

Openbare doctoraatsverdediging
Vrijdag 8 juni 2001

ir. Ronny Bockstaele

**Parallele Optische Verbindingen op
Basis van Resonantecaviteits-LED's**
*Resonant Cavity Light Emitting Diode
Based Optical Interconnect Links*

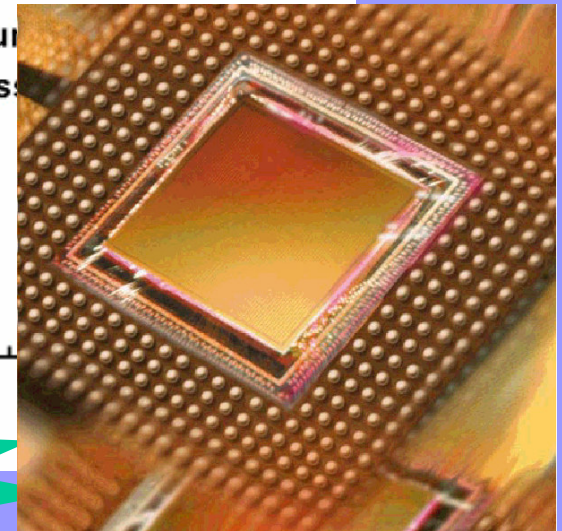
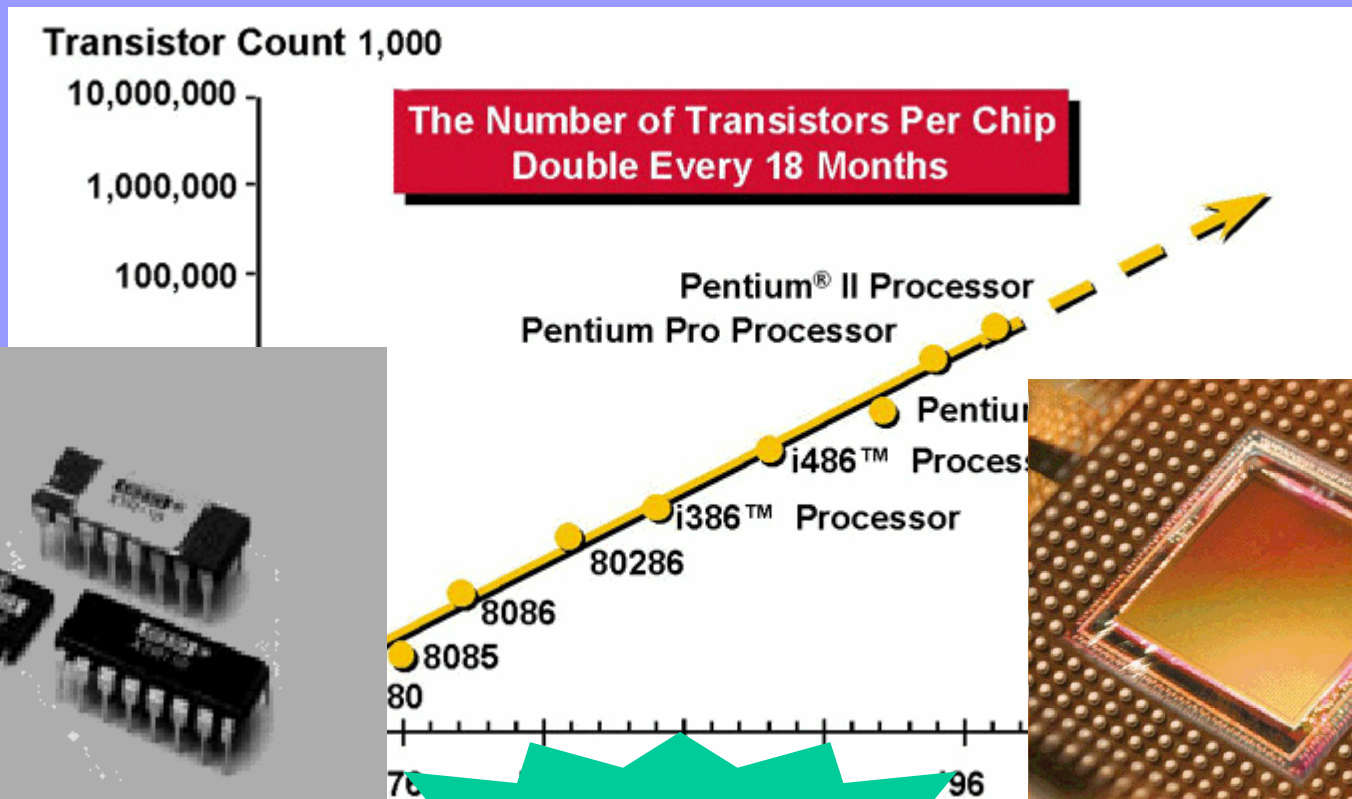
Overzicht

- v Inleiding
- v Efficiëntie van RCLEDs
- v Realisatie van RCLEDs
- v Snelheidseigenschappen van RCLEDs
- v Studie van parallelle optische verbindingen
- v Conclusies

Overzicht

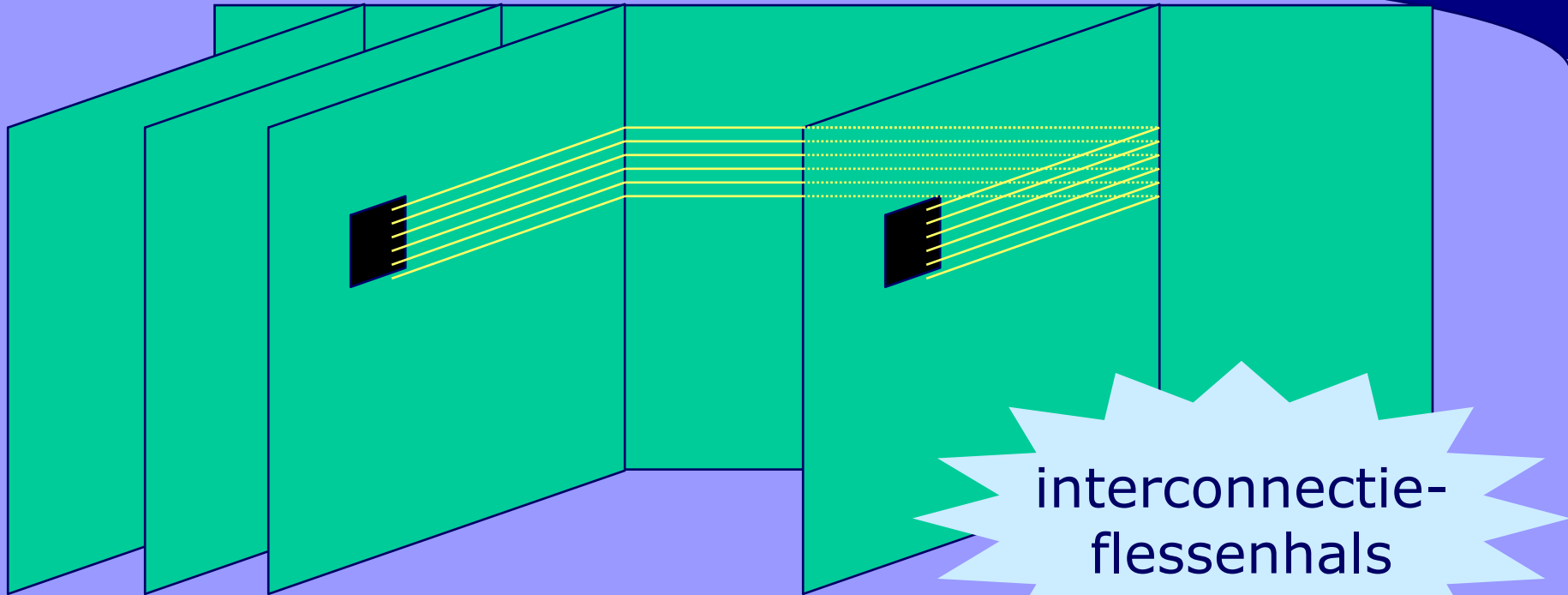
- v Inleiding
 - Waarom optische verbindingen tussen chips ?
 - Opbouw van optische verbindingen
 - Doelstelling van dit werk
- v Efficiëntie van RCLEDs
- v Realisatie van RCLEDs
- v Snelheidseigenschappen van RCLEDs
- v Studie van parallelle optische verbindingen
- v Conclusies

Computersystemen worden krachtiger



Wet van Moore

Elektrische interconnecties via metallische parallelle data bus



Problemen:

1. vervorming door frequentie-afhankelijke attenuatie
2. overspraak
3. connector-grootte

Oplossingen voor interconnectie- flessenhals

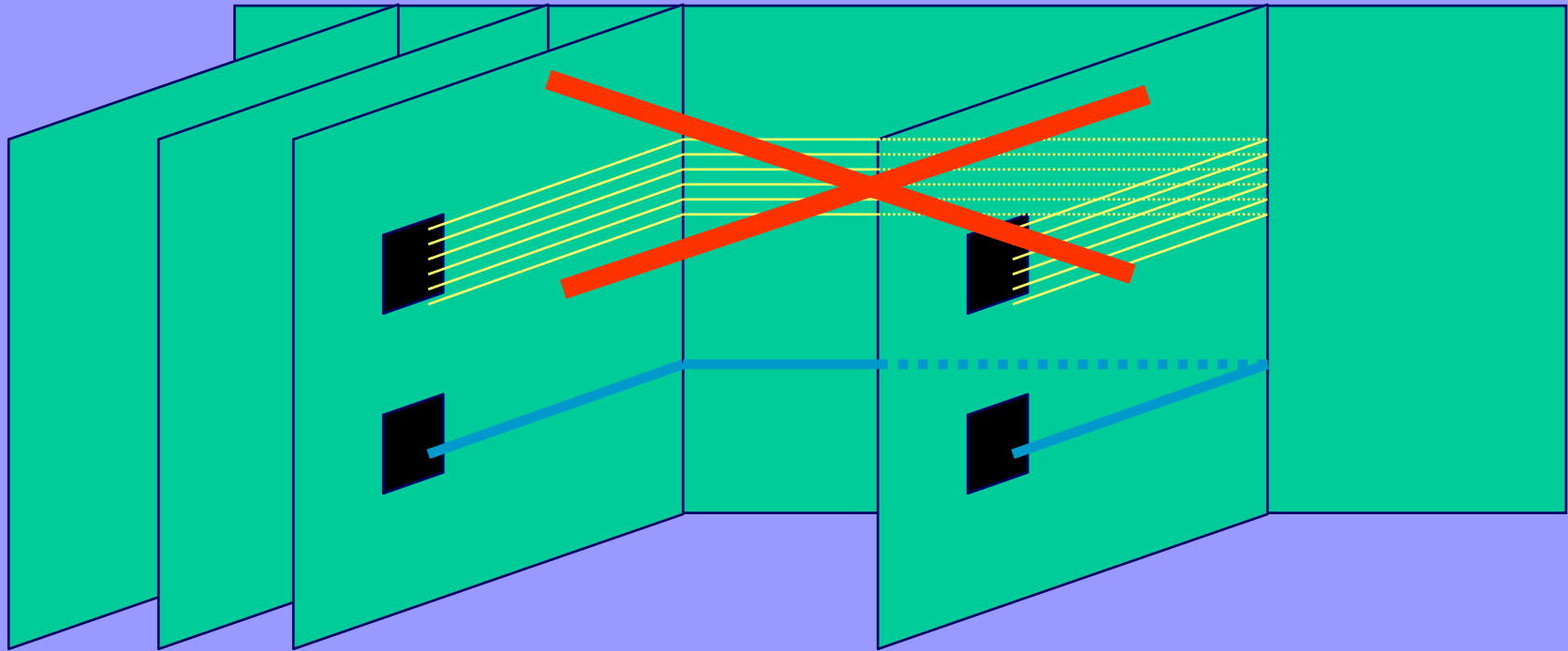
supergeleiders

3D chips

betere
architectuur

optische interconnectie

Elektrische interconnecties via optische interconnecties



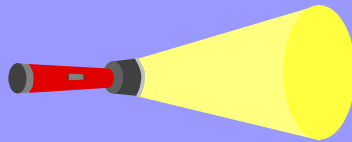
Bouw van een optische verbinding

informatie-
bron



aanstuur
circuit

lichtbron



optische
vezel



detector



ontvangst-
circuit



- optische verbindingen zijn momenteel zeer succesvol in telecommunicatienetwerken
- optische verbindingen kunnen in 2D matrices gerealiseerd worden

