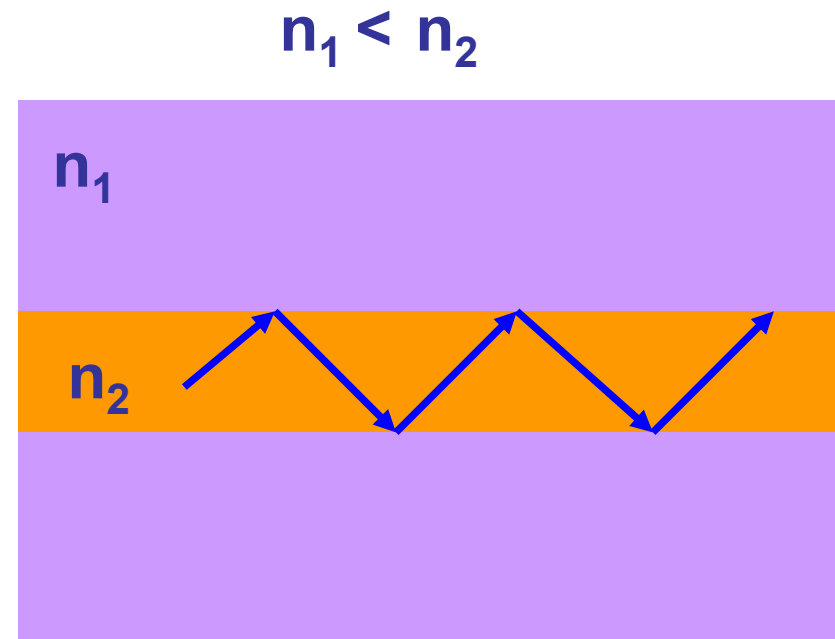
Totale Interne Reflectie

- bij overgang van materiaal met hoge brekingsindex naar materiaal met lagere brekingsindex
 - stralen die zeer schuin invallen, worden volledig gereflecteerd
- = Totale Interne Reflectie

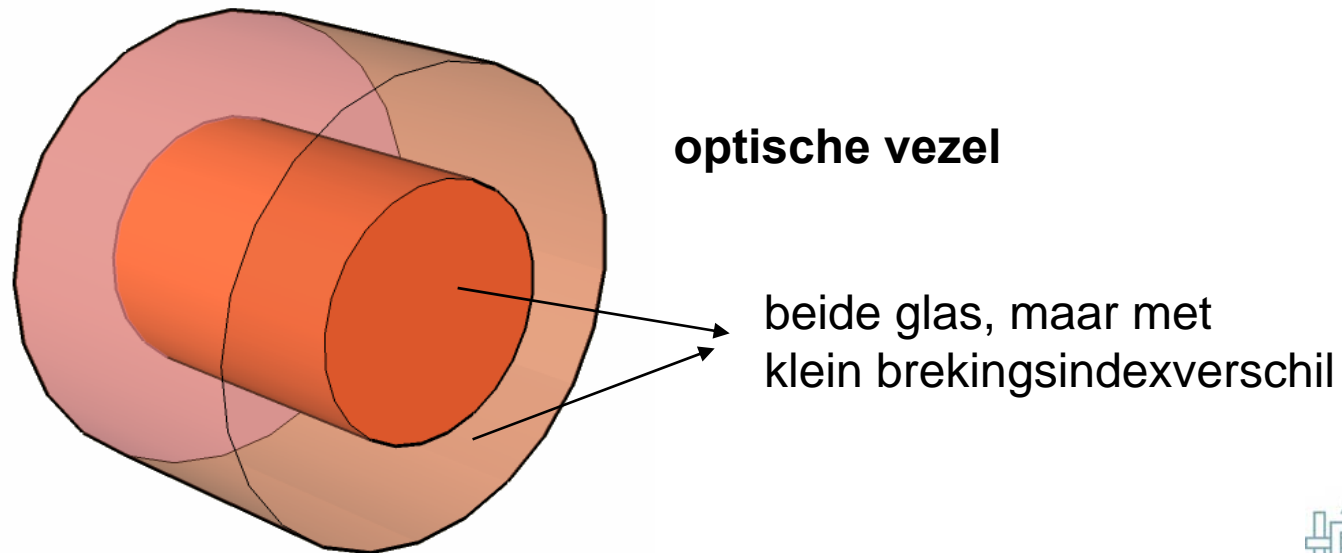
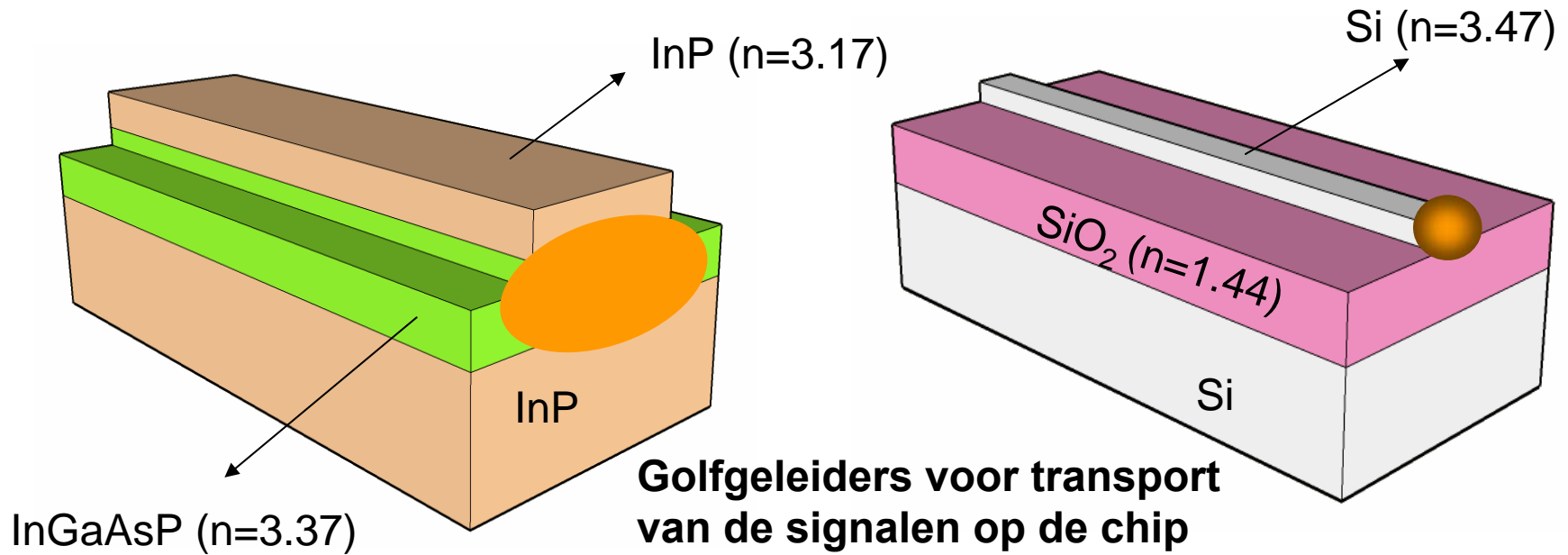


Golfgeleider

- materiaal met hoge brekingsindex omgeven door materiaal met lage brekingsindex
- licht blijft opgesloten in materiaal met hoge brekingsindex (door totale interne reflectie)
- hoe hoger het brekingsindexverschil, hoe efficiënter de opsluiting, en hoe compacter de golfgeleiders.



Voorbeelden



InP gebonde membranen

- Vele materialen mogelijk voor fotonische geïntegreerde circuits :

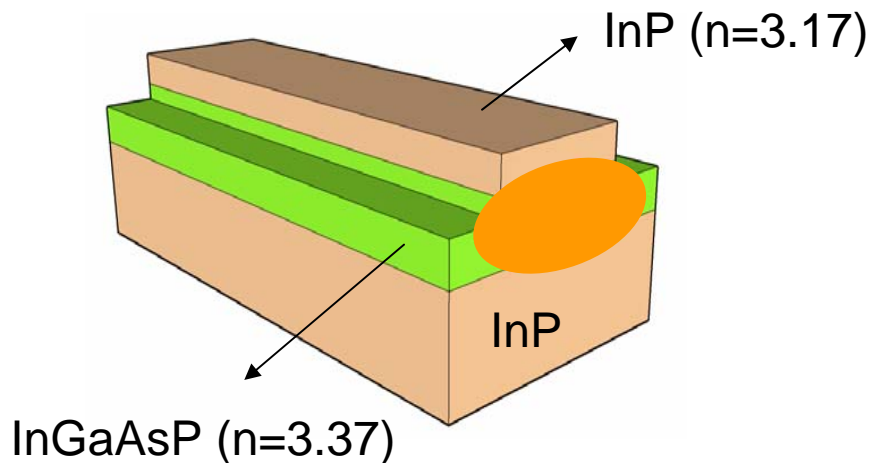
- * glas
- * silicium : werkpaard van de elektronica
- * III-V halfgeleiders : bv. GaAs, InP

	1A																		0	
1	H																			He
2	Li	Be																		
3	Na	Mg																		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
6	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
7	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110										

* Lanthanide Series	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
+ Actinide Series	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

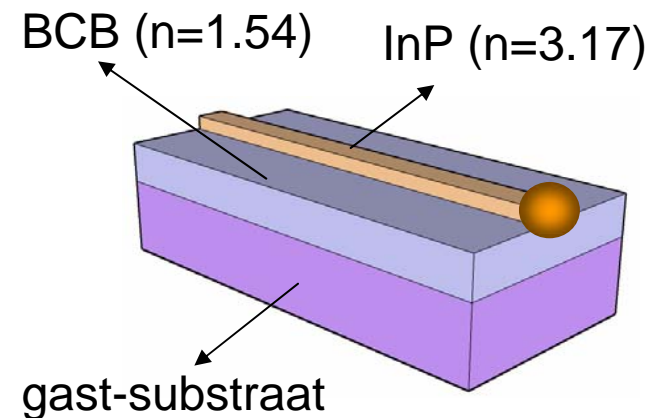
InP gebonde membranen

- Voor telecom toepassingen is InP zeer geschikt: lichtbronnen (laser), versterkers, detectoren, golfgeleiders, ...



klassieke InP golfgeleider

- brekingsindexcontrast 3.37:3.17
- minder goede opsluiting van licht
- minder compacte structuren



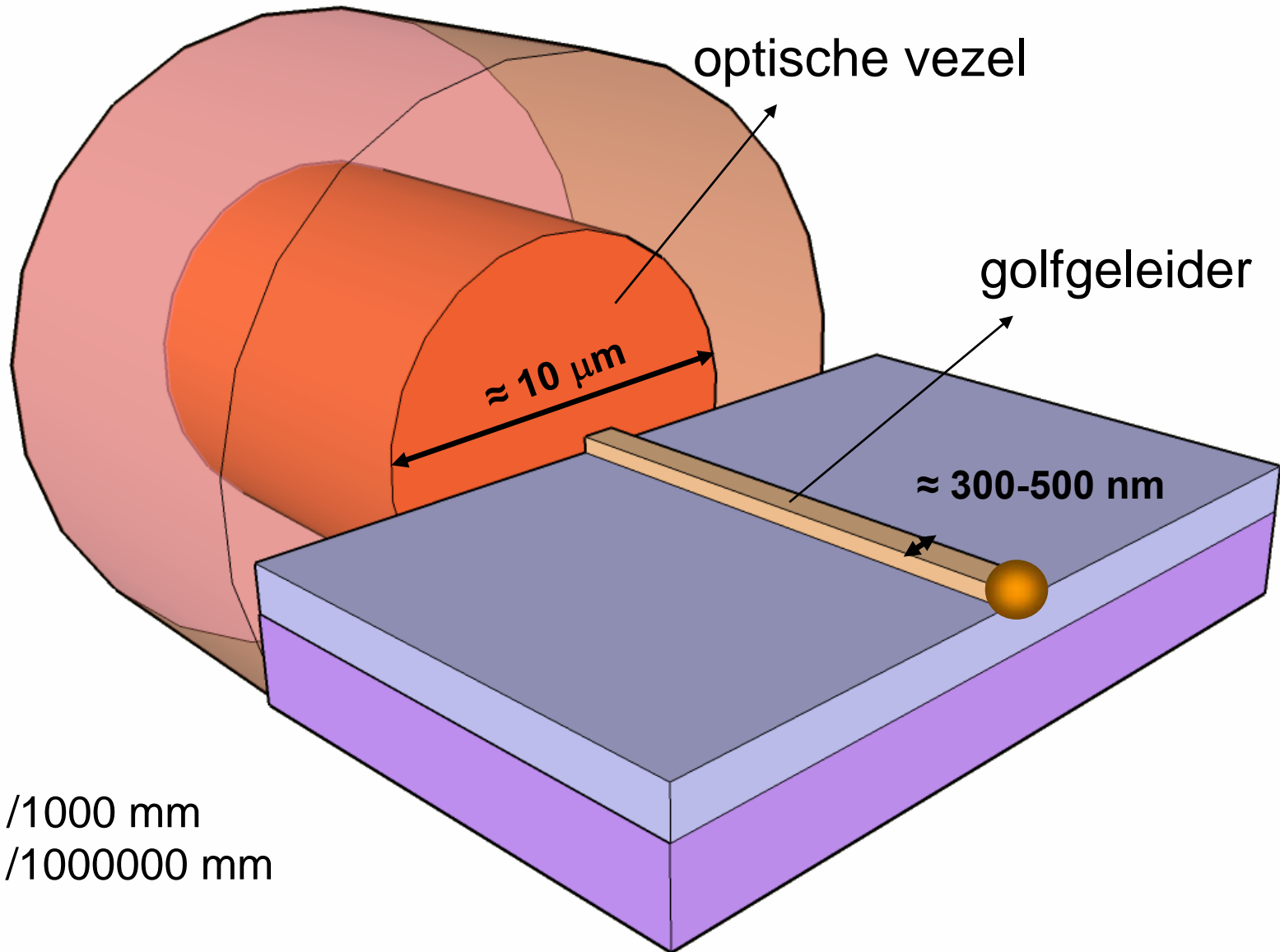
InP gebonde membraan golfgeleider

- brekingsindexcontrast 3.17:1.54 (1)
- zeer goede opsluiting van licht
- zeer compacte structuren