Verschillen tussen lange-afstand en korte-afstand optische verbindingen

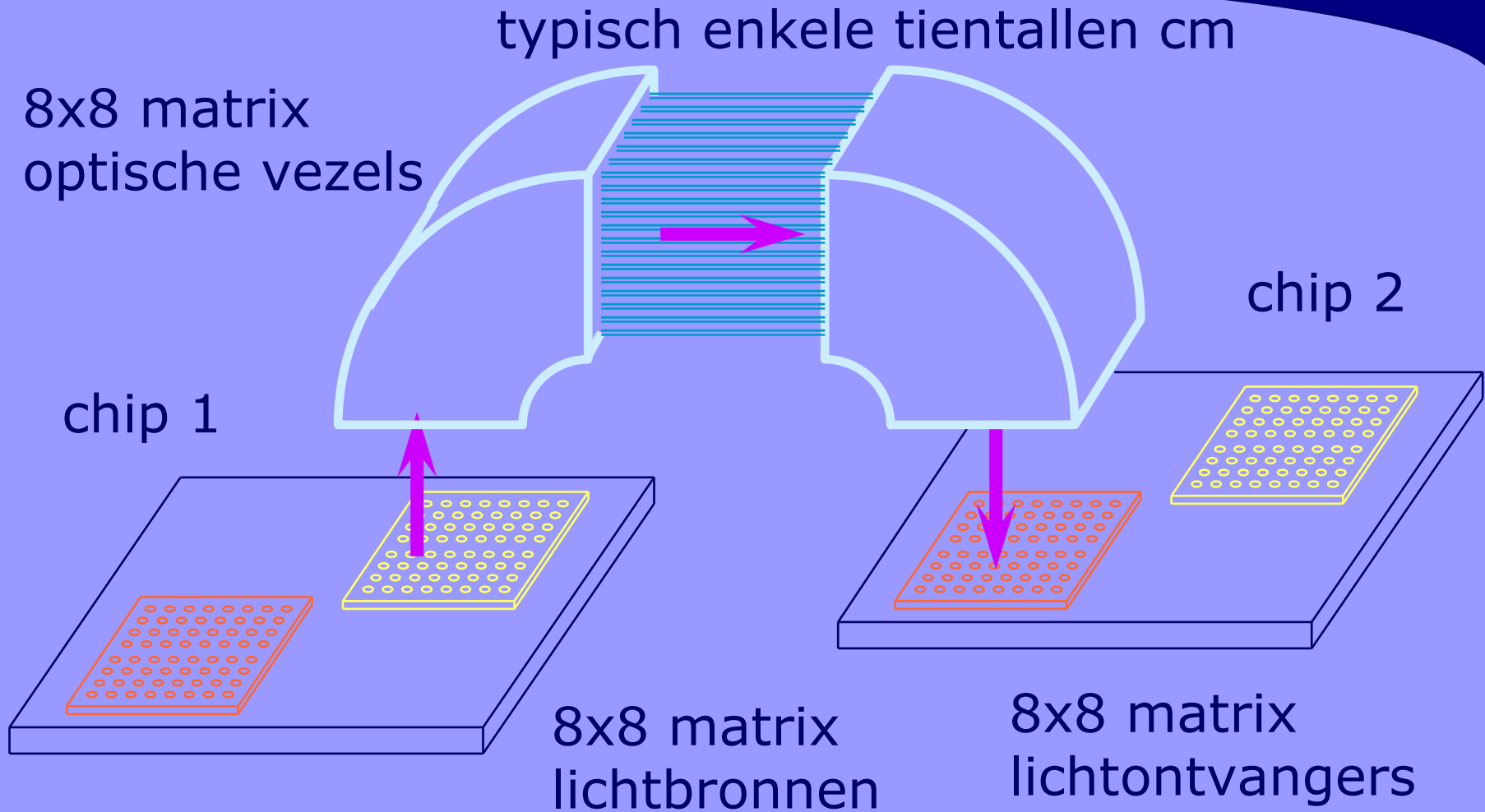
lange afstand:

- ┌ een enkele vezel
- ┌ snelheid is zeer belangrijk
- ┌ ruimte en vermogensdissipatie zijn geen probleem

korte afstand:

- ┌ vermogenverbruik is kritisch
- ┌ compactheid is belangrijk (parallellisme)
- ┌ kostprijs is zeer belangrijk

Optische verbindingen tussen chips



Doelstelling van dit werk

Onderzoeken of optische verbindingen tussen chips, op basis van een geavanceerde lichtbron (de RCLED) haalbaar zijn

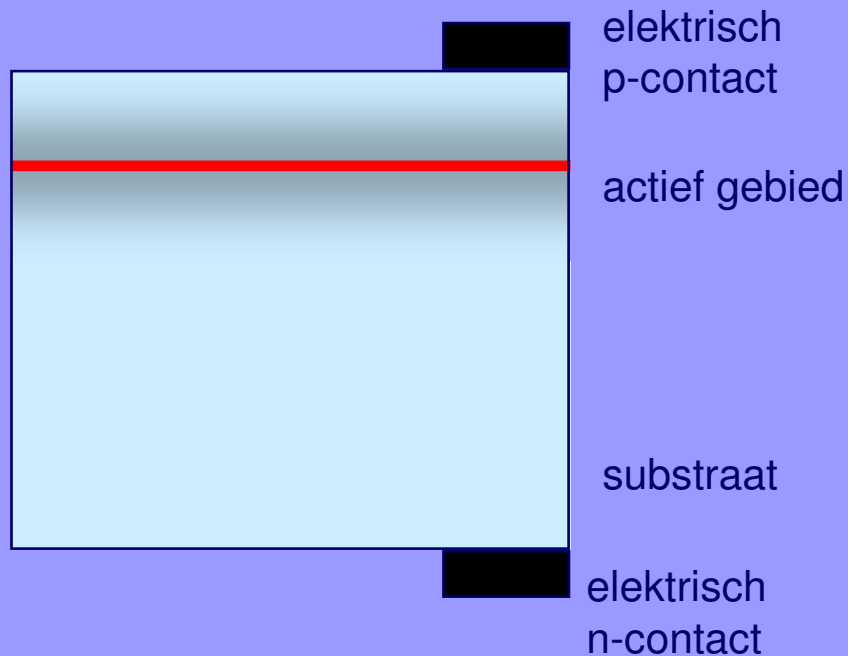
1. efficiëntie in vezel
2. schakelsnelheid
3. prestatie van volledige verbinding

Overzicht

- v Inleiding
- v Efficiëntie van RCLEDs
 - Lichtgeneratie in halfgeleider RCLEDs
 - Werking van RCLEDs
 - Ontwerp van RCLEDs
- v Realisatie van RCLEDs
- v Snelheidseigenschappen van RCLEDs
- v Studie van parallelle optische verbindingen
- v Conclusies

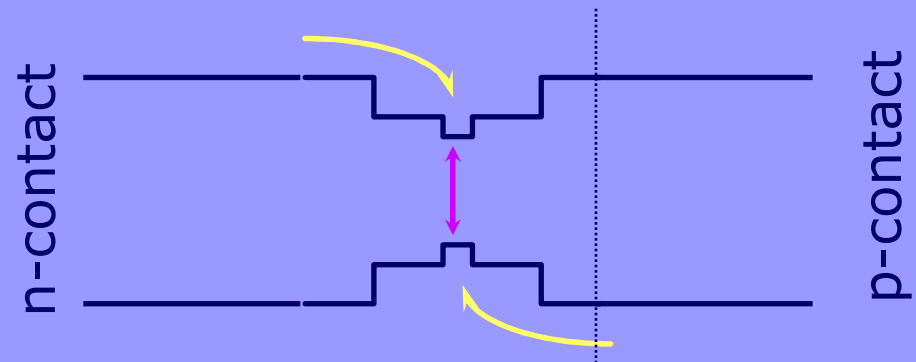
De halfgeleider LED (1)

Opbouw:



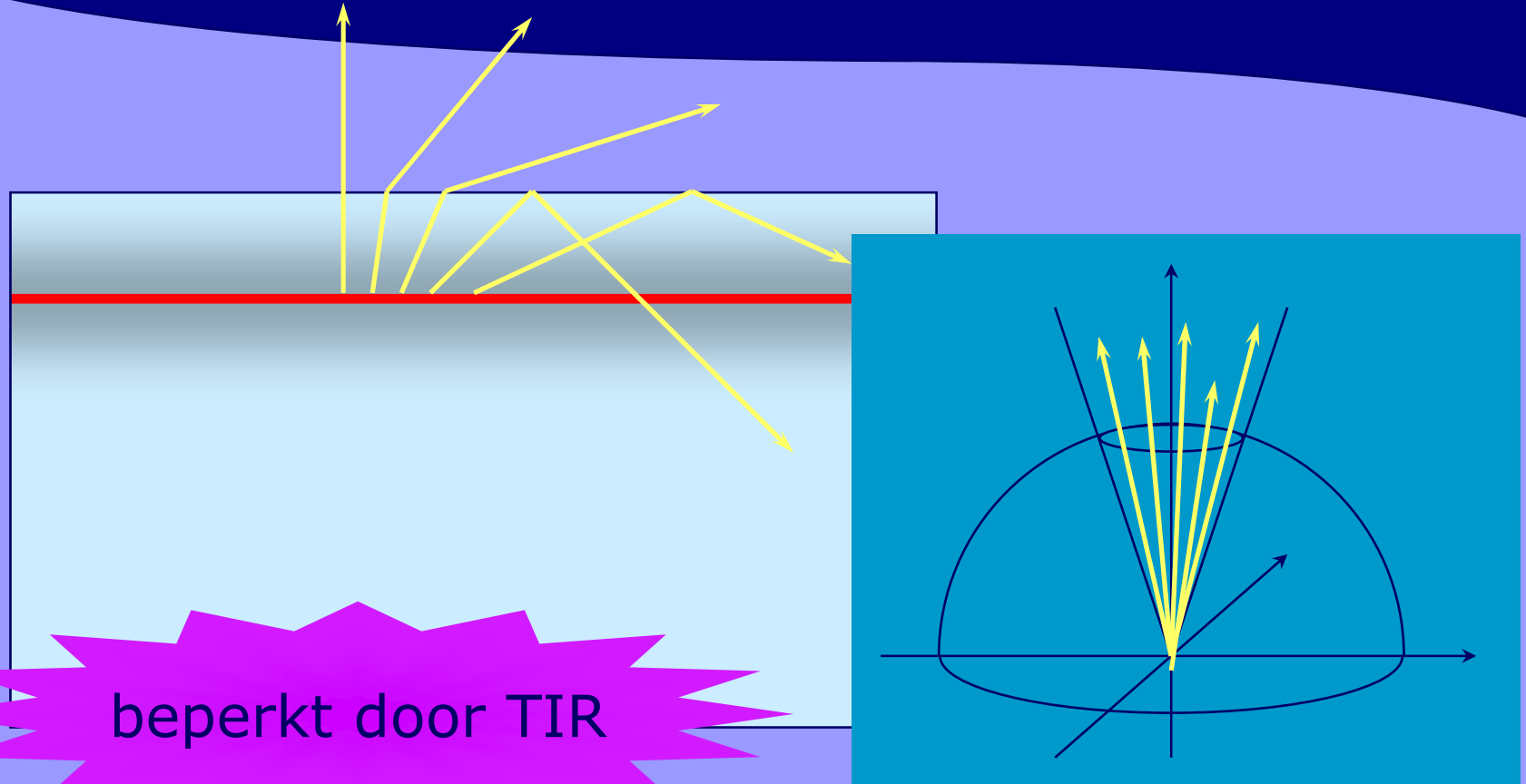
Lichtemissie bestaat uit twee stappen:

1. interne lichtgeneratie
 - isotroop
 - hoge efficiëntie



2. lichtextractie

De halfgeleider LED: principe van de licht extractie



beperkt door TIR

➔ zeer lage extractie-efficiëntie ($\frac{1}{4n^2} \sim 2\%$)

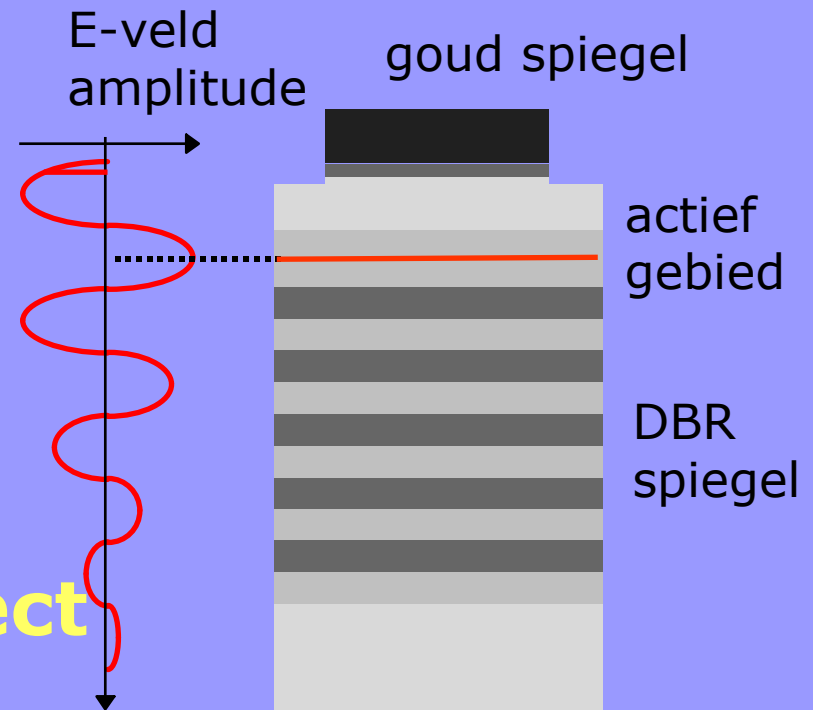
Een betere LED: de RCLED

🚲 RCLED is een halfgeleider LED waarbij het actief gebied tussen 2 spiegels zit

🚲 Interferentie aan spiegels zorgt voor staande golf

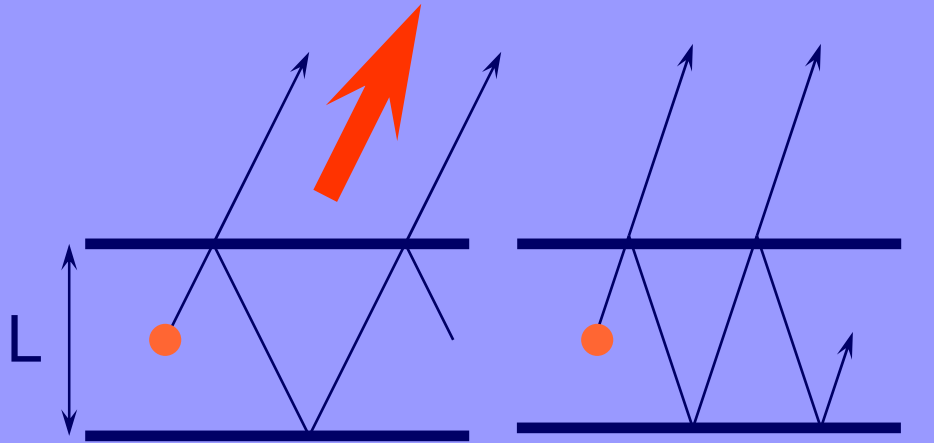
🚲 Amplitude staande golf beïnvloedt de spontane emissie

=het microcaviteitseffect



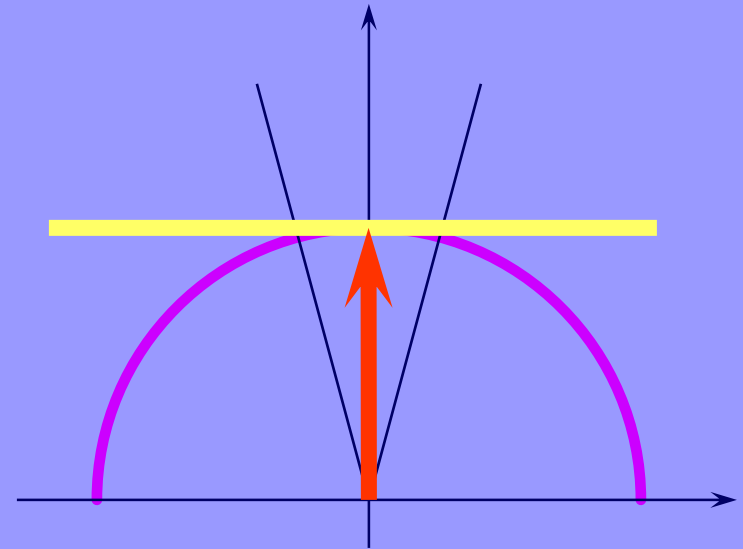
Werking microcaviteitseffecten

Dipool in caviteit :



constructieve
interferentie destructieve
interferentie

Stralingspatroon in
de LED :



optimale geval :
één emissiemode

RCLEDs: een succesverhaal

- * Microcaviteitseffect eerst beschreven in 1946
- * Eerst experimenten in begin jaren 90
- * Situatie 1996:
 - ← Record efficiëntie 22.6% (INTEC)
 - ← Sprake van commercialisatie (Mitel, OSRAM)

VRAAG

Hoe goed kan een RCLED licht in een vezel koppelen ?

DOEL

Ontwerp van RCLED-caviteit voor maximale koppeling naar de vezel

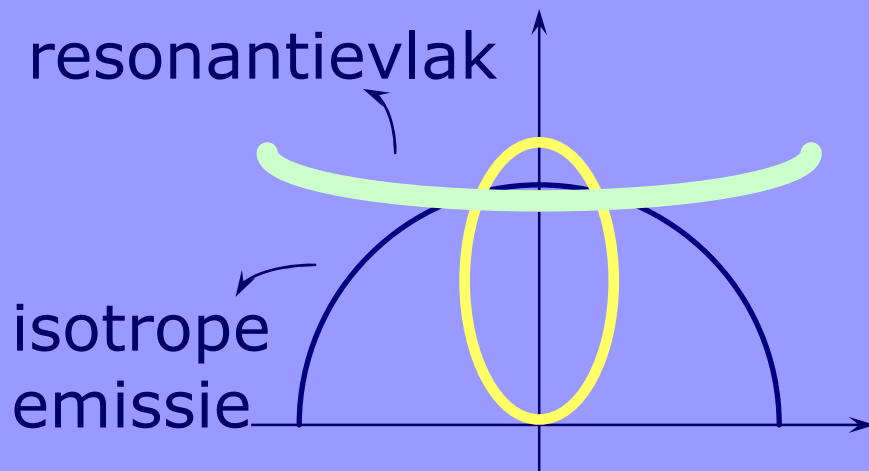
Ontwerp van de RCLED

Wat we willen:

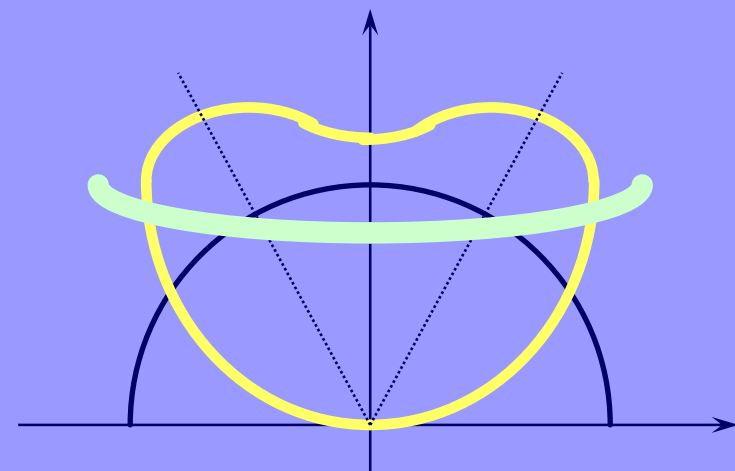
- hoge efficiëntie
- smalle bundel

Wat we kunnen beïnvloeden:

- reflectie van de spiegels
- dikte van de caviteit
- plaats van actief gebied

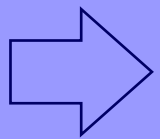
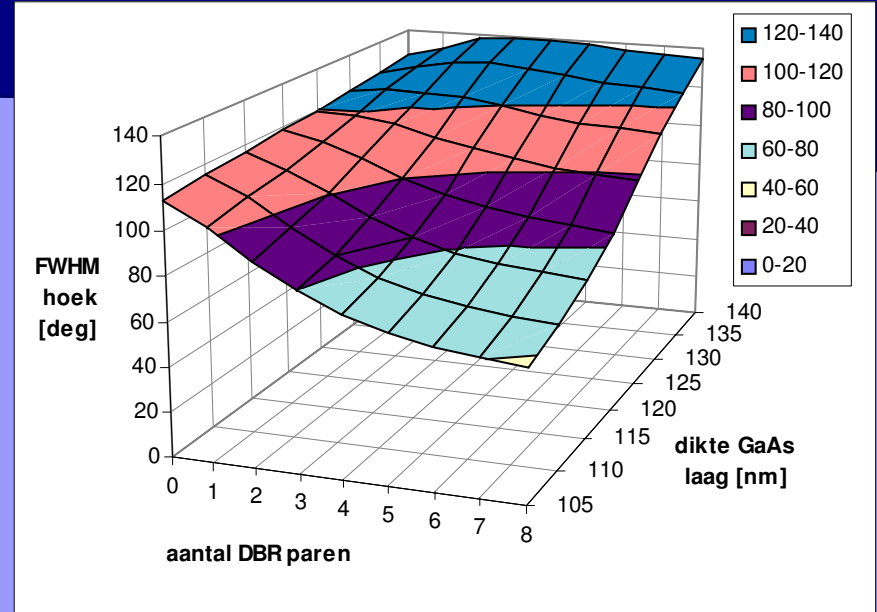
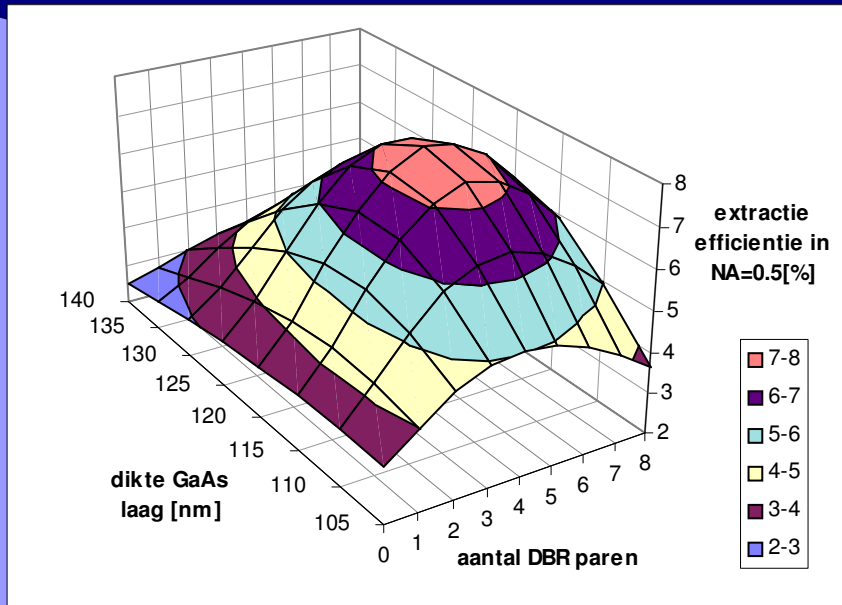


Smalle bundel

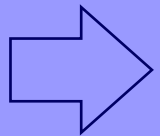


Brede bundel

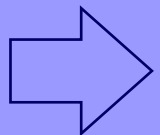
Resultaten van simulatie



Er bestaat optimale caviteit, totale extractie-efficiëntie naar vezel is 7%



Bijhorende bundelbreedte is ongeveer 90°



Bundel kan niet zeer smal gemaakt worden

Overzicht

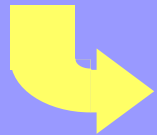
- v Inleiding
- v Efficiëntie van RCLEDs
- v Realisatie van RCLEDs
 - RCLEDs voor flipchip montage
 - RCLEDs met stroomopsluitingsvenster
 - RCLEDs met verwijderd substraat
 - enkele metingen
- v Snelheidseigenschappen van RCLEDs
- v Studie van parallelle optische verbindingen
- v Conclusies