Overzicht

- Inleiding :
- **Het koppelprobleem**
 - **wat zijn vezelkoppelaars ?**
 - **hoe maak je die ?**
 - **met hoge efficiëntie en zeer compact**
 - **voorbeeld van een geïntegreerd circuit**
- **Het polarisatieprobleem**

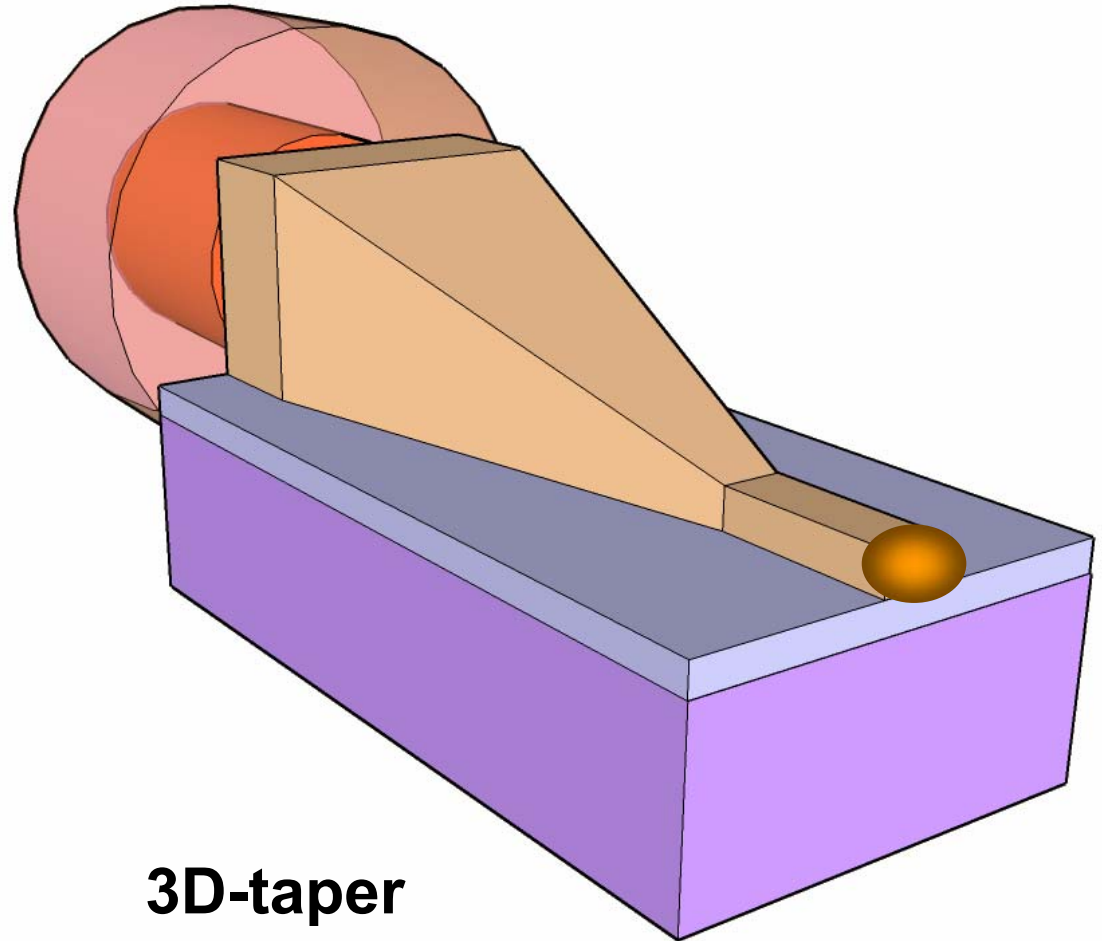
Het koppelprobleem



$1 \mu\text{m} = 1/1000 \text{ mm}$

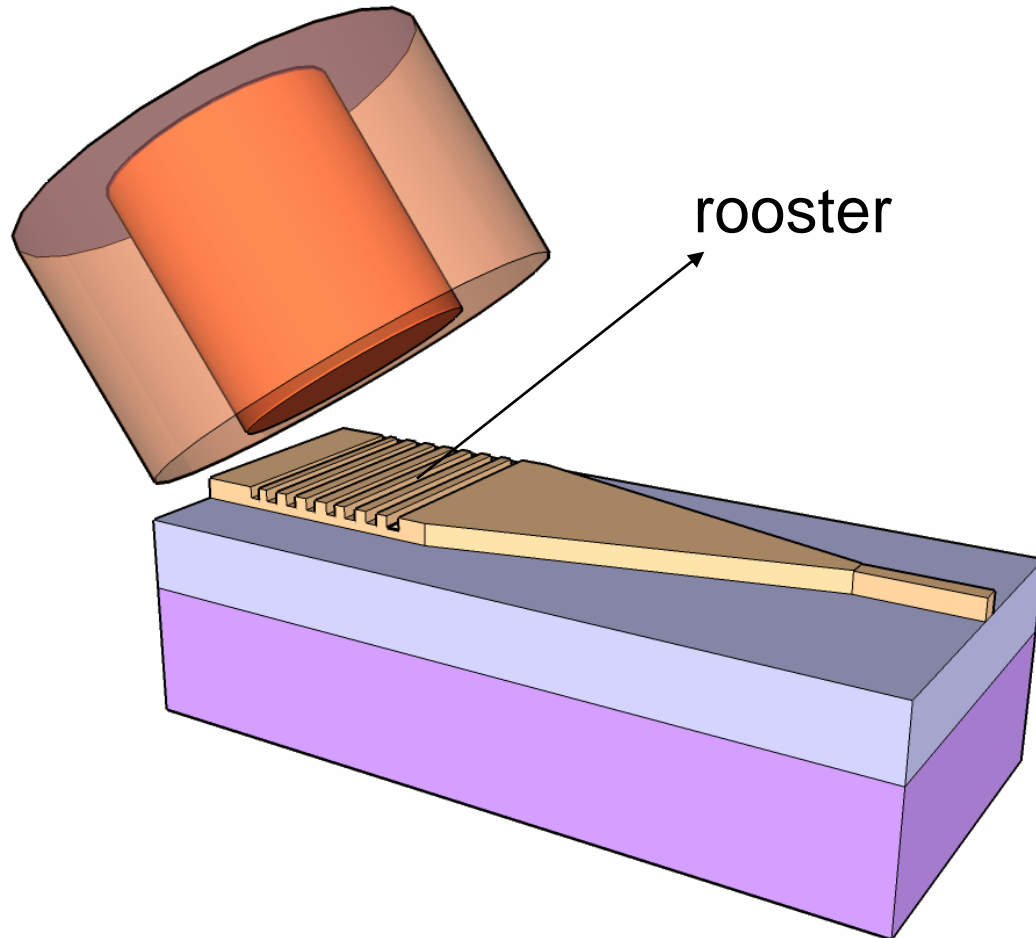
$1 \text{ nm} = 1/1000000 \text{ mm}$

Koppelstructuur is vereist



**3D-taper
uiterst moeilijk**

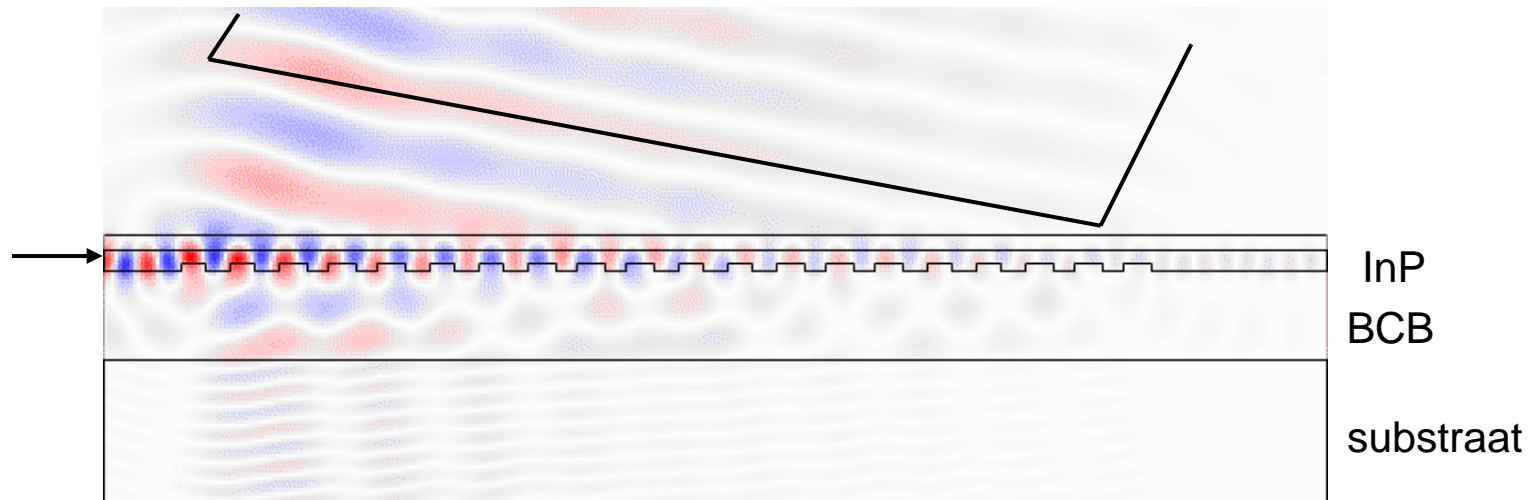
Koppeling met diffractierooster



vertikale inkoppeling

***laterale taper voor overgang van brede
naar smalle golfgeleider***

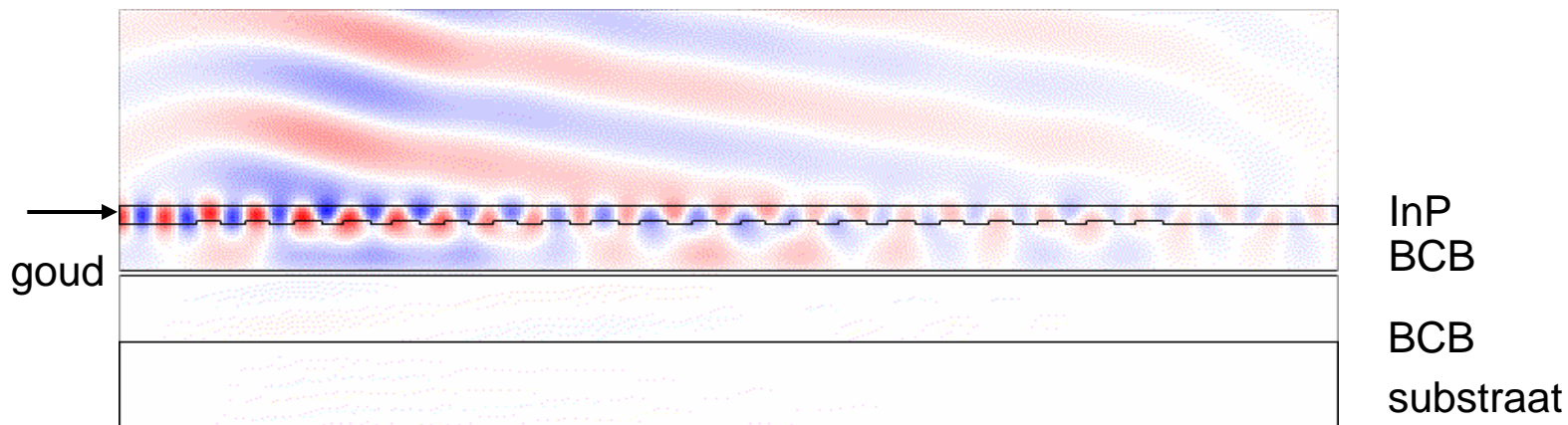
Hoge koppelaar-efficiëntie



THEORIE

**40%
efficiëntie**

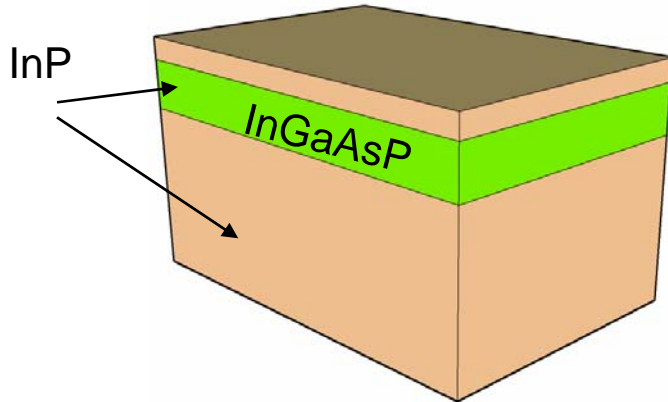
*Diffractie naar het substraat = verlies
te vermijden via bodemspiegel*



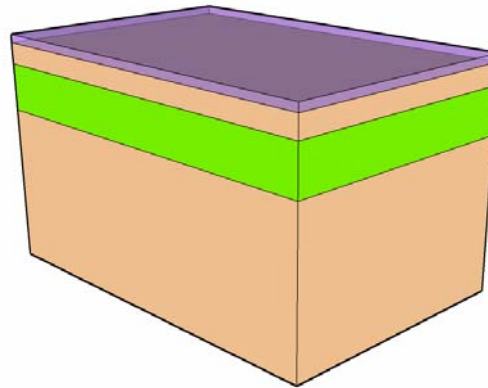
**78%
efficiëntie**

Hoe maak je roosters ?