Realisatie van RCLEDs

Realisatie van RCLEDs voor optische interconnecties



compacte realisatie



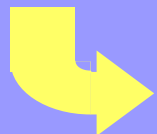
kleine diameter



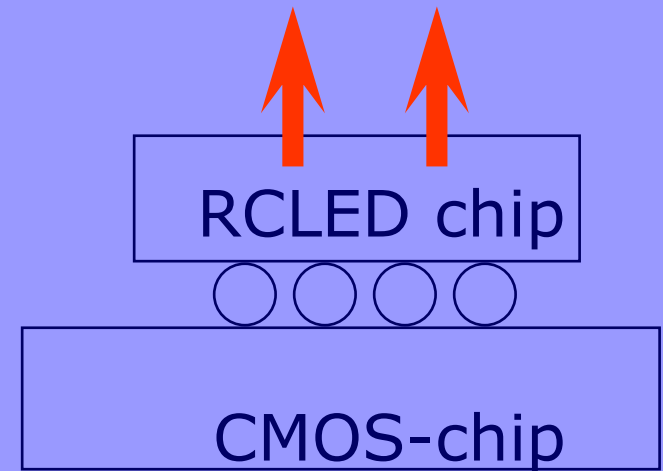
flip-chip techniek



beide contacten aan
dezelfde kant



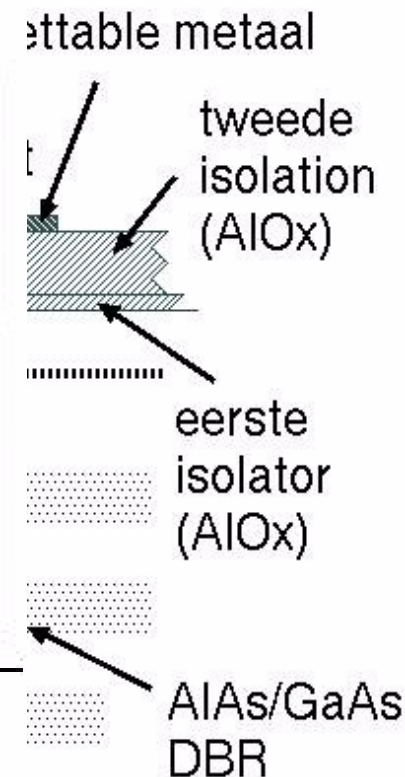
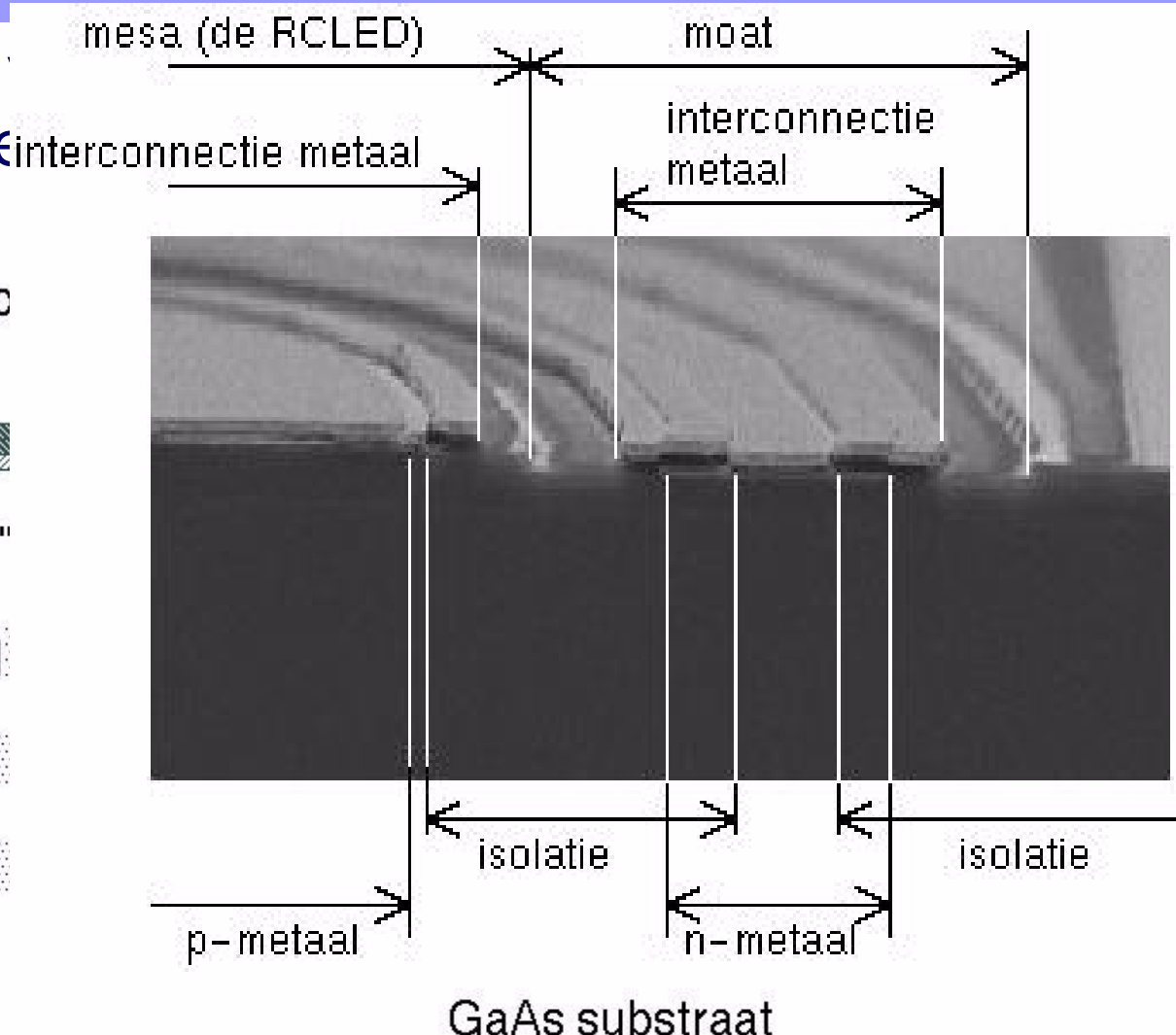
realisatie in matrices



Realisatie van RCLED's voor interchip interconnecties

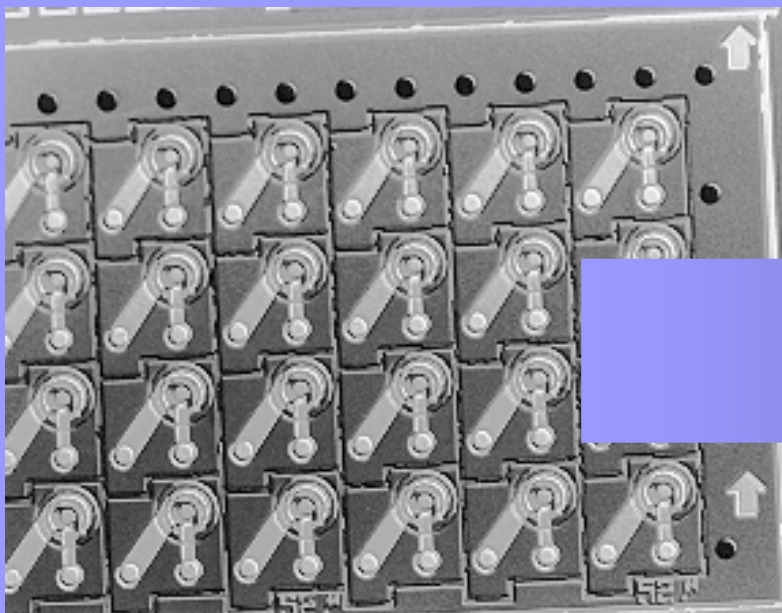
klaar

=> be

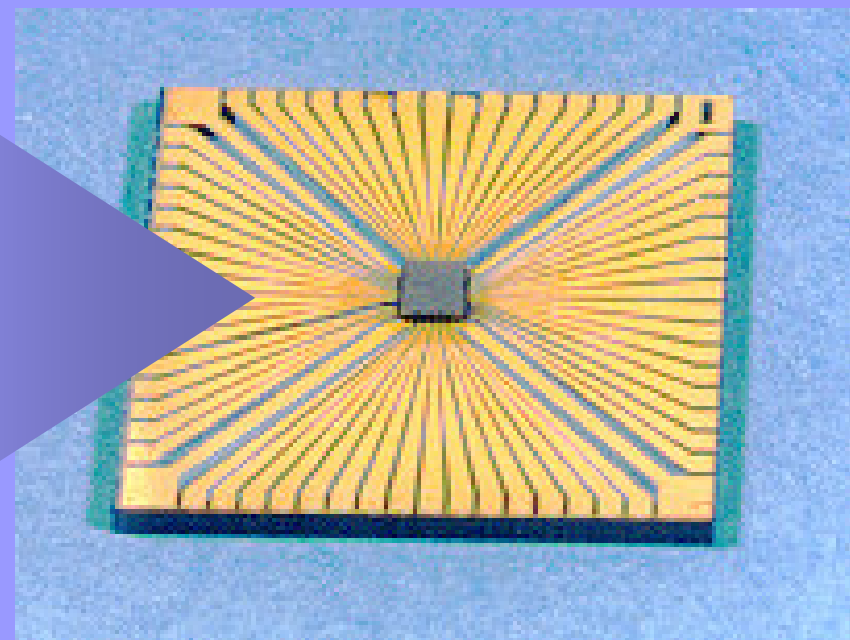


Realisatie van RCLED matrices voor interchip interconnecties

Detail van 8x8 matrix :



Een 8x8 matrix gemonteerd op glas drager :



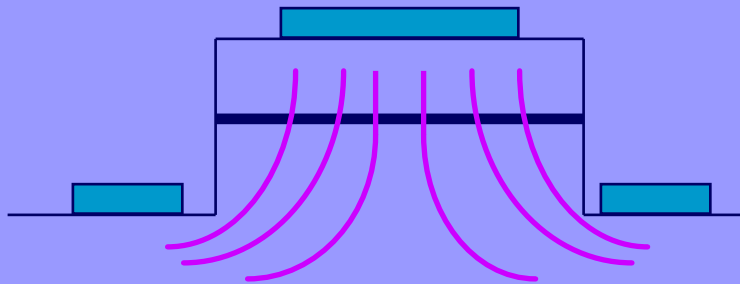
Overzicht van de verschillende gerealiseerde componenten

- ∩ AlAs/GaAs DBR en AlO_x/GaAs
- ∩ met/zonder stroomopsluitingsvenster
- ∩ met/zonder substraat
- ∩ 850nm of 980nm

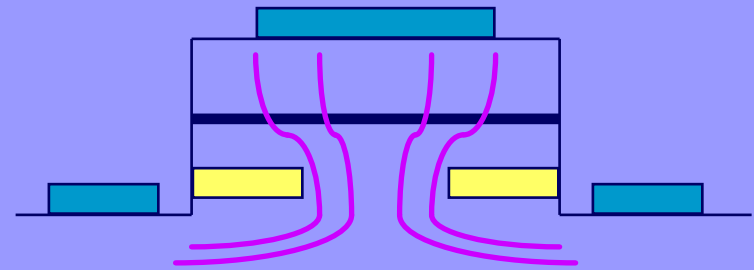
RCLEDs met stroomopsluitingsvenster: principe

selective oxidatie AlAs resulteert in elektrische isolator
=> realisatie van RCLEDs met zeer kleine diameter

zonder stroomvenster:



met stroomvenster:



PROBLEEM: uit experimenten blijkt daar de laterale diffusie belangrijker is, wegens de lange levensduur van de ladingen

850nm met verwijderd substraat

850-nm licht wordt door GaAs substraat geabsorbeerd

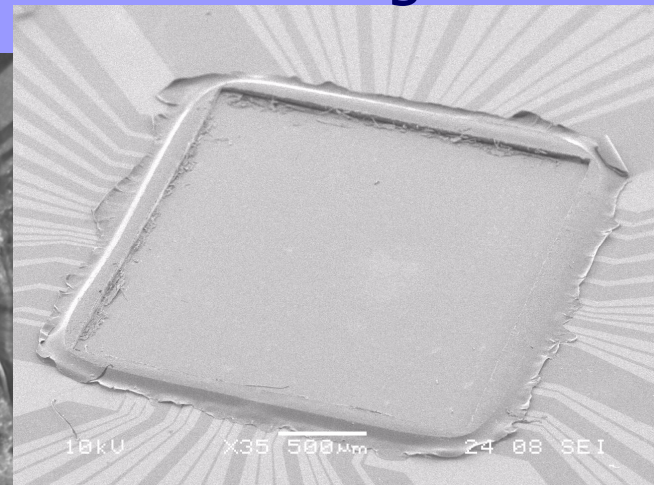
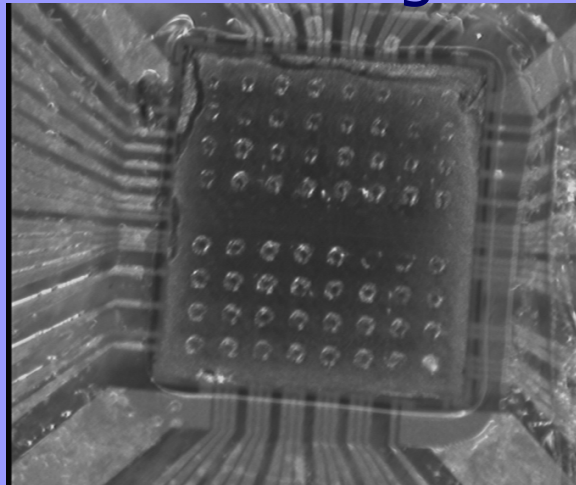
➔ verwijdering van substraat nodig,
door middel van een chemisch etsproces

PROBLEEM

zeer dunne LED (3 μm)