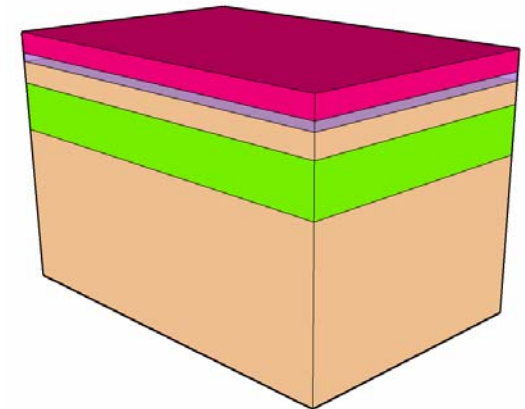
klassieke InP structuur



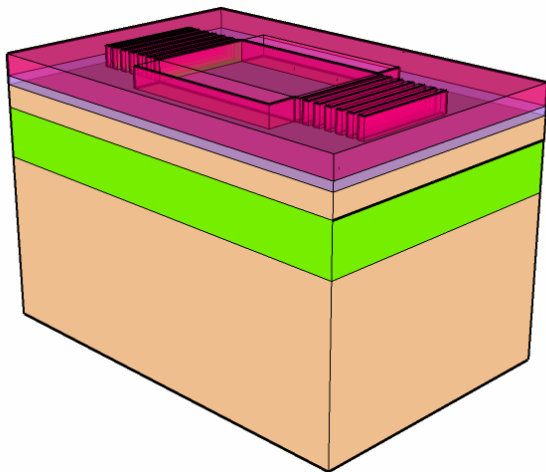
depositie hard mask



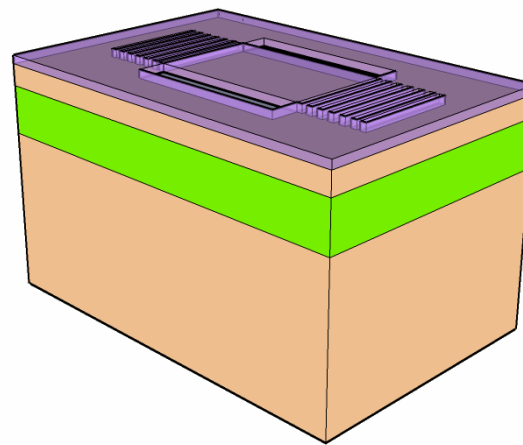
depositie e-beam resist



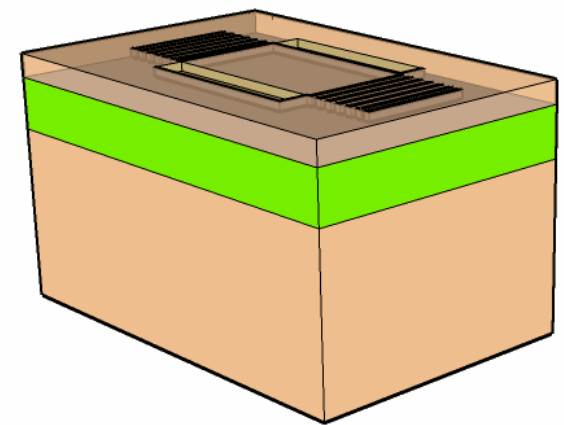
e-beam lithografie



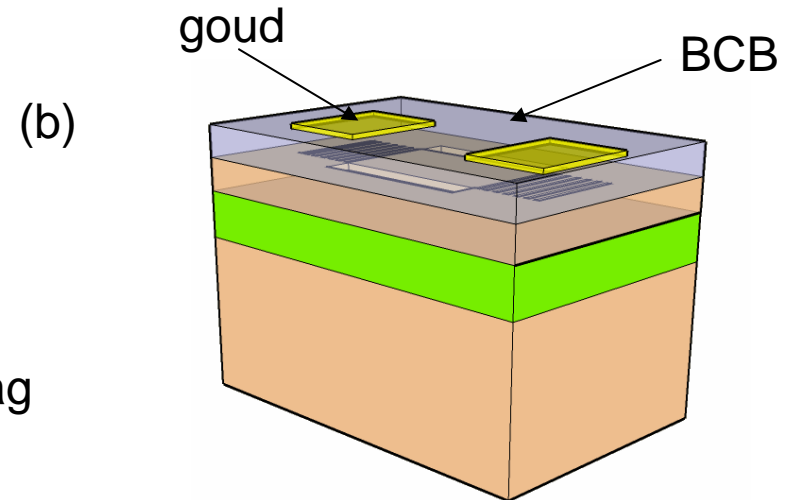
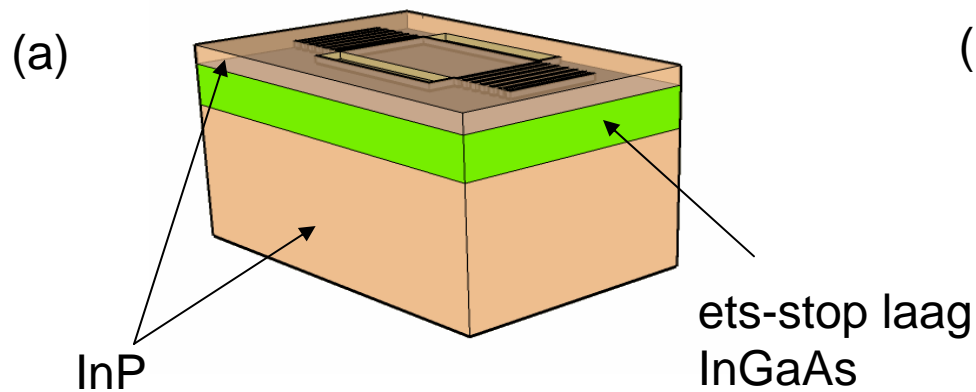
transfer naar hard mask
verwijderen resist



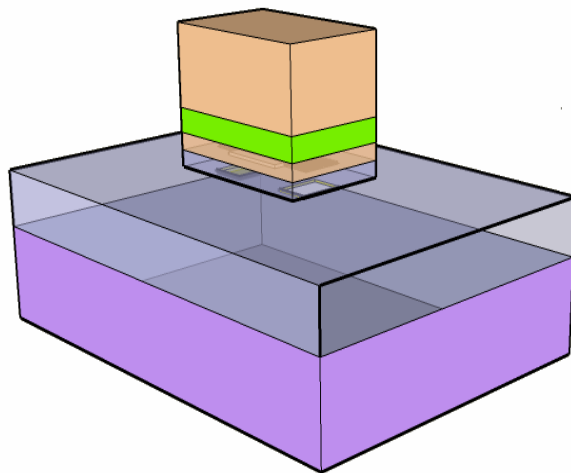
etsen van de structuur
verwijderen hard mask



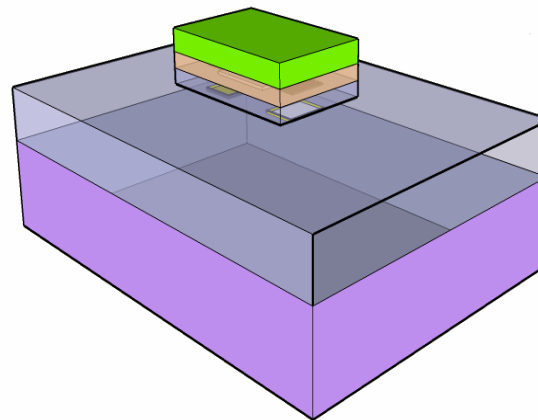
Hoe maak je InP-membranen



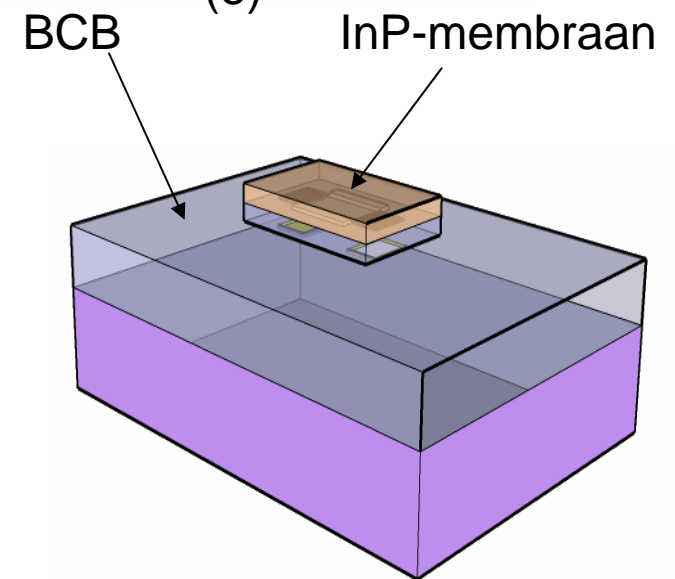
(c) Bonding step



(d)



(e)



Fabricage in Clean Room



Circulatie van lucht om stofdeeltjes te vermijden



Enkele toestellen



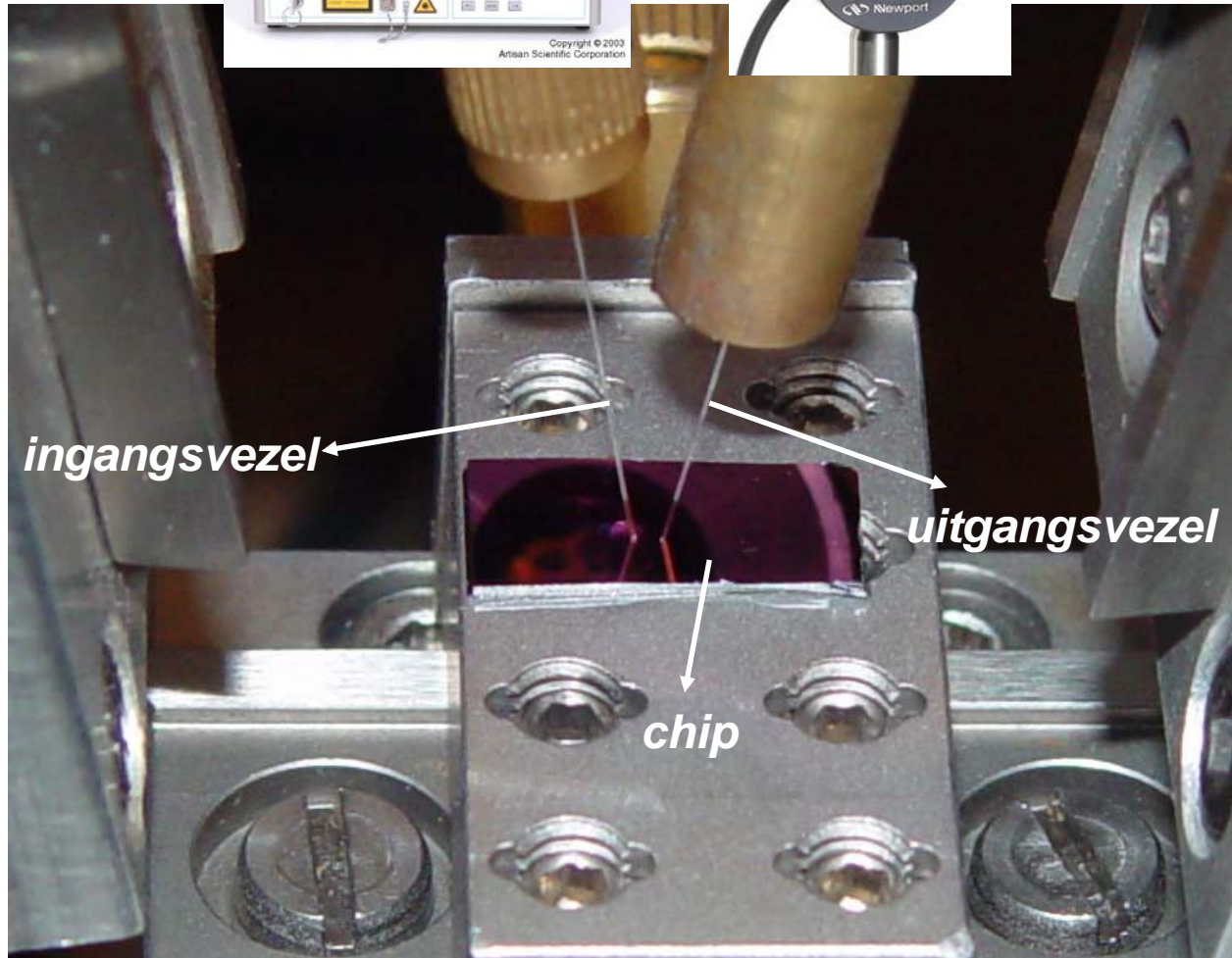
*nanotechnologie vereist
geavanceerde toestellen*

Meetopstelling

laser



detector

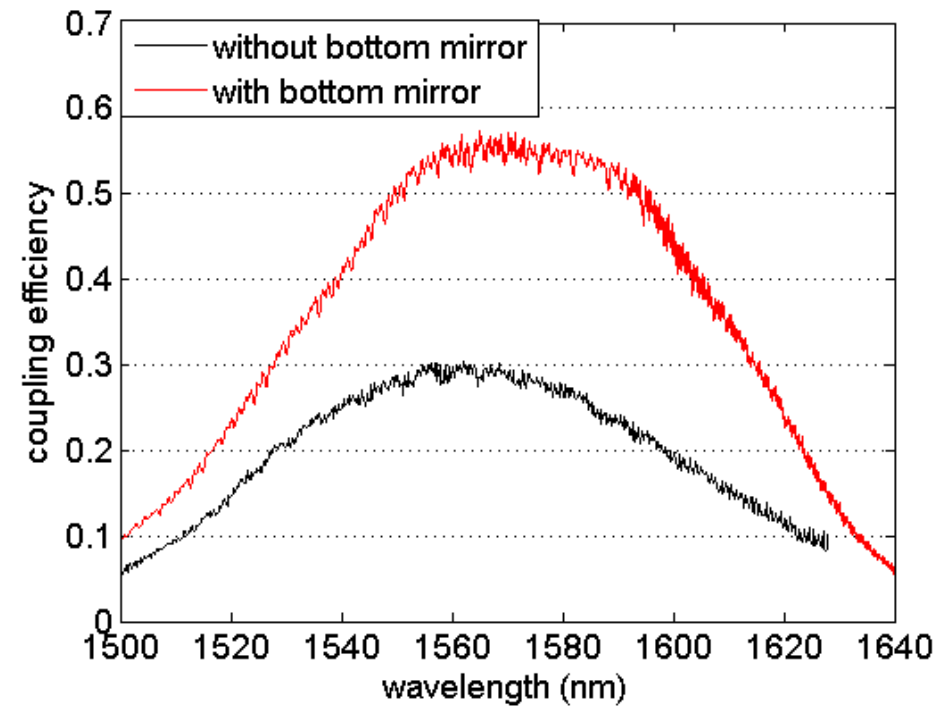
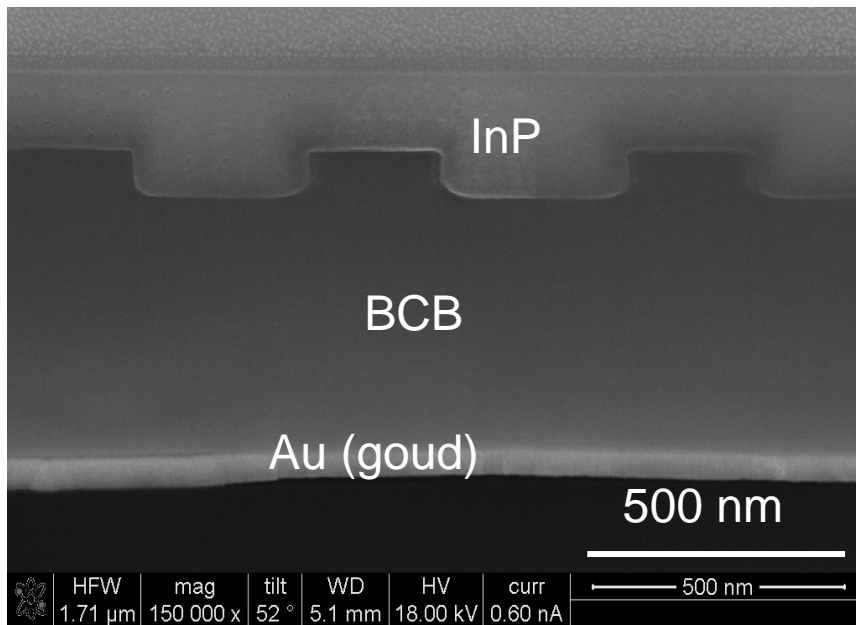


ingangsvazel

uitgangsvazel

chip

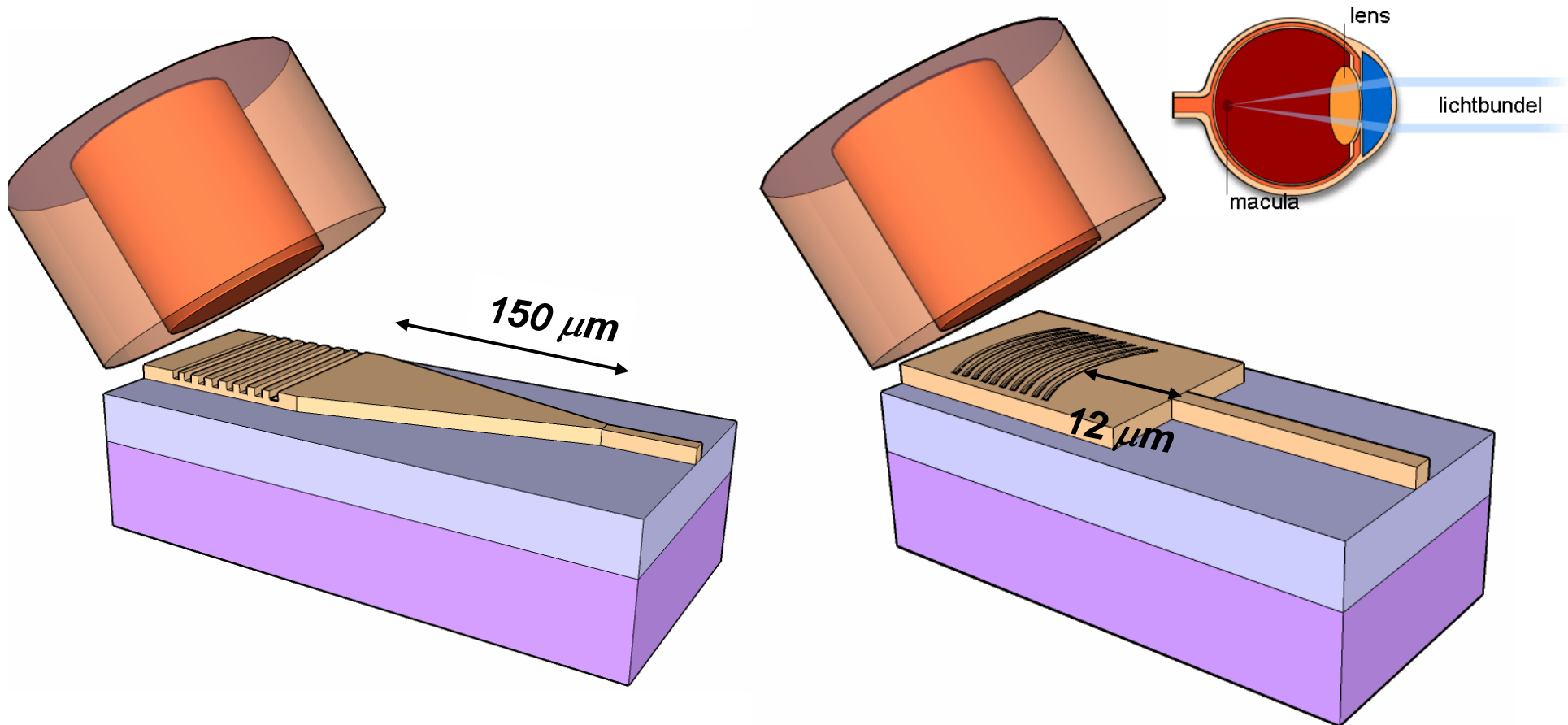
Experimenteel



**Experimentele efficiëntie tot 60% voor InP-membraan
(= verdubbeling t.o.v structuur zonder spiegel)**

Zelfs 69% voor Silicium chips.

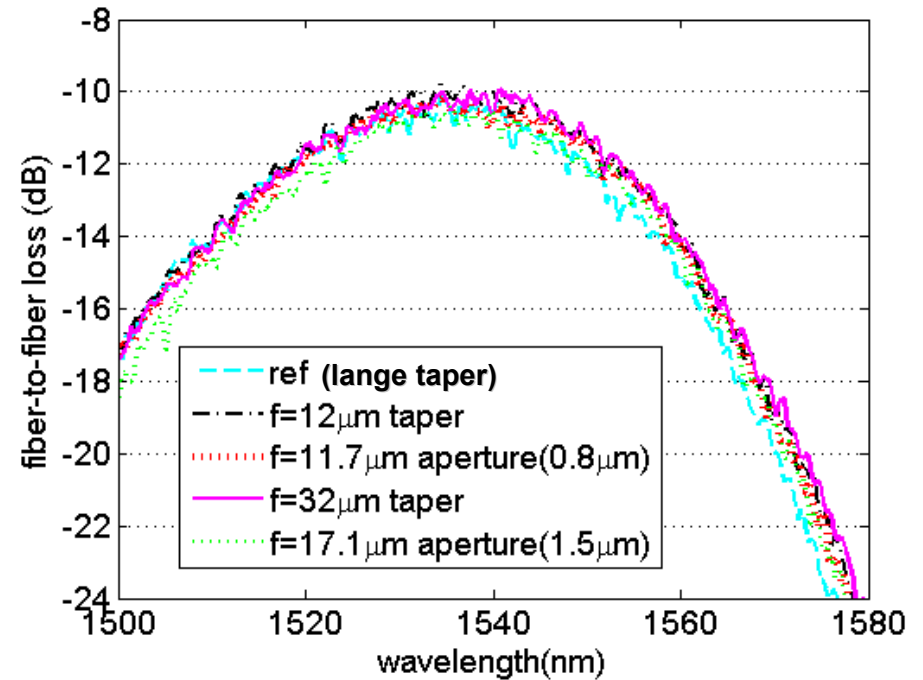
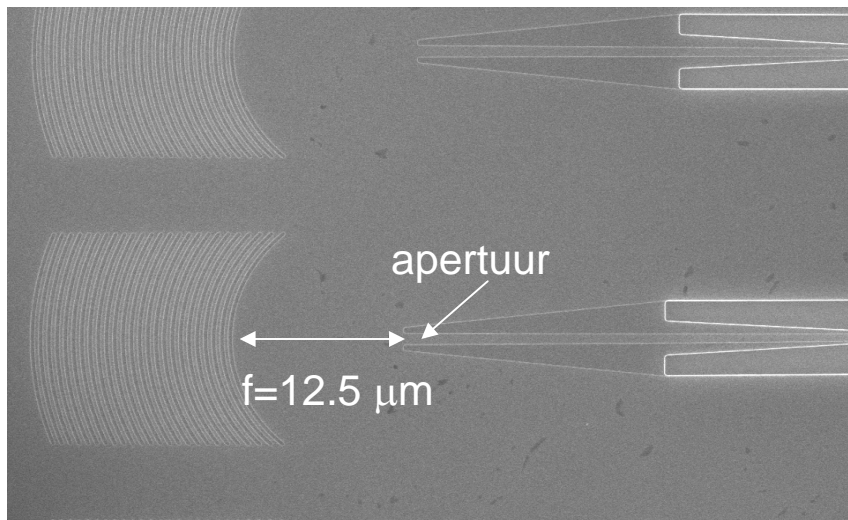
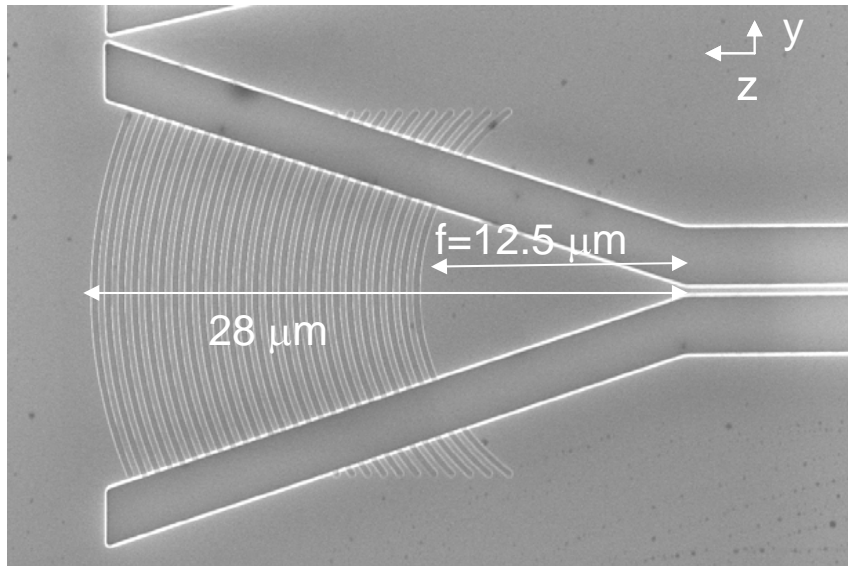
Compacte structuren



Lange taper nodig voor overgang van brede naar smalle golfgeleider (indien niet : verlies)

Het licht wordt gefocusseerd op de smalle golfgeleider

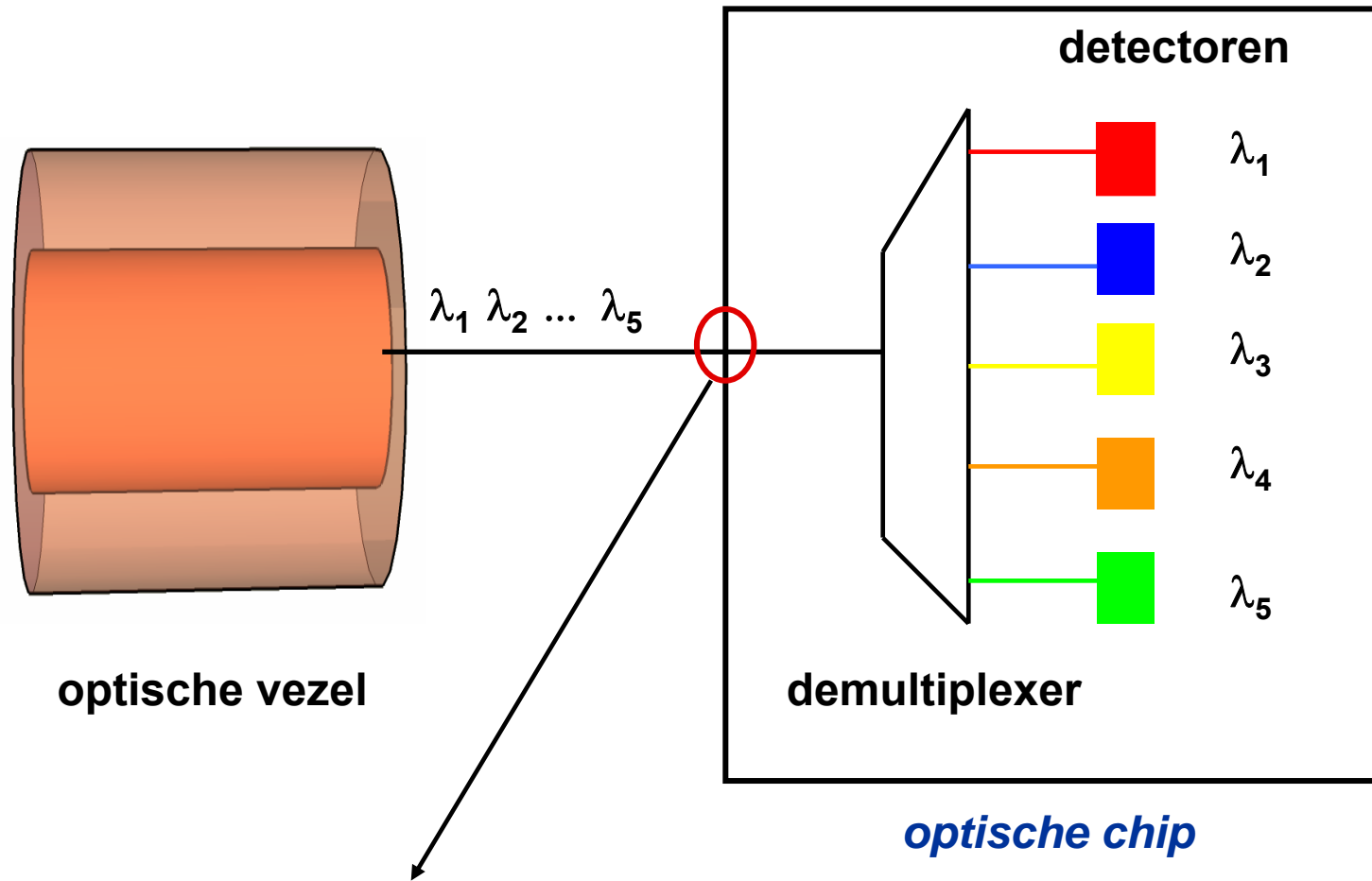
Experimenteel



Koppelstructuur wordt 8 keer compacter in de propagatierichting van het licht (z-richting),