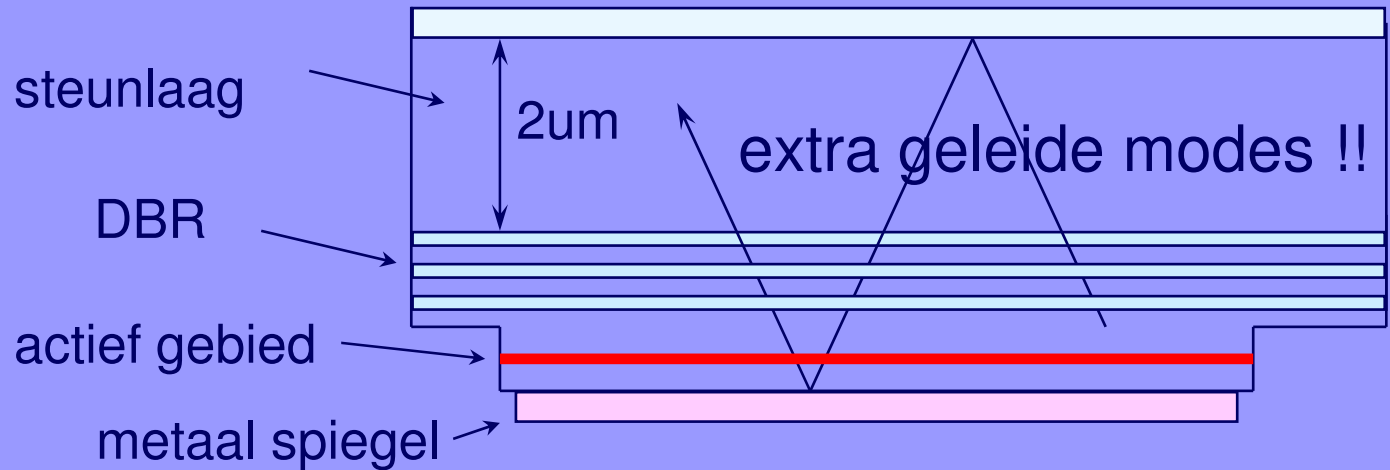
met steunlaag

zonder steunlaag



850-nm RCLEDs met verwijderd substraat: principe

1. steunlaag resulteert in kleinere extractie efficiëntie

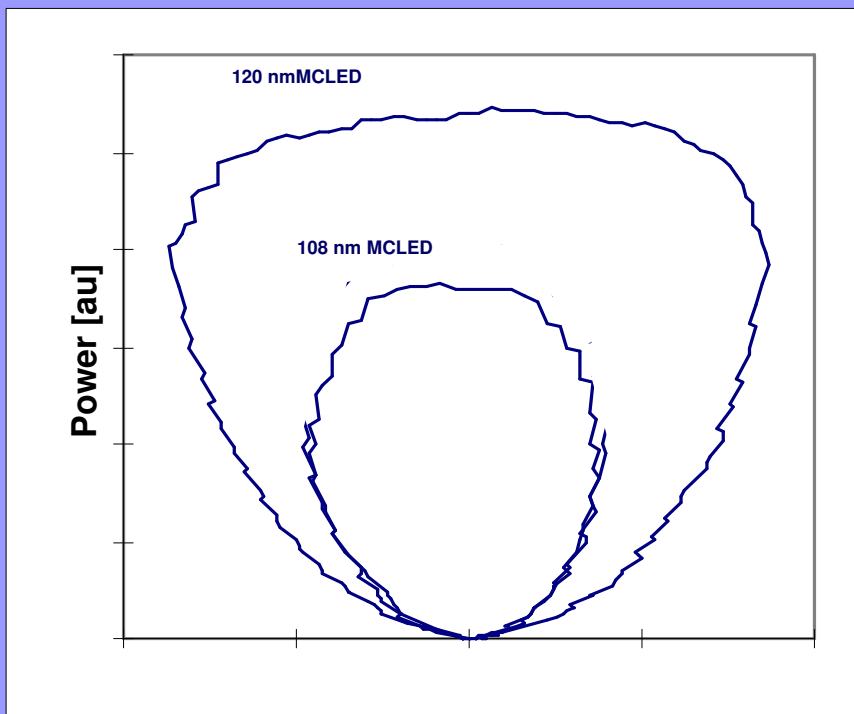


2. experimenten tonen aan dat er grotere afstand tussen actief gebied en metaalspiegel nodig is

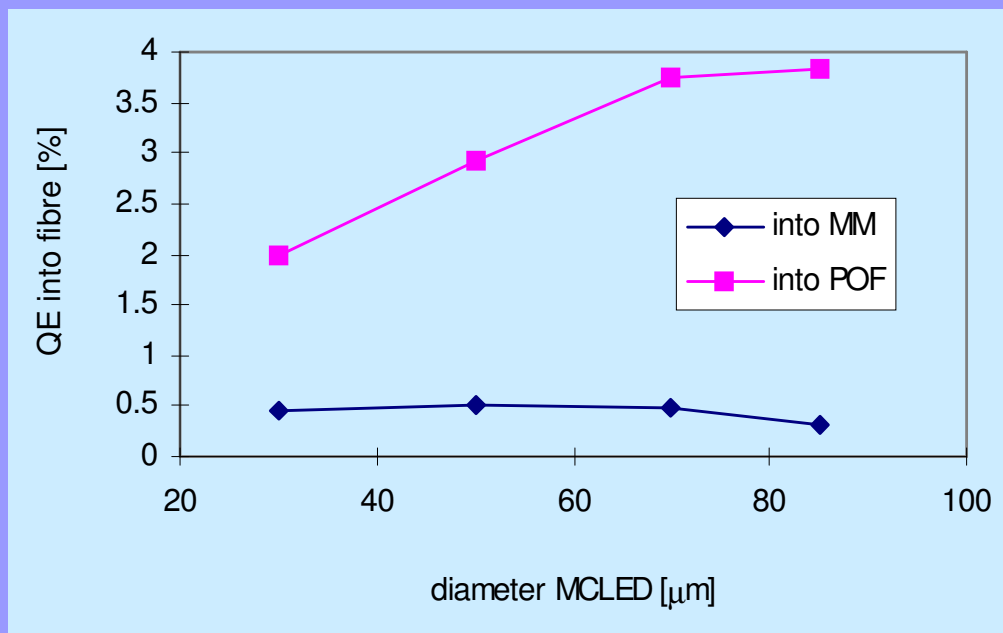
➔ verminderd microcaviteitseffect bij substraats-verwijderde 850-nm RCLEDs

Karakterisatie van de RCLEDs: verre veld patroon en vezelkoppeling

Invloed van microcaviteitseffect op verre veld patroon :

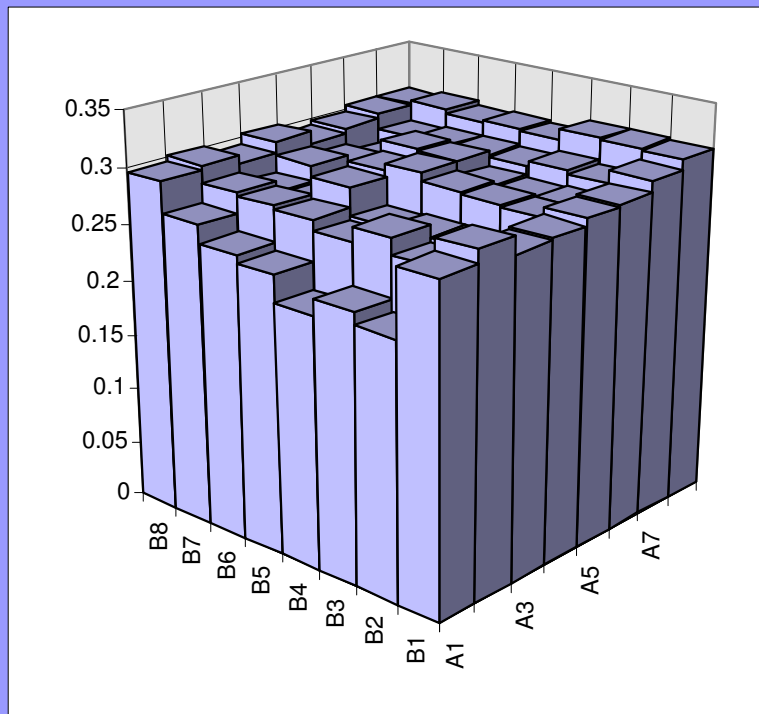


Gemeten totale efficiëntie naar optische vezels :

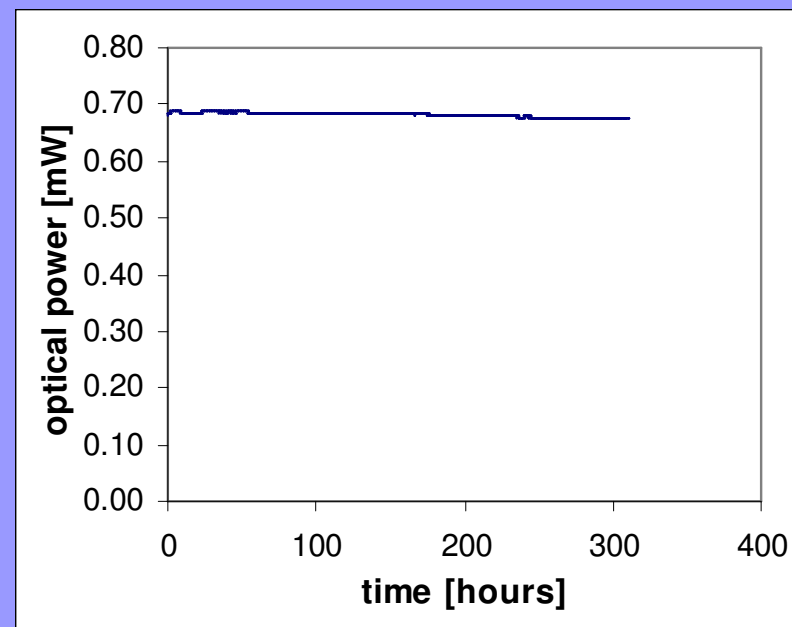


Karakterisatie van de RCLEDs: uniformiteit en levensduur

Uniformiteit van 980-nm
RCLEDs in 8x8 matrix:



(beperkte) levensduur-
meting:



Overzicht

- v Inleiding
- v Efficiëntie van RCLEDs
- v Realisatie van RCLEDs
- v Snelheidseigenschappen van RCLEDs
 - Invloed van aanstuurcircuit
 - Modellering van de snelheidseigenschappen
 - Ontwerp van aanstuurcircuitten
- v Studie van parallelle optische verbindingen
- v Conclusies

Snelheidskarakteristieken van RCLEDs: enkele metingen

Stroomsturing

Spanningsturing



stijg en daaltijd
in orde van 5 ns

stijg en daaltijd
in orde van 1 ns

Snelheidskarakteristieken van RCLEDs: tempovergelijking

verandering in
aantal ladingen

$$\frac{dn}{dt} = \frac{I}{qVol} - \frac{n}{\tau} - Bn^2$$

geïnjecteerde stroom
(afhankelijk van het
aanstuurcircuit)

niet-stralende
recombinatie

stralende
recombinatie

$$P_{out} = h\nu \cdot \eta_{ex} \cdot Bn^2 \cdot Vol$$

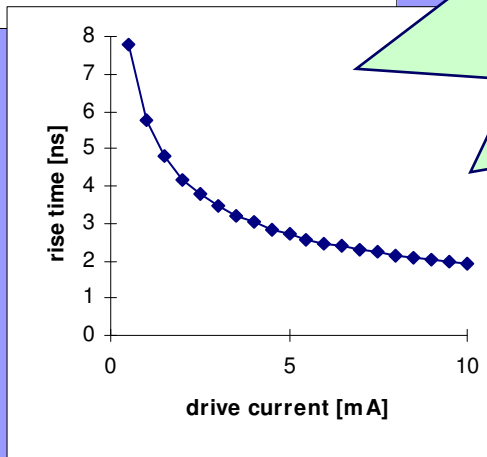
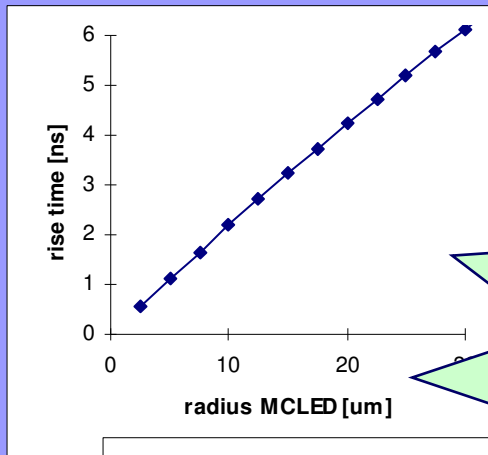
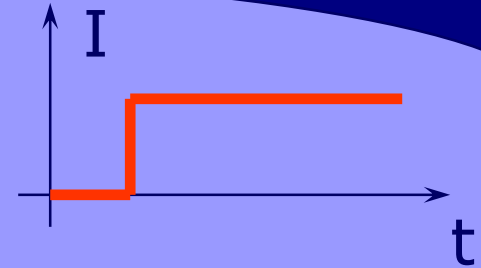
uitgezonden
optisch vermogen

foton-
energie

extractie
efficiëntie

Snelheidsantwoord van RCLEDs: eenvoudige stroomsturing

Berekende stijgtijd : $t_{stijg} = 1.49 \sqrt{\frac{qVol}{BI_{inj}}}$



CONCLUSIE:
geen eenvoudig
eerste-orde systeem
(wegens Bn^2)

hoogefficiënte LEDs zijn traag

Ontwerp van aanstuurcircuitten voor RCLEDs

DOEL

Ontwerp van snelle aanstuurcircuitten, in CMOS, die de RCLED snel aan- en afschakelen