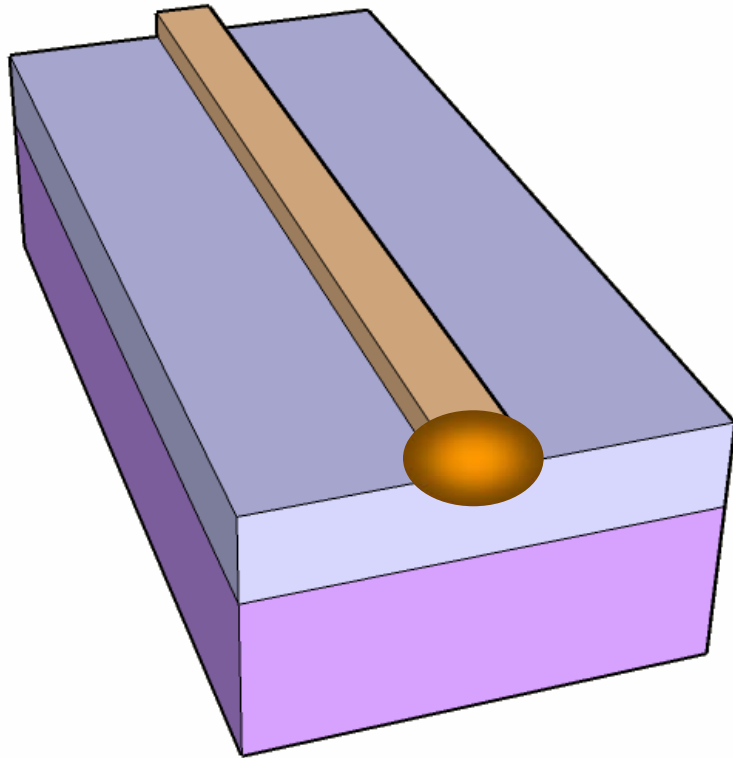
Zonder verlies van efficiëntie

Voorbeeld van geïntegreerd circuit

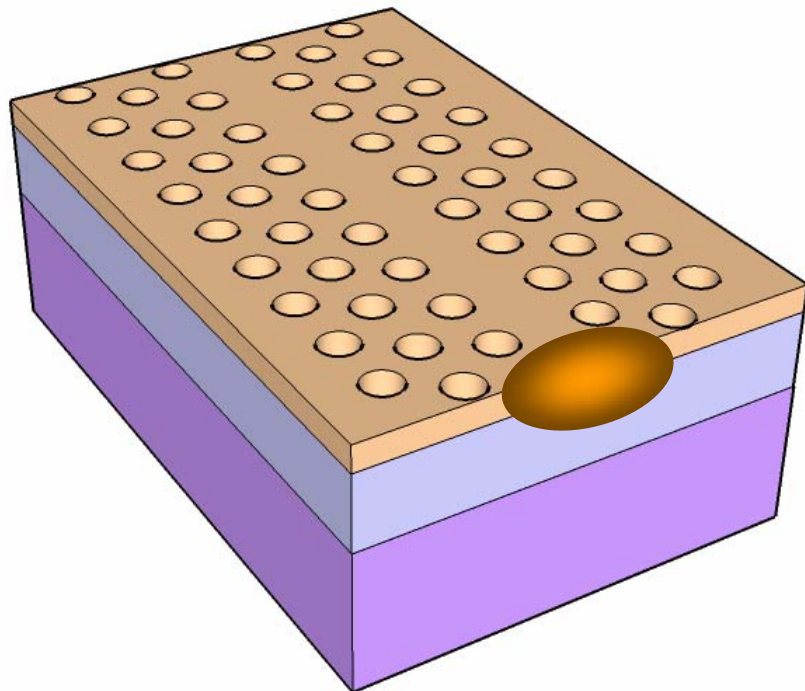


**Koppeling vezel-golfgeleider
via rooster**

Fotonische kristallen

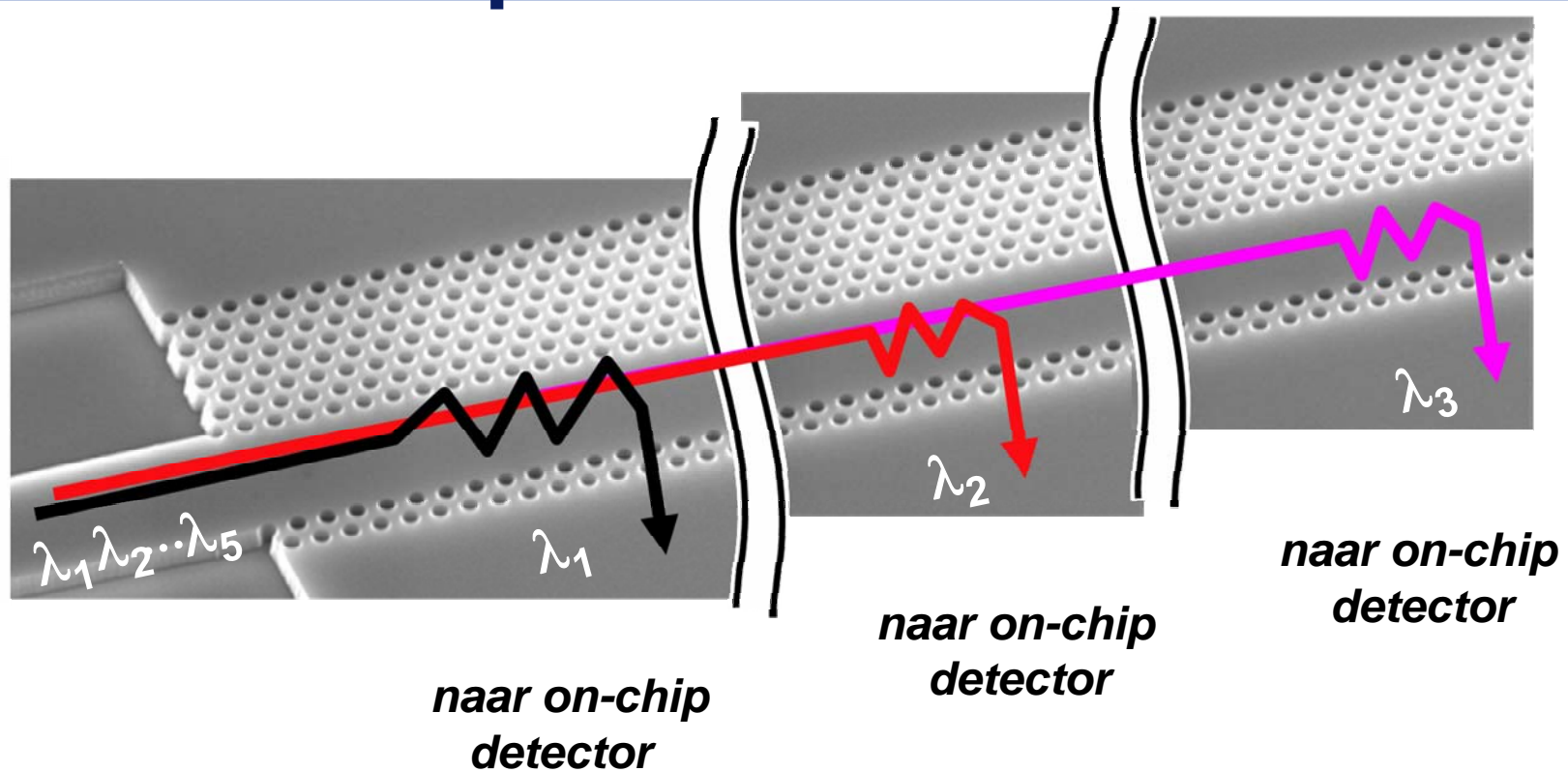


- *Klassieke golfgeleider*
- *Opsluiting van licht :*
VERTIKAAL : totale interne reflectie
LATERAAL : totale interne reflectie



- *Fotonisch kristal golfgeleider*
- *Opsluiting van licht*
VERTIKAAL : totale interne reflectie
LATERAAL : fotonische bandgap
(door gaatjes)

Demultiplexer

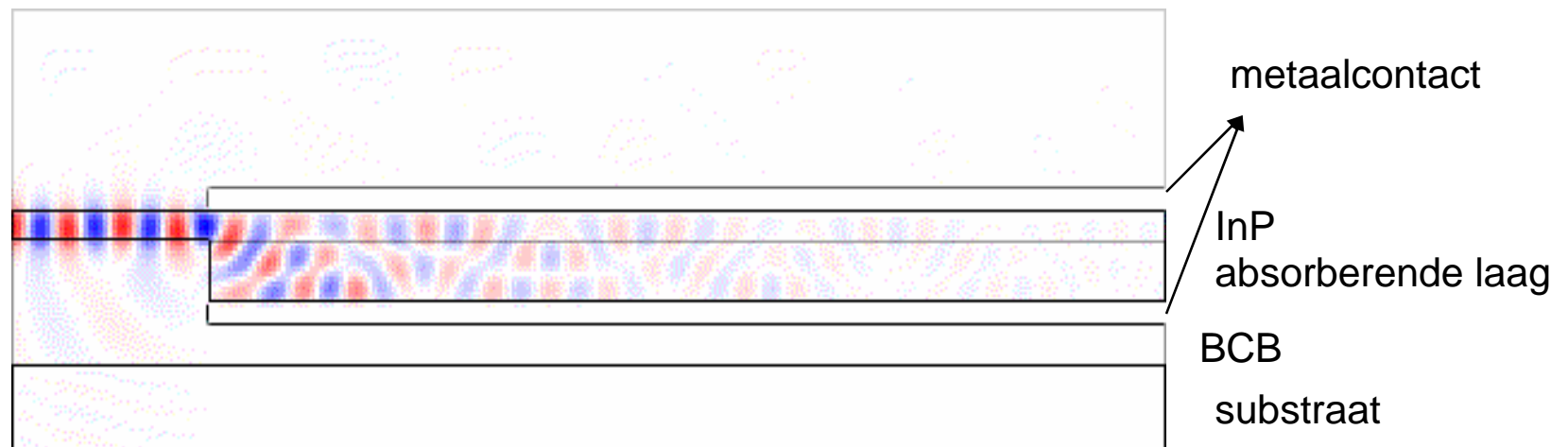


- *Verandering van de breedte van de golfgeleider zorgt ervoor dat verschillende golflengtes uitgekoppeld worden*

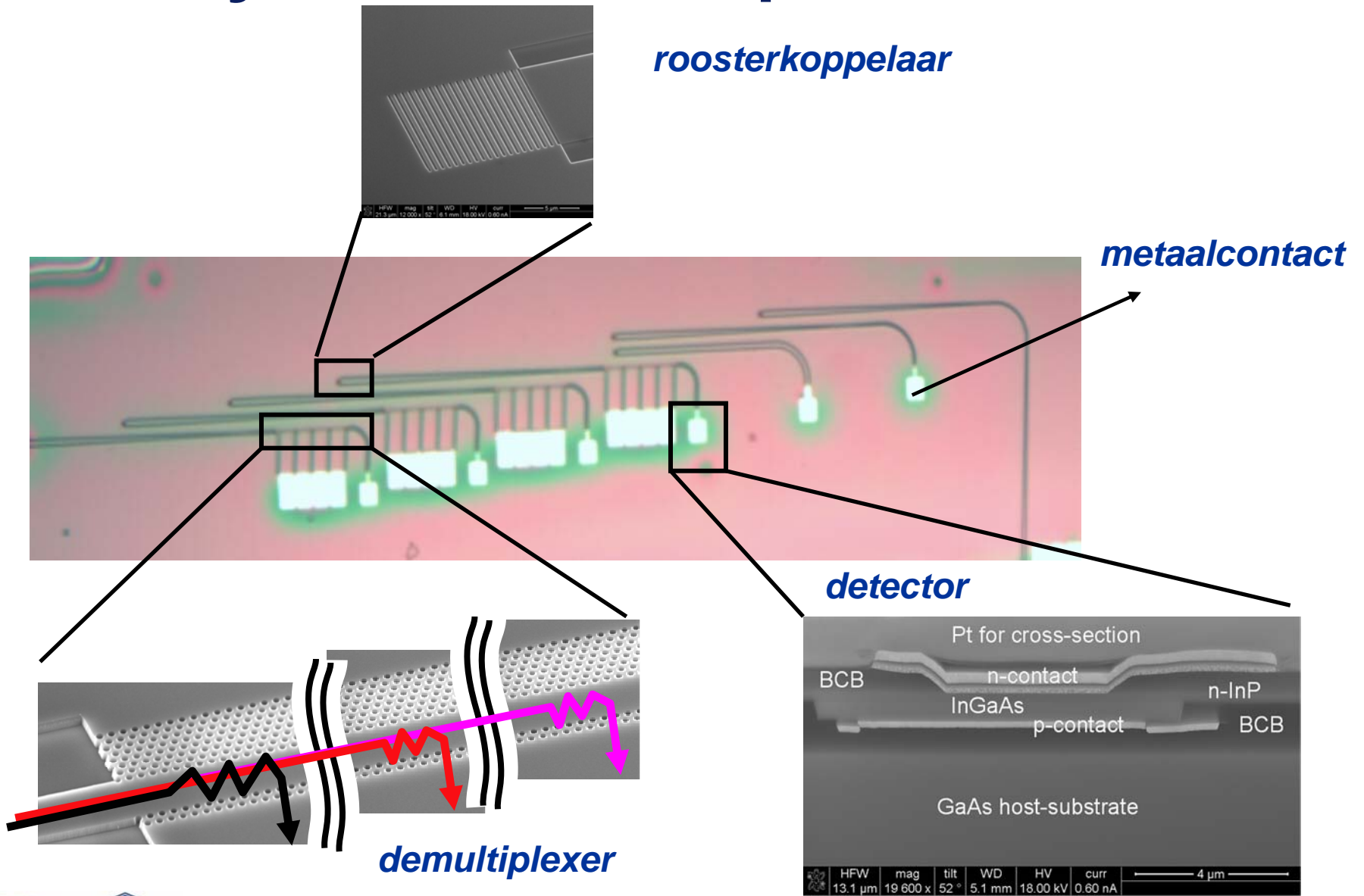
- *uitkoppeling wordt veroorzaakt door het fotonisch kristal*