- * ontwerp van circuiten in 0.6 μ m CMOS technologie in Cadence ontwerpsomgeving
- * nood aan een goed hogesnelheidsmodel RCLED
- * realisatie in AMS 0.6 μ m technologie

Modelling van snelheidsantwoord van RCLEDs

DOEL

Modelling van schakelgedrag van RCLEDs, bruikbaar in elektrische circuitsimulators
=>beter ontwerp van aanstuurcircuitten

PROBLEEM

Elektrische circuitsimulators kennen geen grootheid 'licht'

OPLOSSING

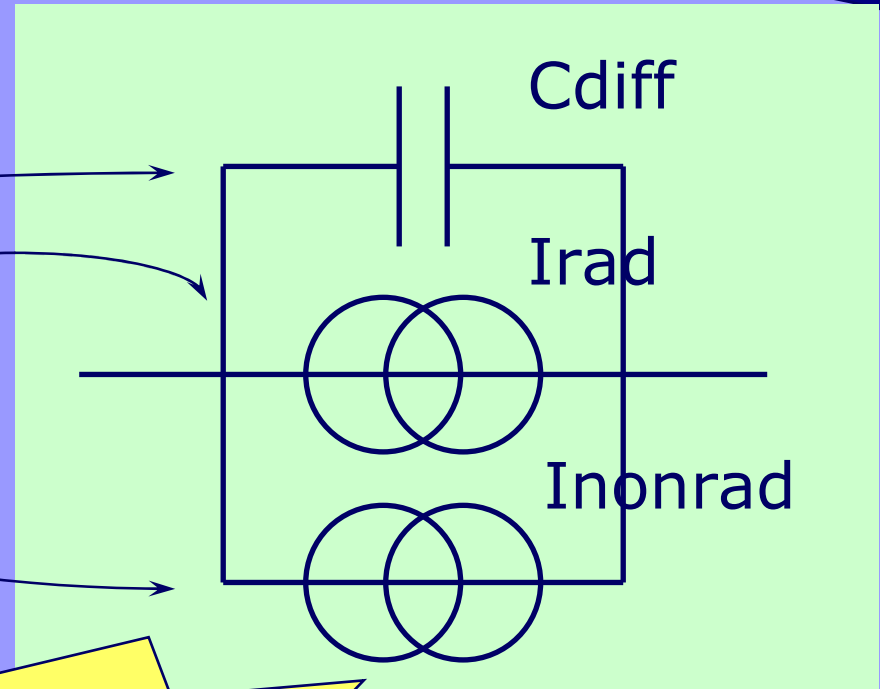
1. Equivalente stromen (CCCS, VCCS)
2. Analog behavioral modelling (VerilogA)

Van tempovergelijking tot circuitmodel

$$\frac{dn}{dt} = \frac{I}{qVol} - \frac{n}{\tau} - Bn^2$$

$$I = qVol \frac{dn}{dt} + qVol \frac{n}{\tau} + qVol Bn^2$$

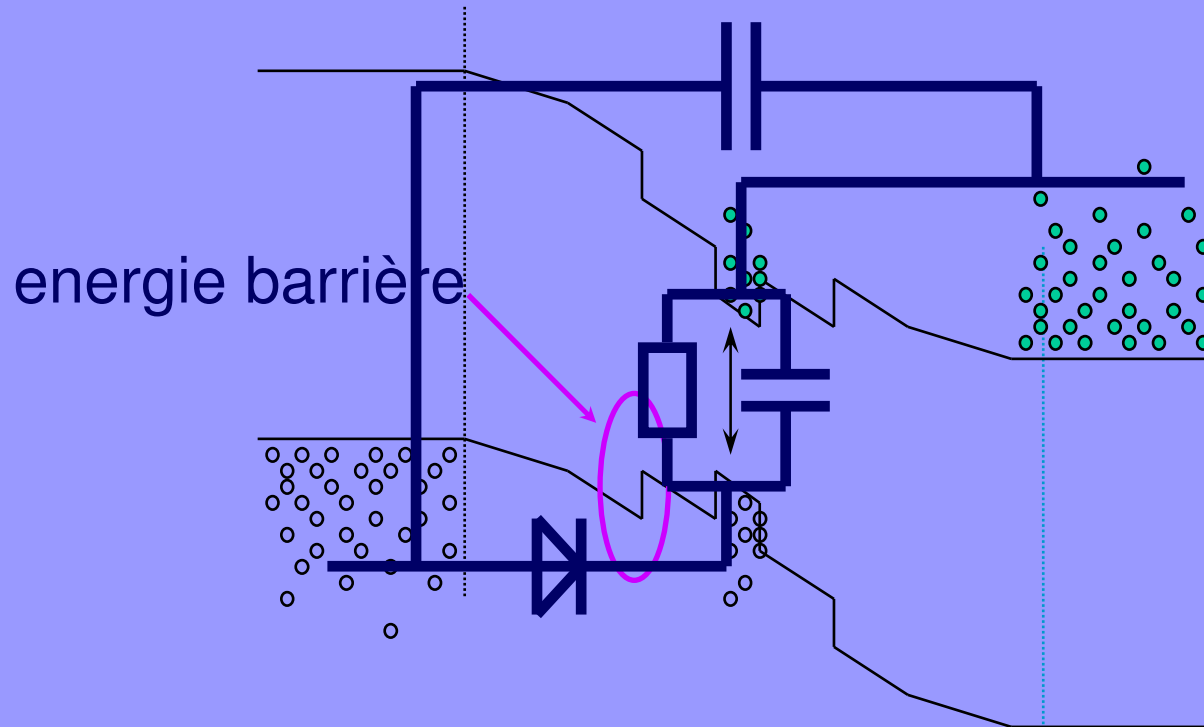
$$n = n_0 \left(\exp \frac{V}{V_t} - 1 \right)$$



Probleem:
afschakelgedrag wordt
niet goed gemodelleerd

Modellering van afschakelgedrag van RCLEDs

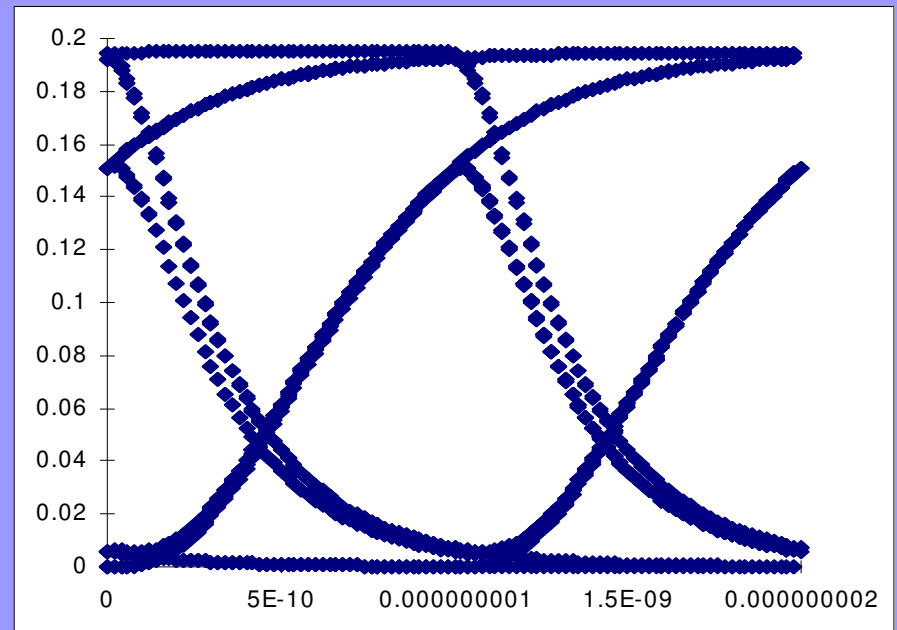
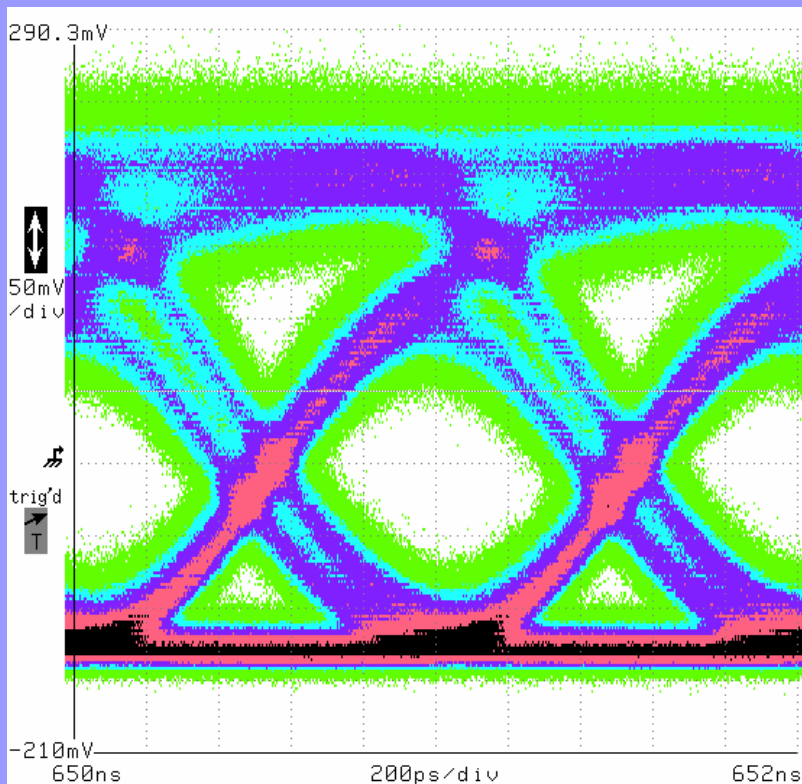
bandendiagram net na afschakelen:



- ◆ geïmplementeerd in VerilogA
- ◆ methode ontwikkeld om modelparameters te bepalen

Vergelijking tussen model en metingen

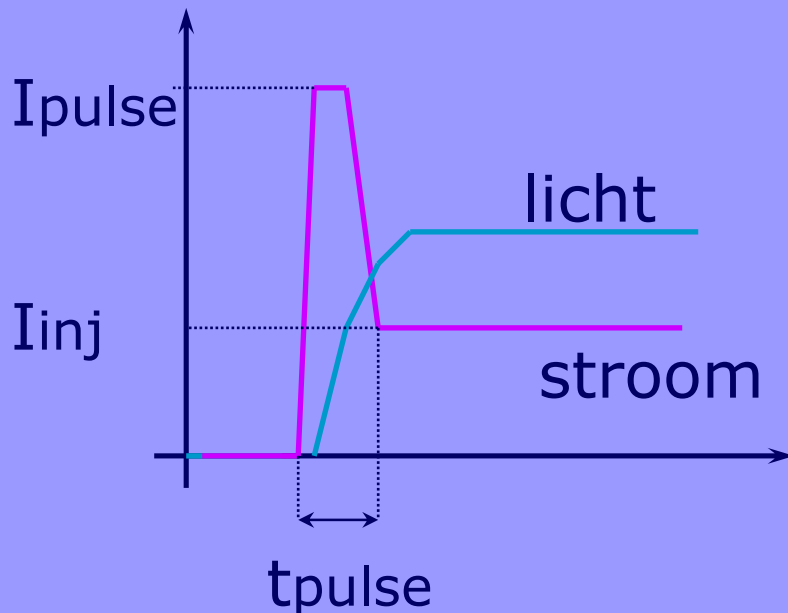
Gemeten en berekend oogdiagram bij 1 Gbps :



Snelheidskarakteristieken van RCLEDs: gepulst aansturen

Spanningsgestuurde LED zijn snel wegens gepiekte stroomvorm

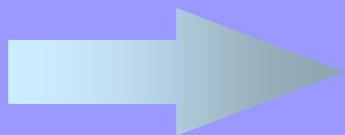
⇒ Nog sneller aansturen door gecontroleerde stroompuls



$$t_{pulse} = \sqrt{\frac{qVol}{BI_{inj}}} \frac{I_{inj}}{I_{pulse}}$$

↑
stijgtijd bij cste stroom

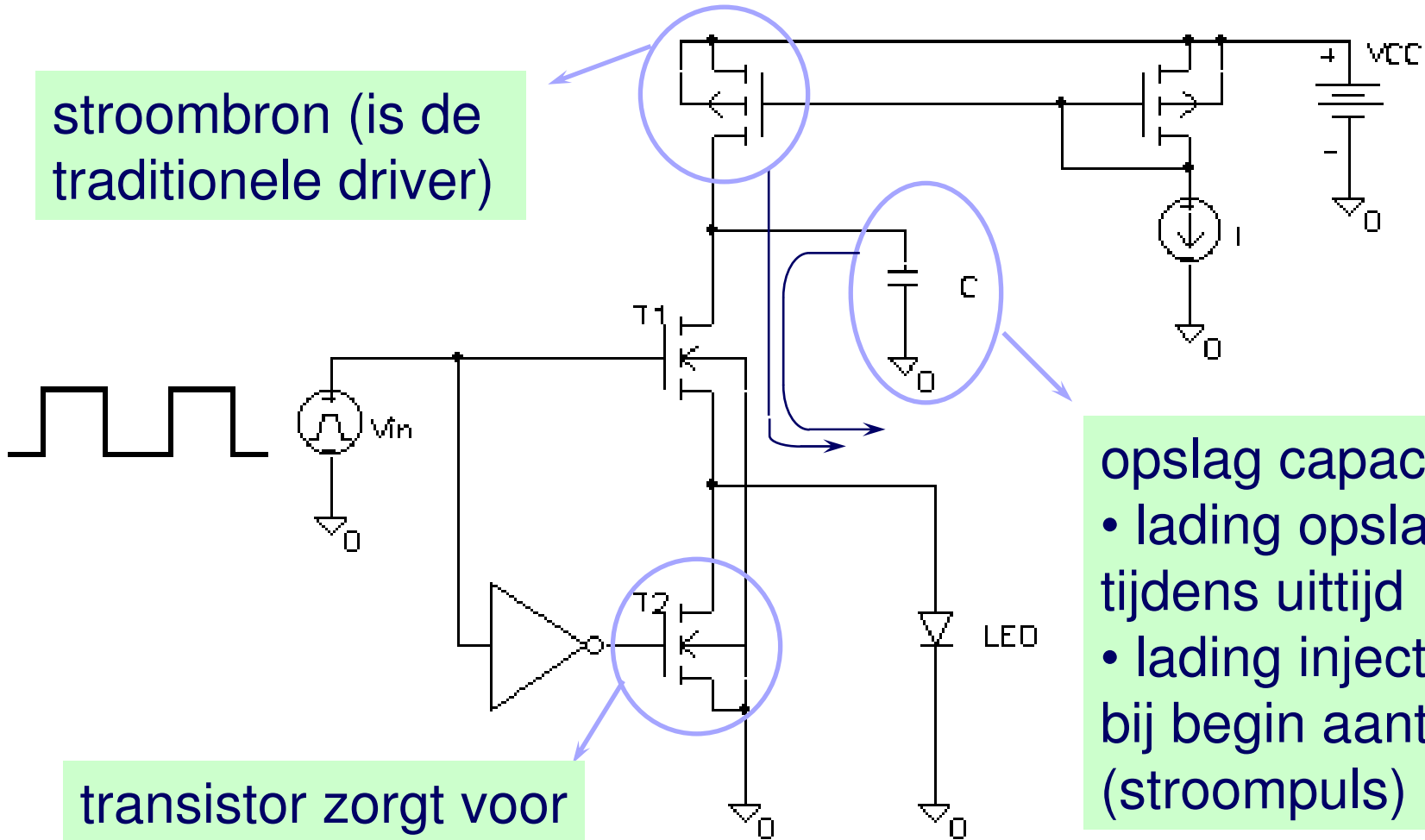
↑
versnelling



werkt steeds beter bij lage regimestroom

C-tank aanstuurcircuit: het circuit

stroombron (is de traditionele driver)

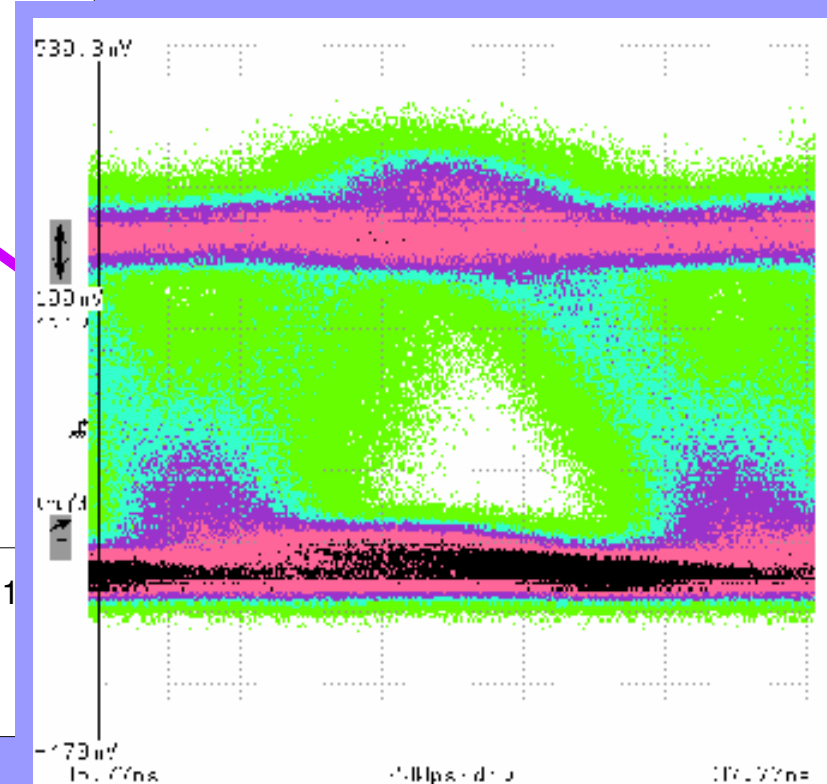
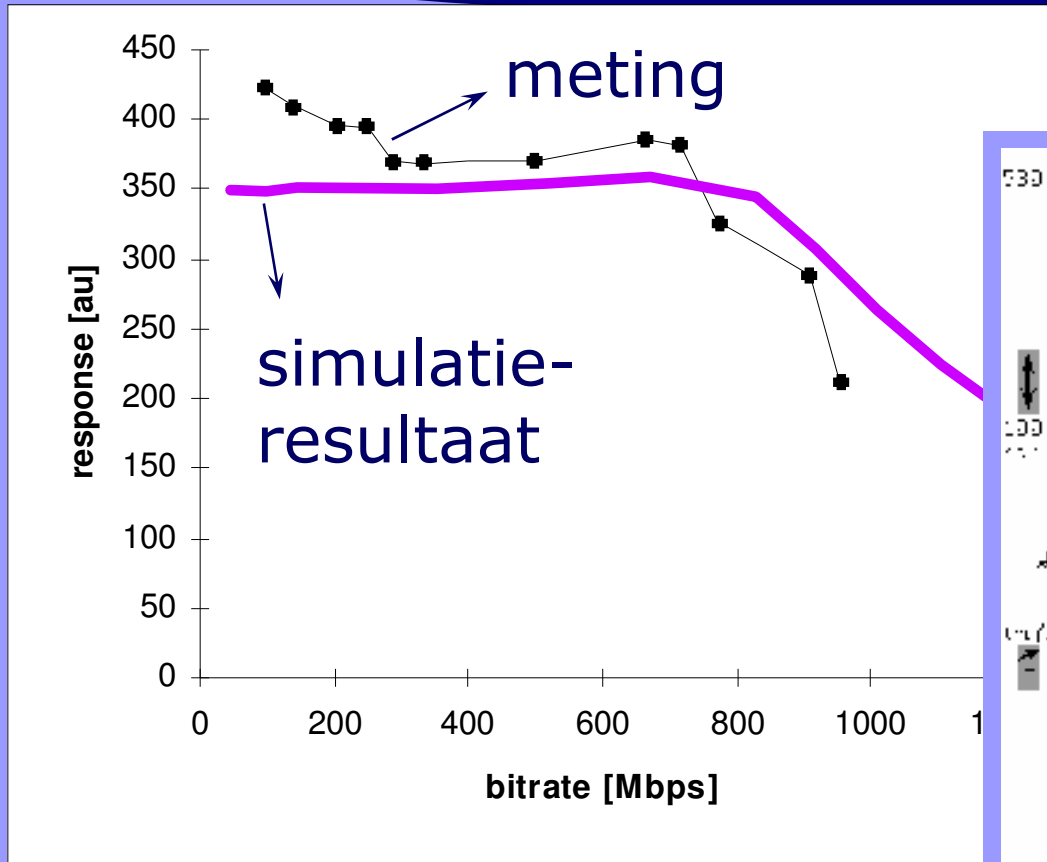


opslag capaciteit:

- lading opslaan tijdens uittijd
- lading injecteren bij begin aantijd (stroompuls)

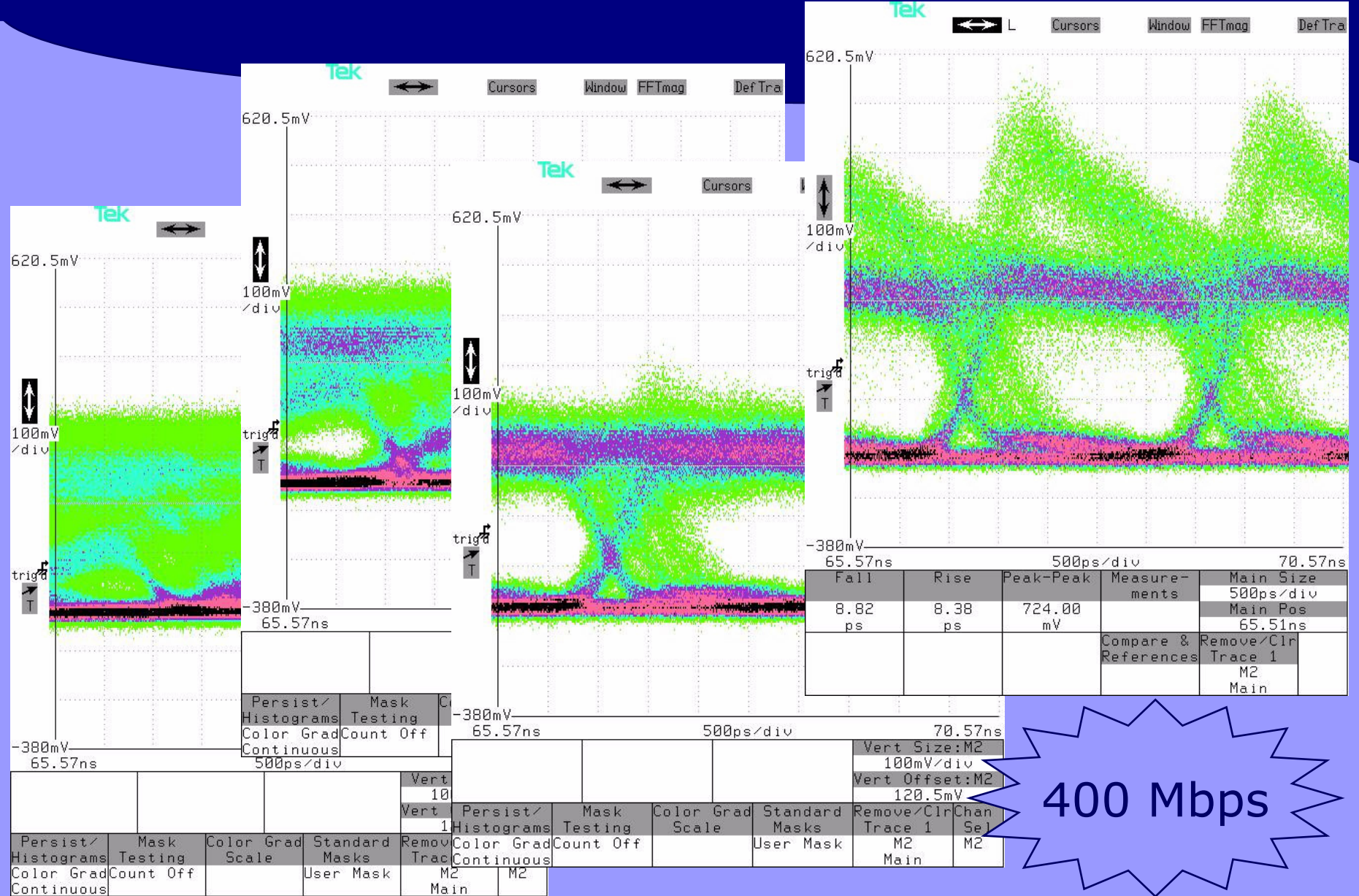
transistor zorgt voor inverse stroompuls