Detector

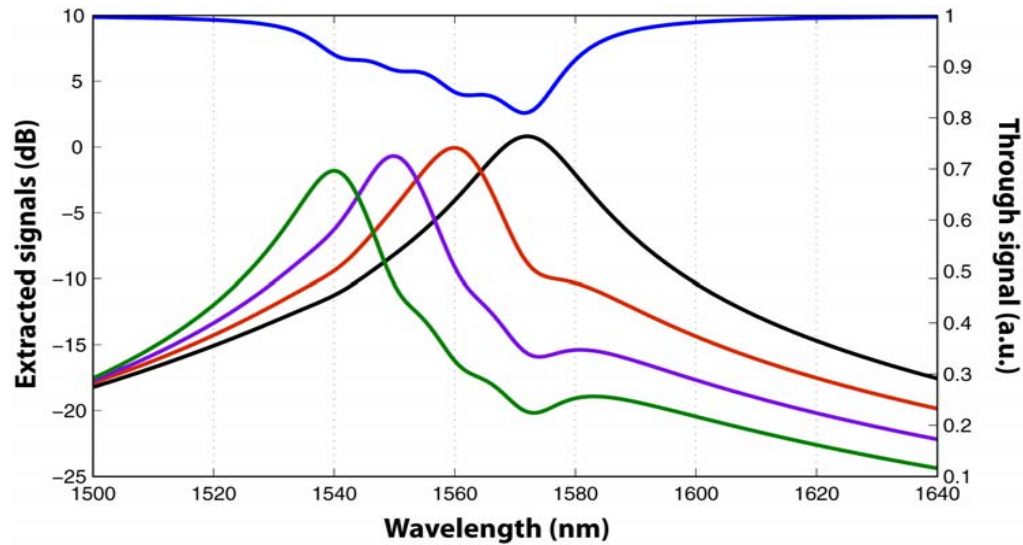
- Principe : licht wordt geabsorbeerd en genereert een elektrische stroom, afvoeren via metaalcontact
- Grootte van de stroom is een maat voor de hoeveelheid licht.



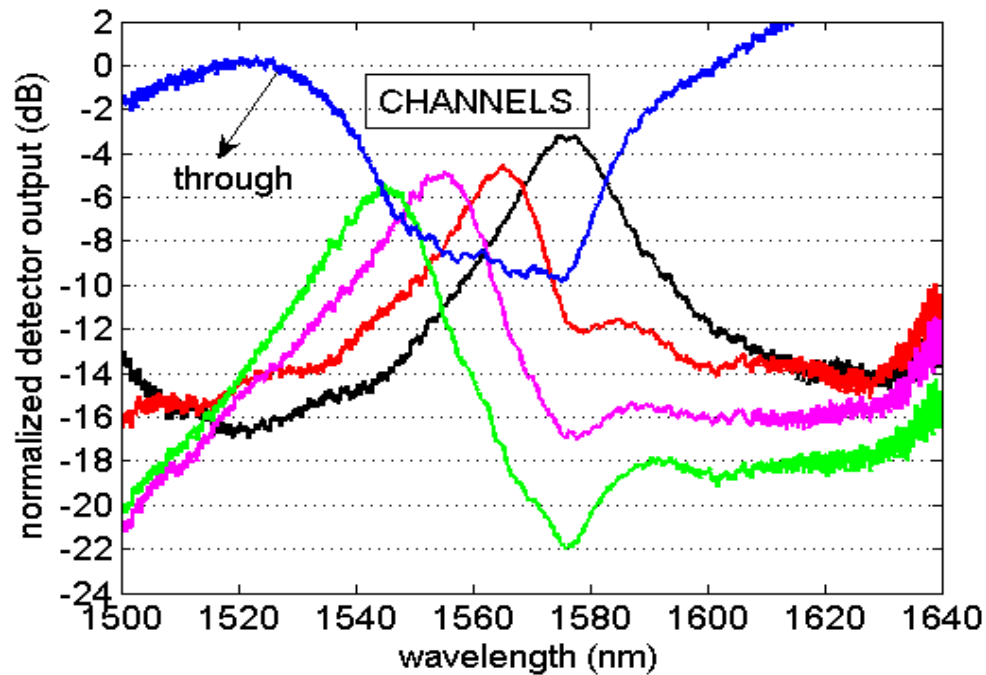
Layout van de chip



Resultaat



Simulaties

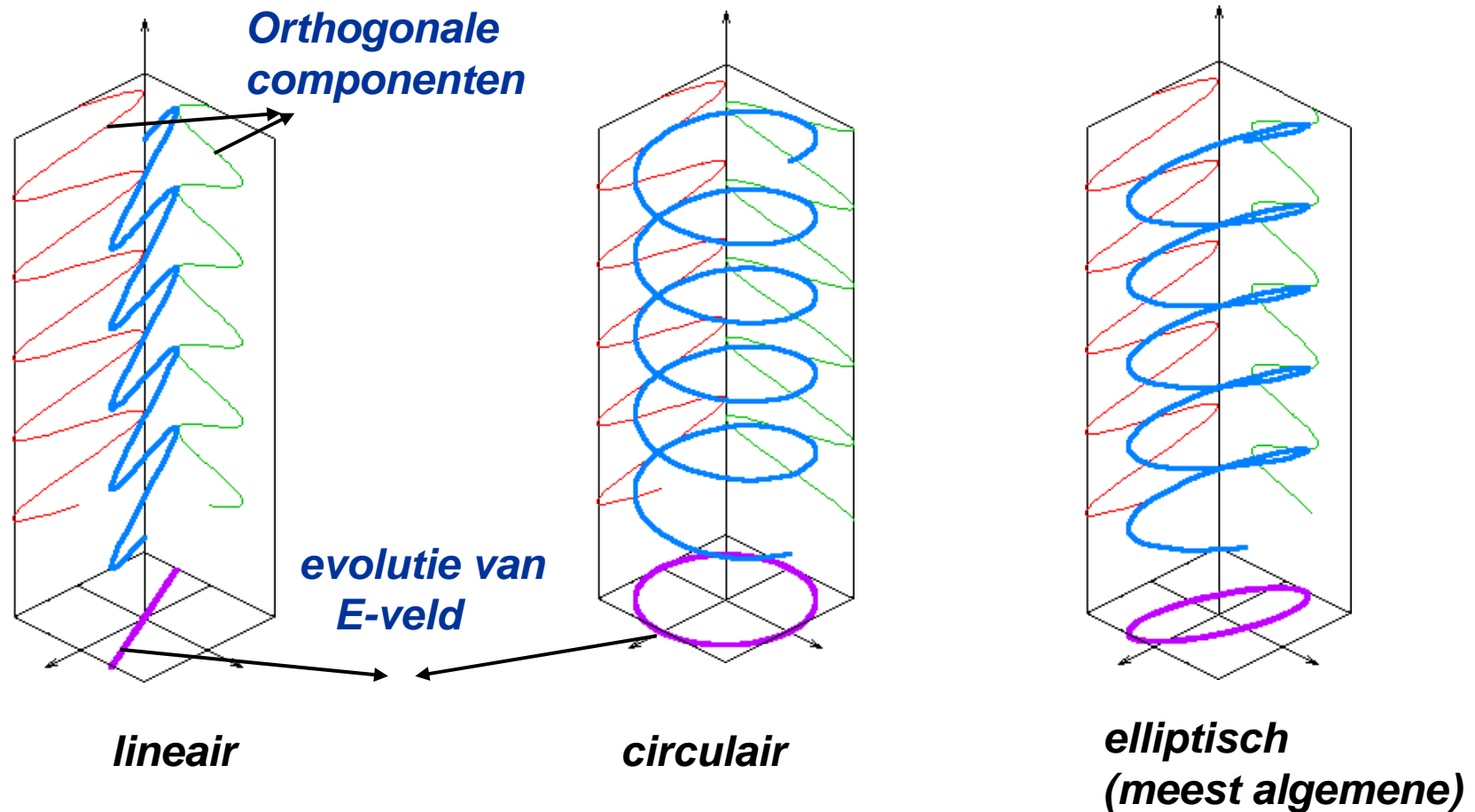


Experiment

Overzicht

- Inleiding :
- Het koppelprobleem
- **Het polarisatieprobleem**
 - **2D roosterkoppelaars**
 - **voorbeelden van fotonisch geïntegreerde circuits**

Herhaling polarisatie



Elke polarisatie kan geschreven worden als een lineaire combinatie van 2 loodrechte componenten

Het polarisatieprobleem

- **Polarisatie van licht in de vezel verandert :**
 - bochten
 - imperfecties

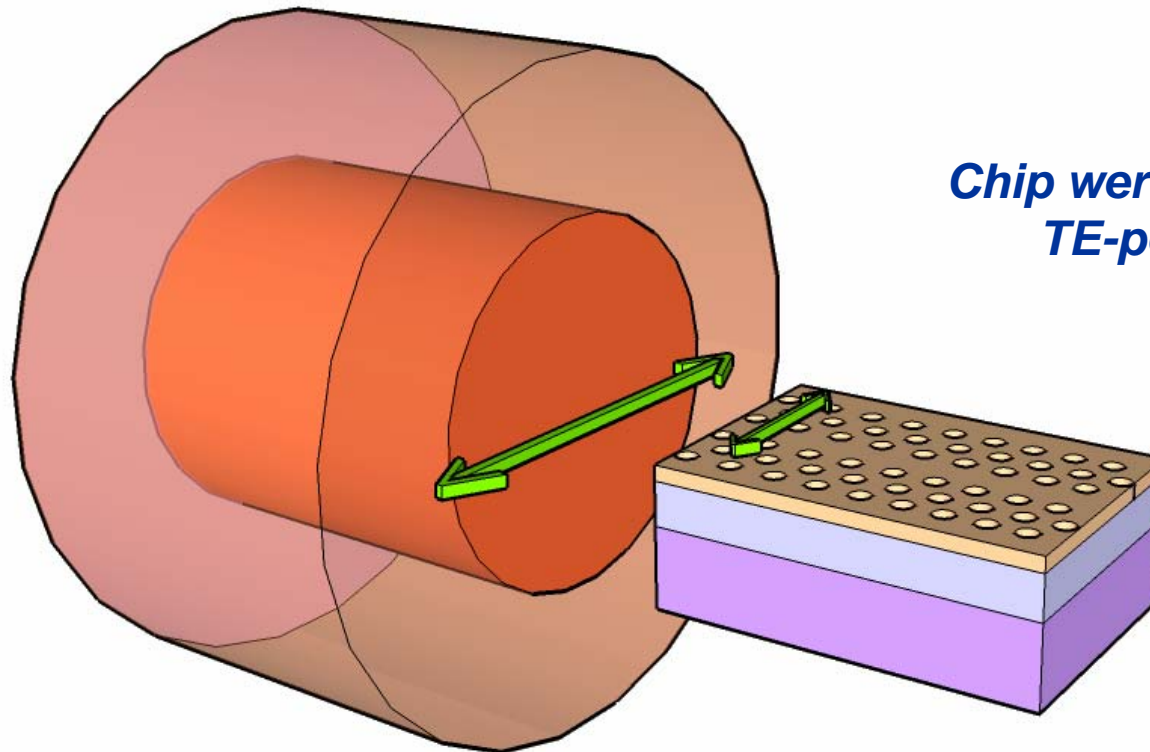
- **DUS : polarisatie van licht in de vezel is onbekend, en verandert in de tijd.**

- **DUS : componenten op de chip moeten werken voor alle mogelijke polarisaties van het licht.**

- **Dit is echter niet het geval !**

Het polarisatieprobleem

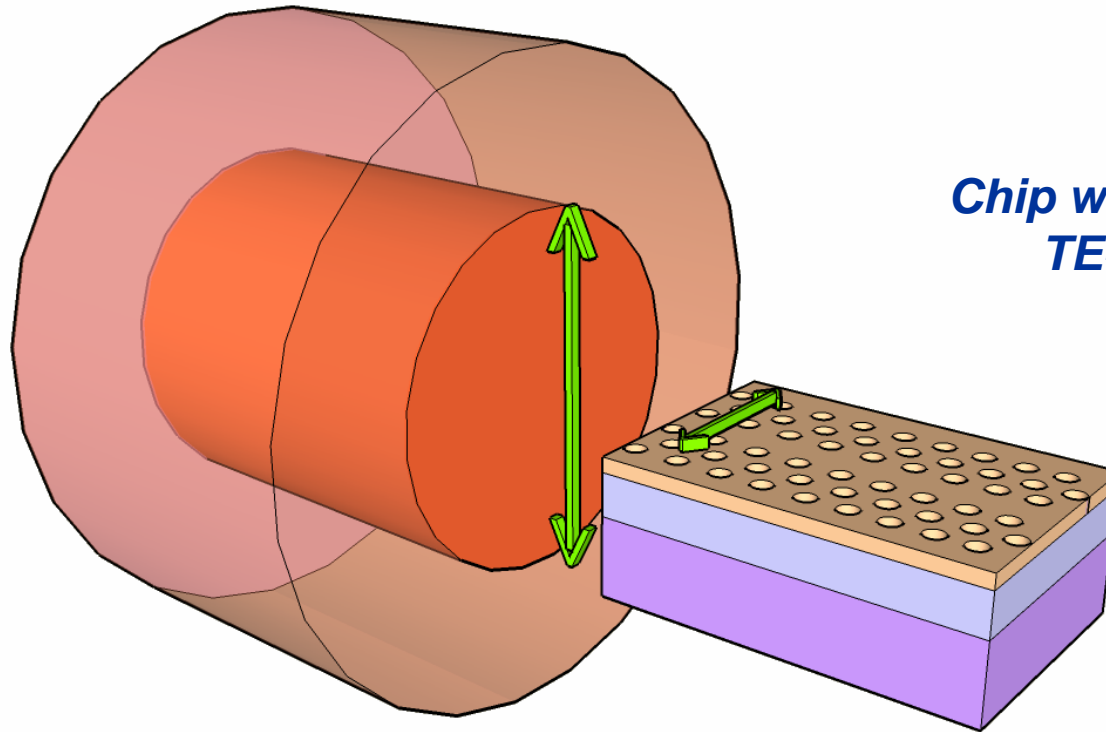
Veronderstel : horizontale polarisatie in de vezel



Polarisaties tussen licht uit de vezel en de polarisatie op de chip matchen, geen probleem

Het polarisatieprobleem

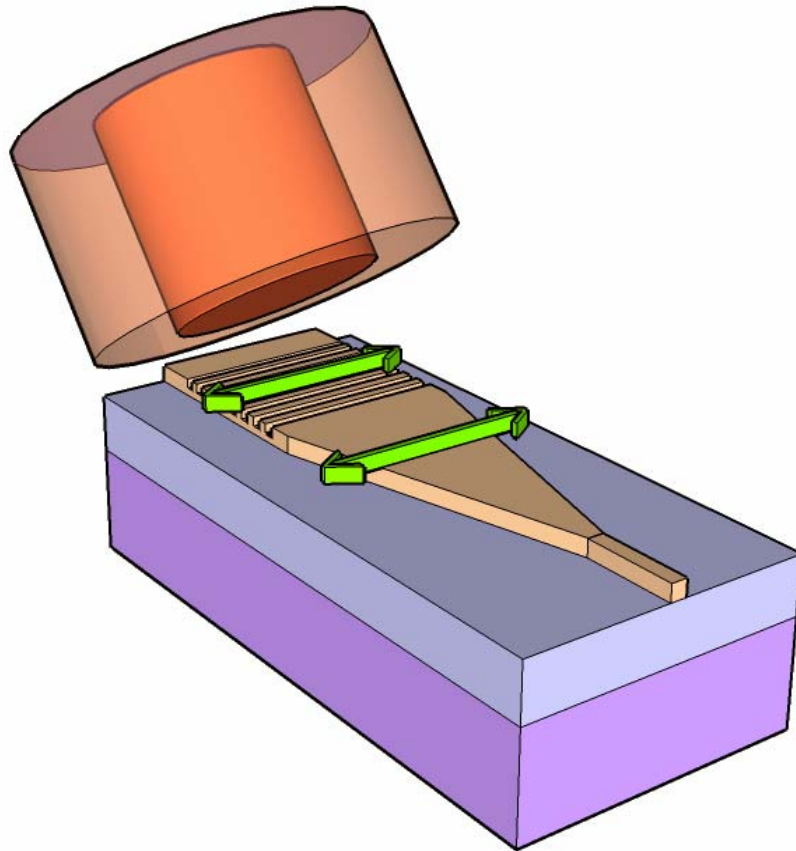
Door imperfecties, bochten, ... verandert de polarisatie, bv. vertikaal



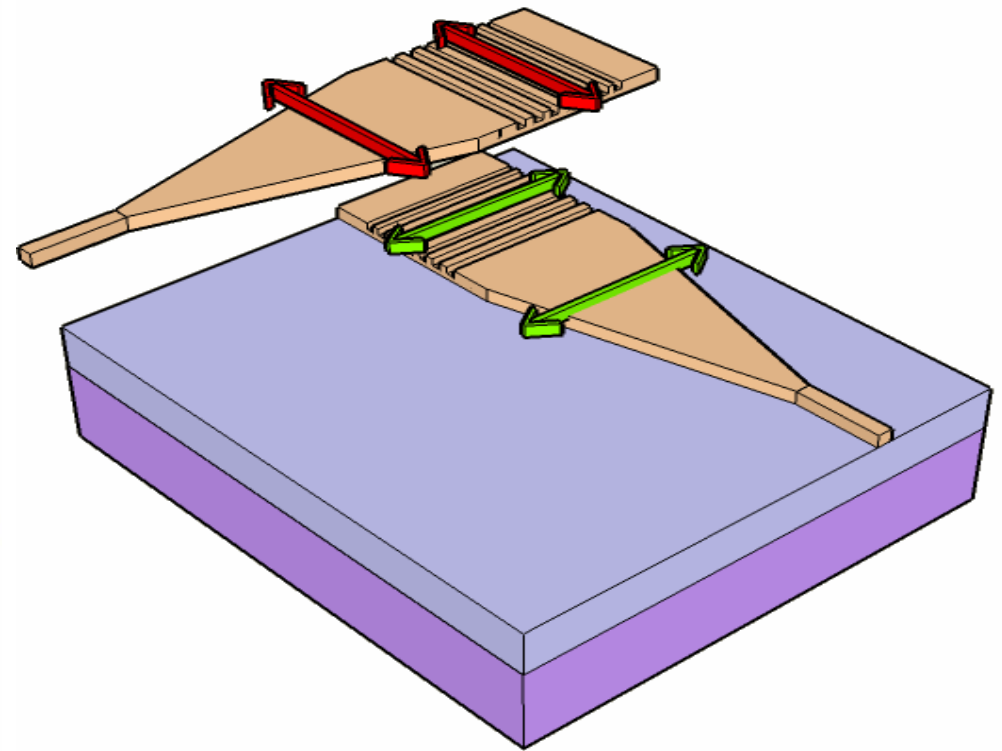
Chip werkt enkel voor TE-polarisatie

Polarisaties tussen licht uit de vezel en de polarisatie op de chip matchen niet meer, chip werkt niet

Polarisatie en roosterkoppelaars

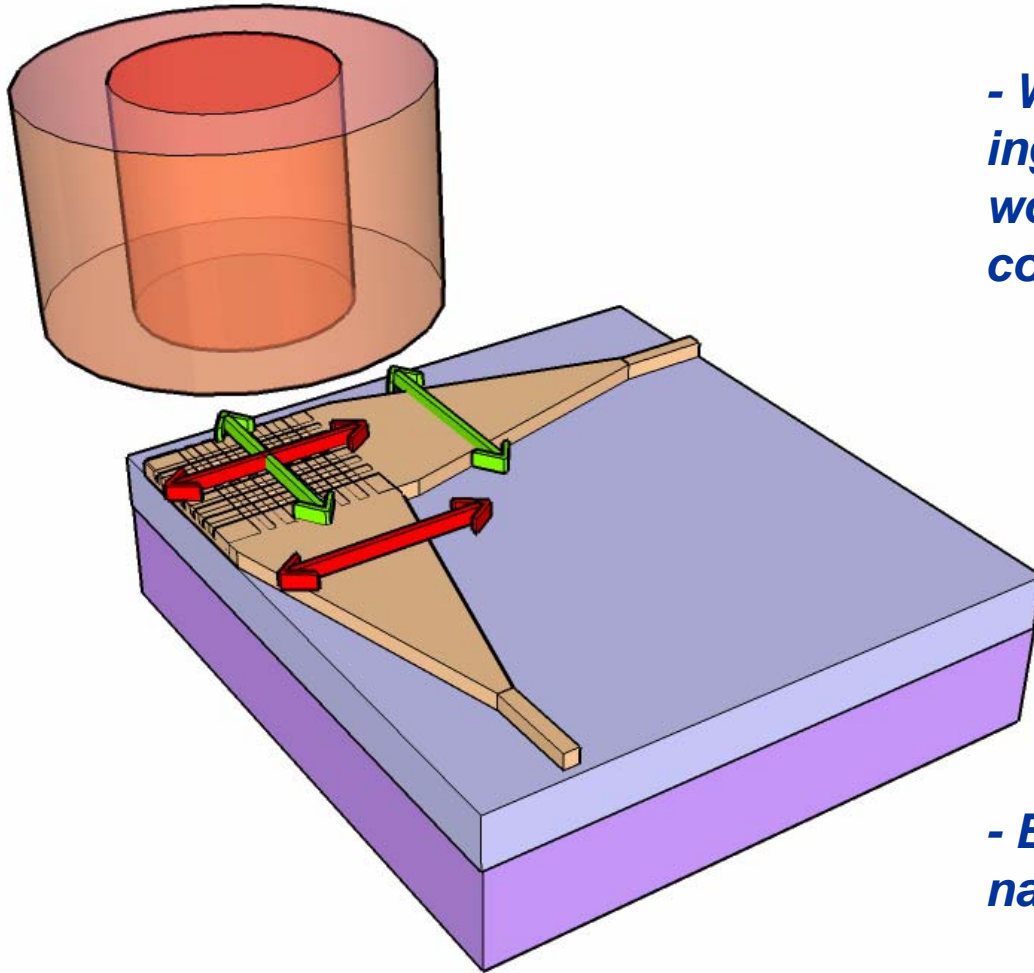


Gewone 1D roosterkoppelaar werkt voor 1 polarisatie. Hier polarisatie evenwijdig met de roosterlijnen (TE-polarisatie)



Overlap van 2 1D roosters (loodrecht op elkaar)

2D-roosterkoppelaar



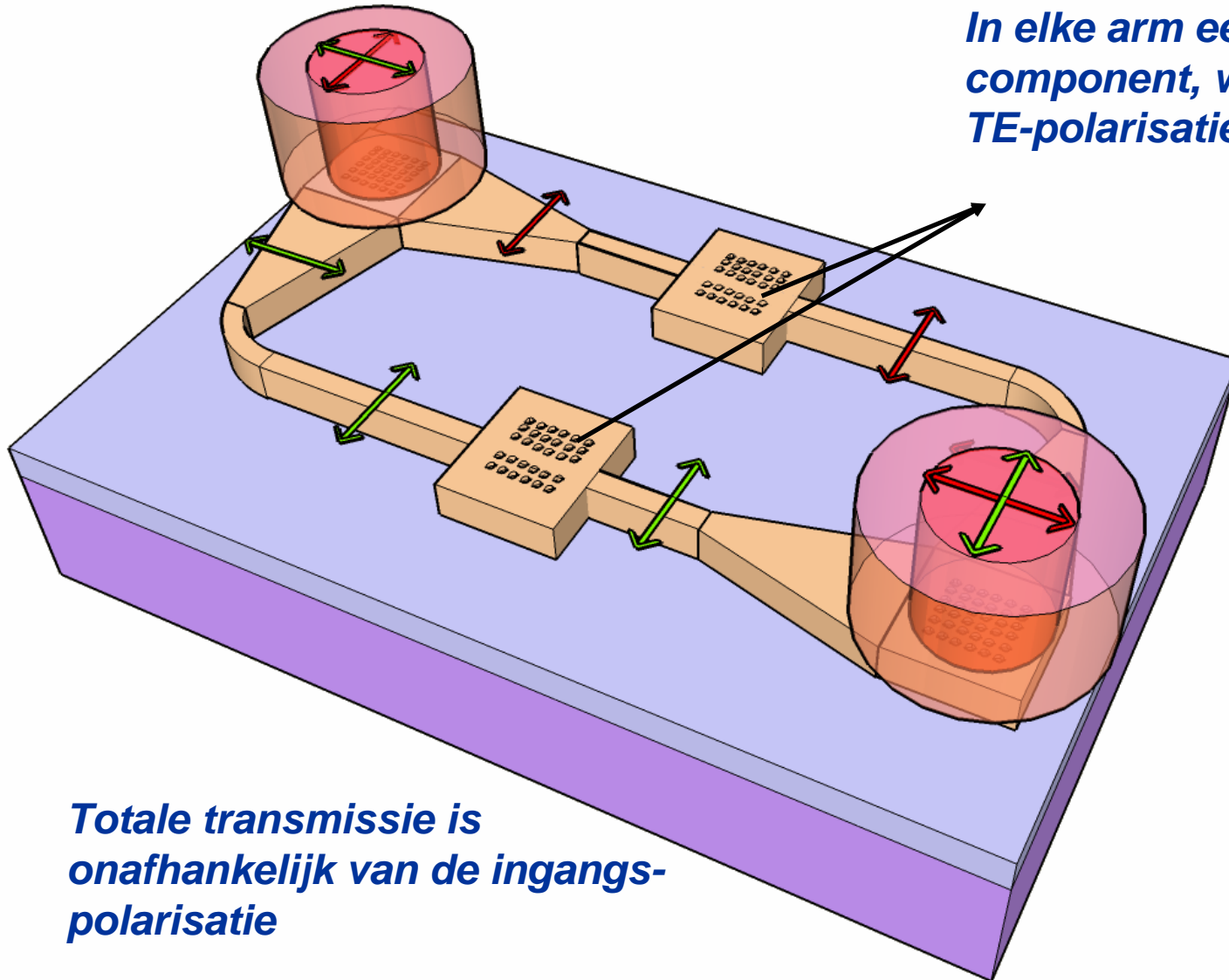
- We weten : elke willekeurige ingangspolarisatie kan ontbonden worden in 2 loodrechte polarisatie-componenten (rood en groen)