Karakterisatie van CMOS geïntegreerde aanstuurcircuïten



open oogdiagram tot 660 Mbps,
ondanks de te grote RCLED ($32\mu\text{m}$)

Invloed van gepulste stroom



400 Mbps

Overzicht

- v Inleiding
- v Efficiëntie van RCLEDs
- v Realisatie van RCLEDs
- v Snelheidseigenschappen van RCLEDs
- v Studie van parallelle optische verbindingen
 - Ontwerp van simulatietool
 - De 'OIIC system demonstrator'
 - Enkele experimentele resultaten
- v Conclusies

Ontwerp van RCLEDs voor optische verbindingen

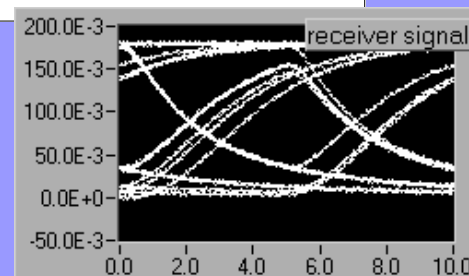
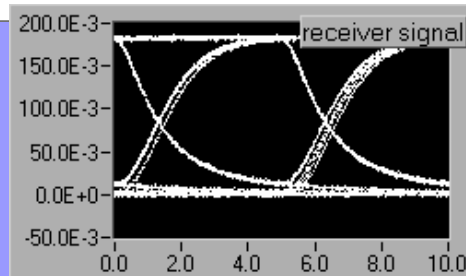
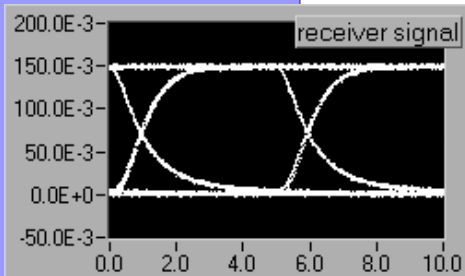
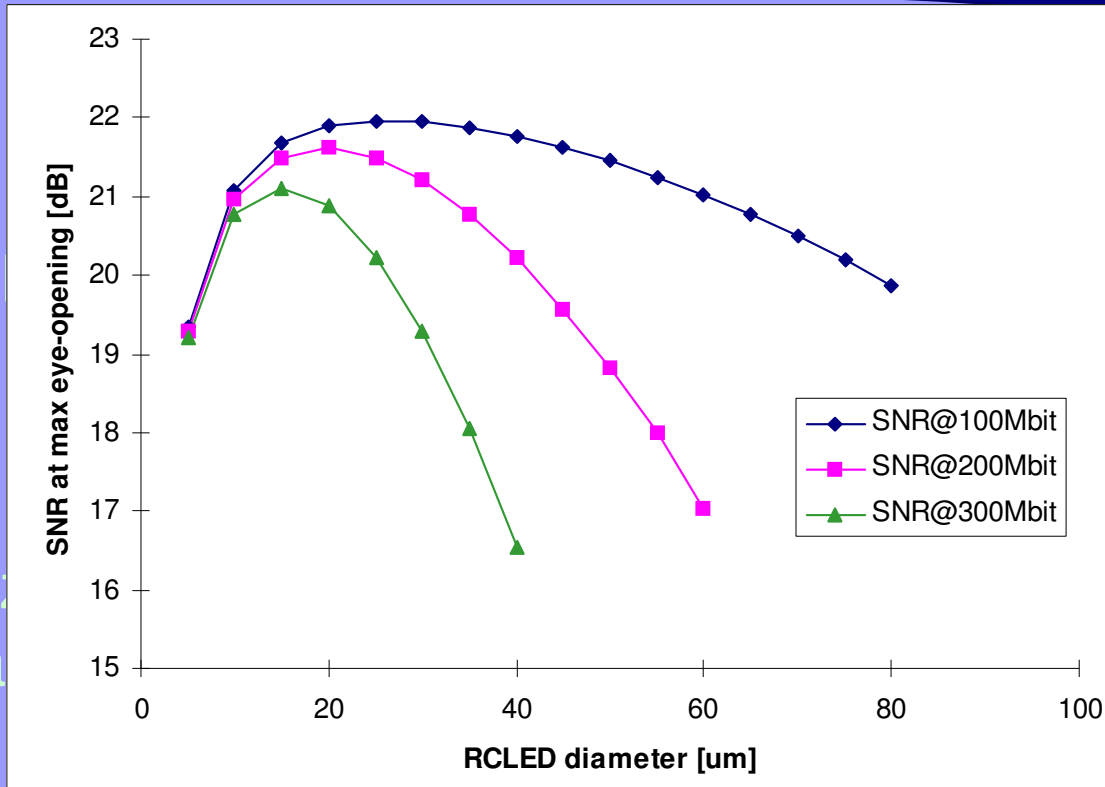
Kleine



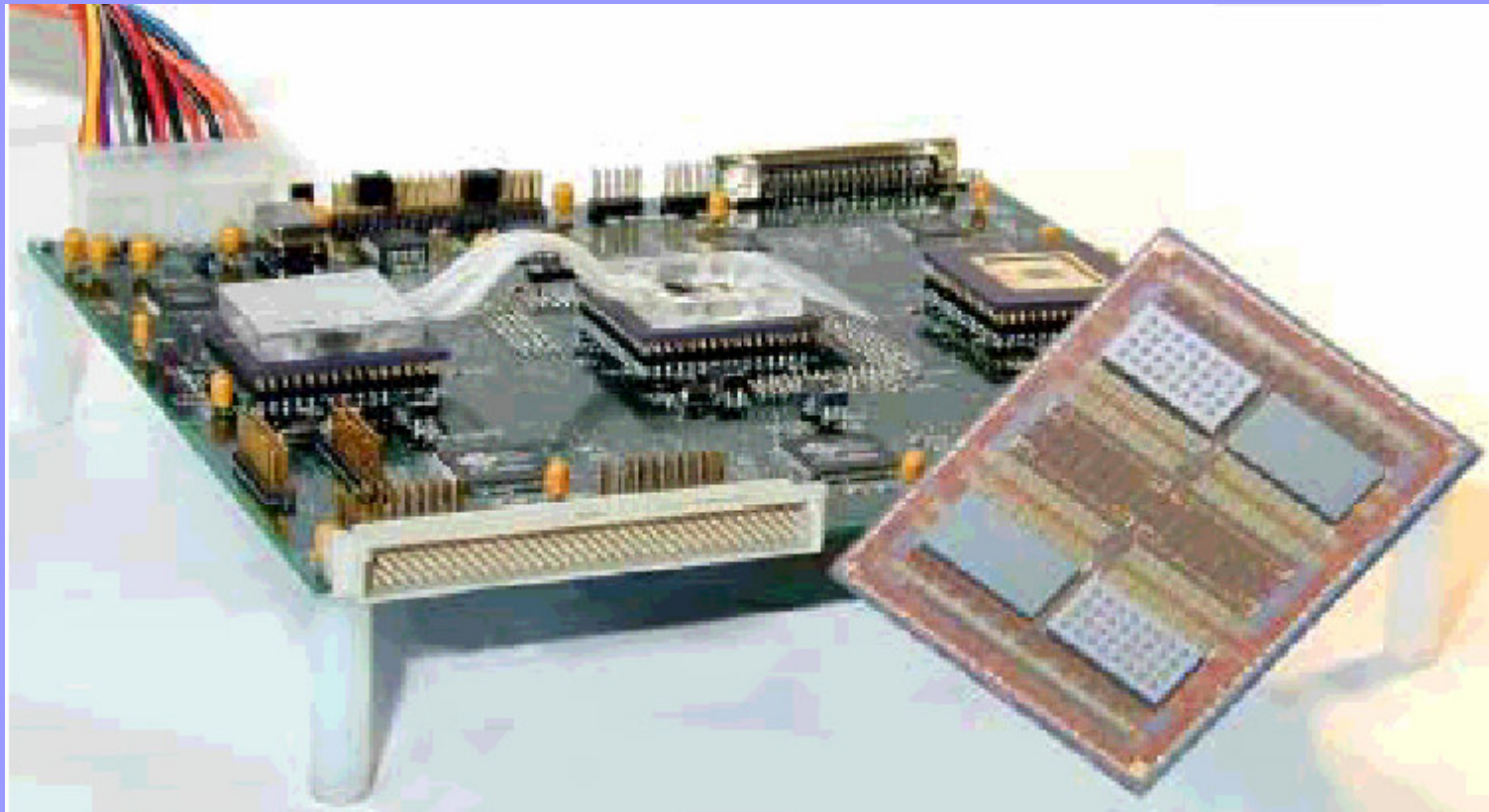
Grote



Onder:
simulatie



Een systeem met parallelle optische verbindingen

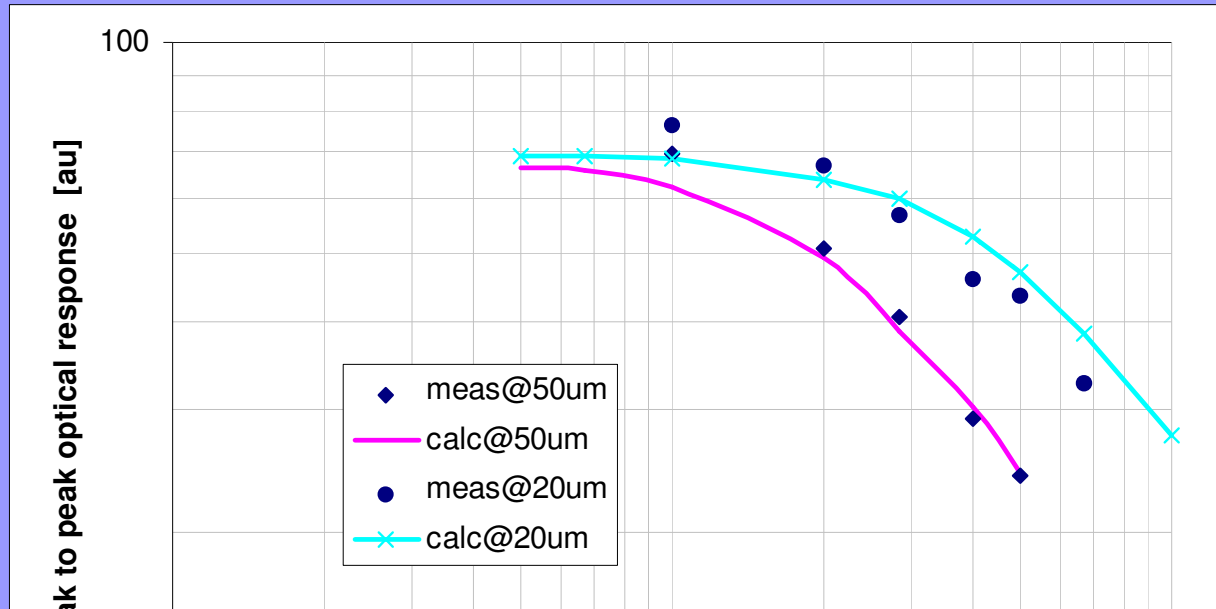


ordt
te

Metingen op RCLED-sysdemo



Vergelijking tussen meting en experiment



CONCLUSIES:

- ➔ goede overeenkomst, ook wat de snelheidsantwoorden betreft
- ➔ dit toont belang aan van het gebruik van kleine RCLEDs

Overzicht

- v Inleiding
- v Efficiëntie van RCLEDs
- v Realisatie van RCLEDs
- v Snelheidseigenschappen van RCLEDs
- v Studie van parallelle optische verbindingen
- v Conclusies

Overzicht en conclusies (1)

RCLEDs geoptimaliseerd :

- Hoge efficiëntie gerealiseerd (tot 4% in plastic vezel)
- Snelle RCLED aansturing gerealiseerd
 - RCLED + stroomsturing 250 Mbps
 - RCLED + spanningsturing 1 Gbps
 - RCLED + CMOS-aansturing 660 Mbps
- Parallele optische verbinding met RCLEDs werkt al bij enkele mA stroom

Overzicht en conclusies (2) :

Is de RCLED de ideale lichtbron ?

- ☺ Eenvoudige structuur, dus betrouwbaar
- ☺ Voldoende efficiënt
- ☺ Goede elektrische eigenschappen
- ☺ Voldoende snel

MAAR...

- ☹ De invloed van het microcaviteitseffect is beperkt. De efficiëntie van de RCLED is daarom niet zeer hoog in vergelijking met andere (meer geavanceerde) componenten
- ☹ De maximale snelheid zal steeds lager zijn dan deze van een laser (zoals de VCSEL)