- Elke polarisatie-component koppelt naar een eigen golfgeleider

- In de golfgeleider is de polarisatie Identiek (TE-polarisatie)

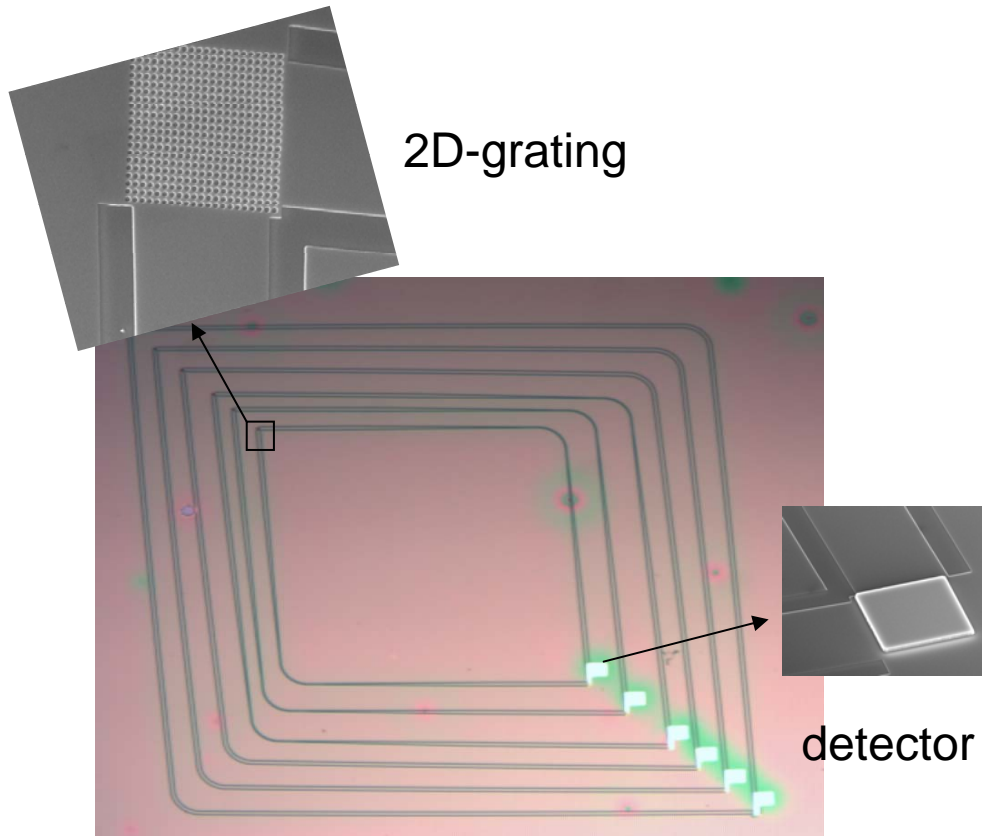
Polarisatie-diversiteit

In elke arm een identieke component, werkend voor TE-polarisatie.

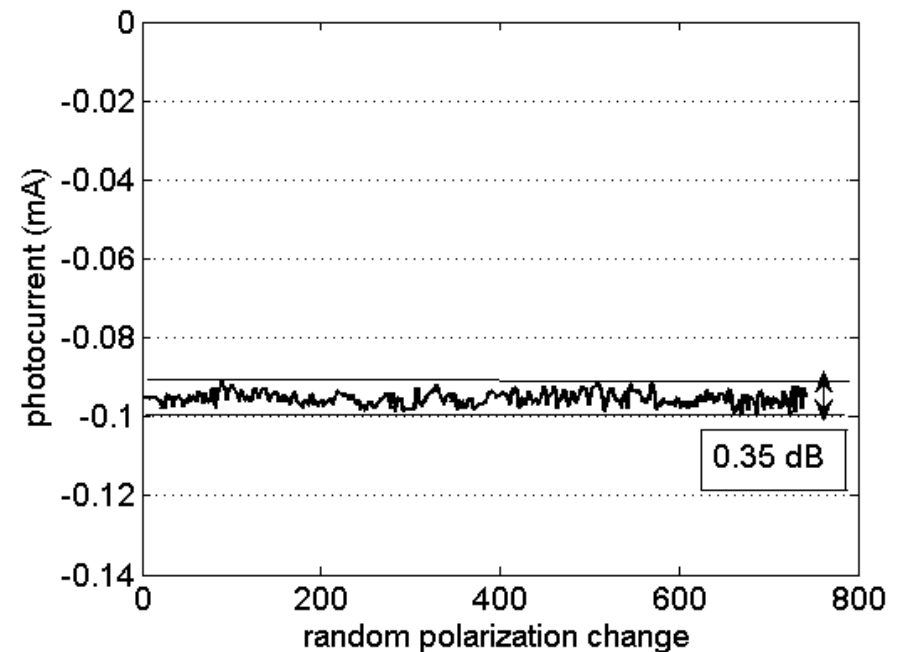


Totale transmissie is onafhankelijk van de ingangspolarisatie

Polarisatie-diversiteit : test



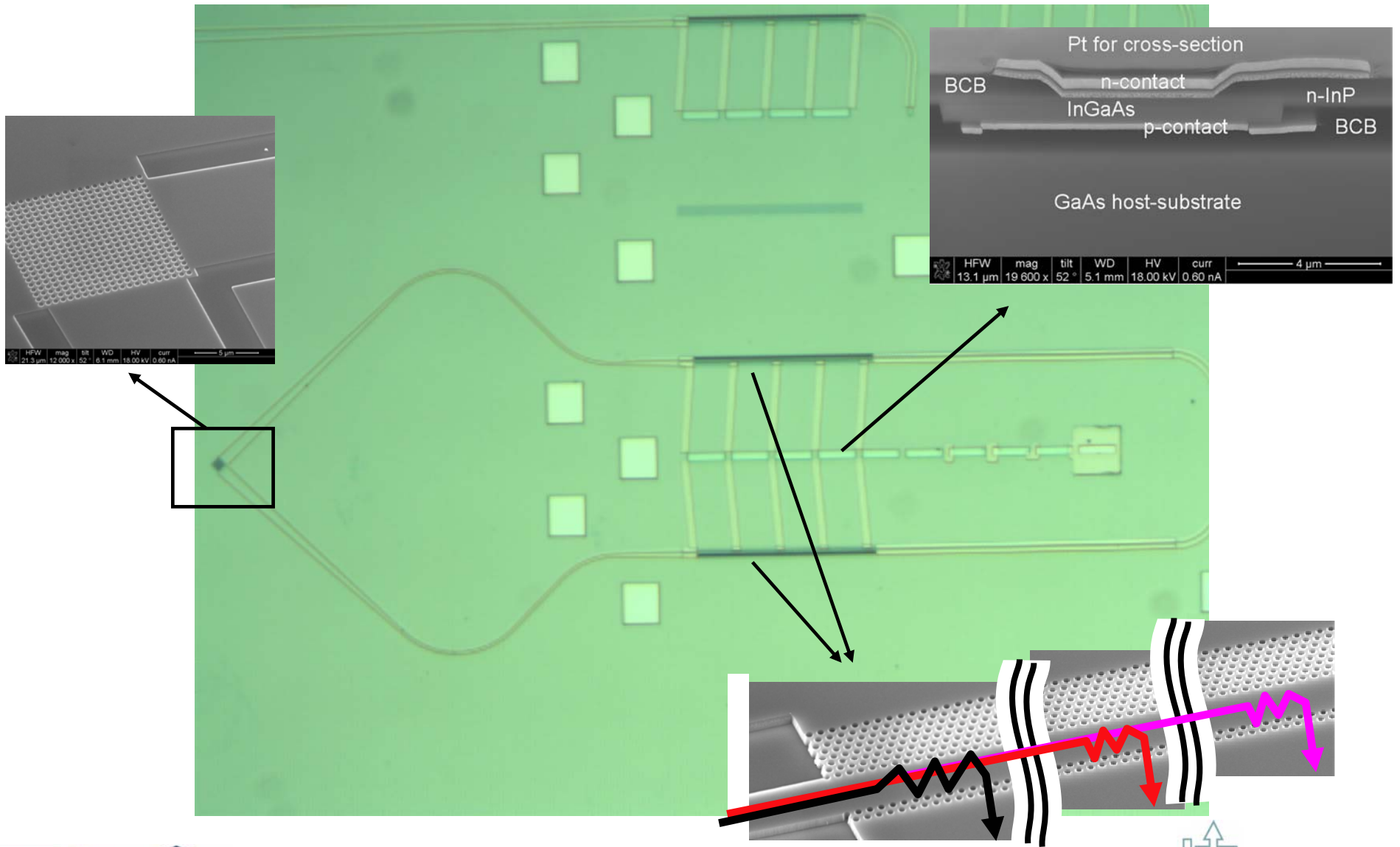
PDL : polarisation dependent loss



Van vezel naar detector

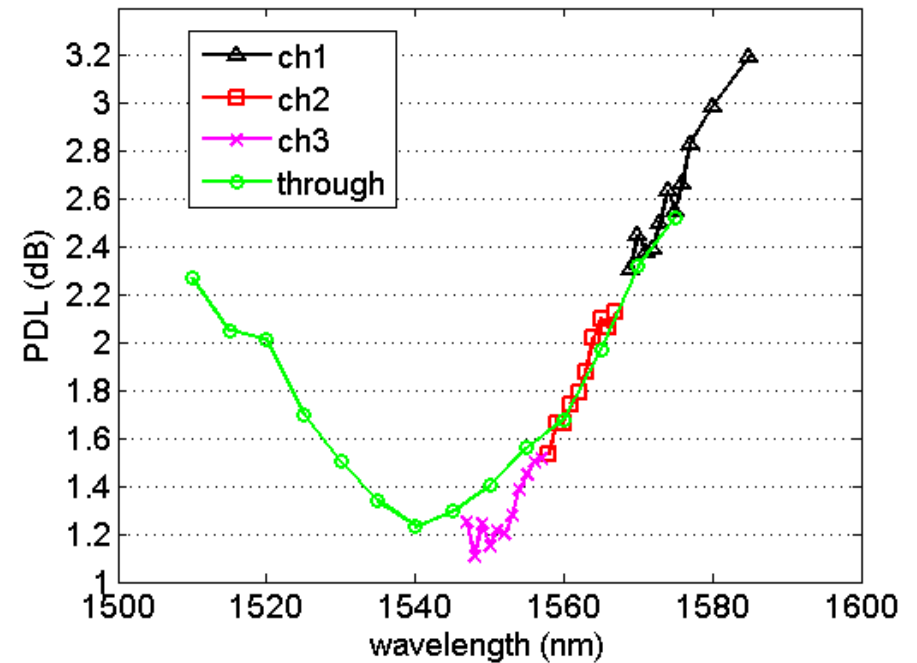
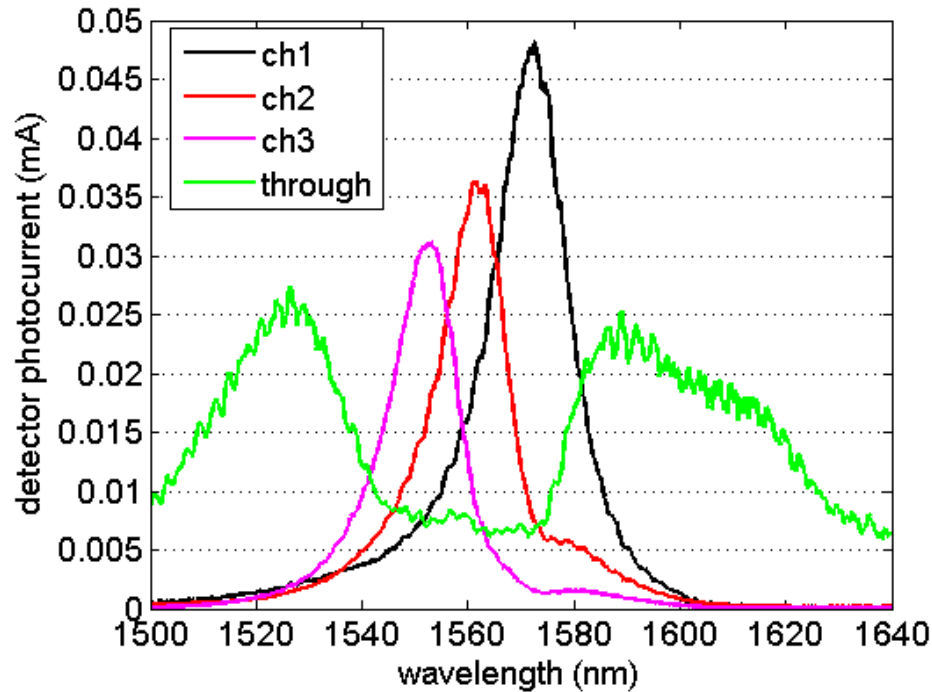
Bijna geen variatie, bij willekeurige verandering van de polarisatie

De volledige chip



Resultaten

PDL : polarisation dependent loss



PDL = 1 dB : de transmissie voor de slechtst mogelijke polarisatie is 80% van de transmissie voor de best mogelijke polarisatie.

Conclusies

- **Complexe geïntegreerde circuits , van ontwerp over fabricage tot meetresultaat,**
- **in InP gebonde membranen**
- **met zeer hoge efficiënte (> 50%) en zeer compacte (28 x 16 μm^2) koppelstructuren naar optische vezel**
- **die onafhankelijk van de ingangs-polarisatie werken,**
- **voor telecommunicatie doeleinden**