

Een geïntegreerde InP-gebaseerde optische golfgeleiderisolator op basis van ferromagnetische CoFe- contacten

Mathias Vanwolleghem

17 mei 2005

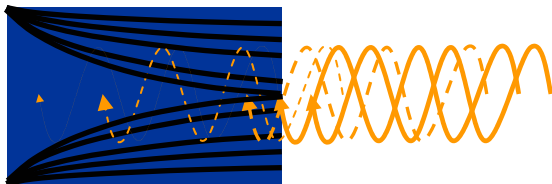
= “inbouwbaar” in een groter complex geheel (bv. een optische chip)

een halfgeleider materiaalsysteem kan IR licht genereren en geleiden

Een geïntegreerde InP-gebaseerde optische golfgeleiderisolator op basis van ferromagnetische CoFe-contacten

een optische terugslagklep (bv. voor dat IR licht)

een metaallegering die “vanzelf” magnetisch is



Opbouw van de presentatie

Situering problematiek en “theoretische” fundamenten

- waarom isolatoren?
- hoe werkt een isolator ?
- wat bestaat er en waarom is er een probleem ?
- wat is onze oplossing ?

Onze aanpak

- wat zijn de uitdagingen ?
- ... hoe lossen we ze op ?
- ... maar vooral: werkt het ?

Opbouw van de presentatie

Situering problematiek en “theoretische” fundamenten

- **waarom isolatoren?**

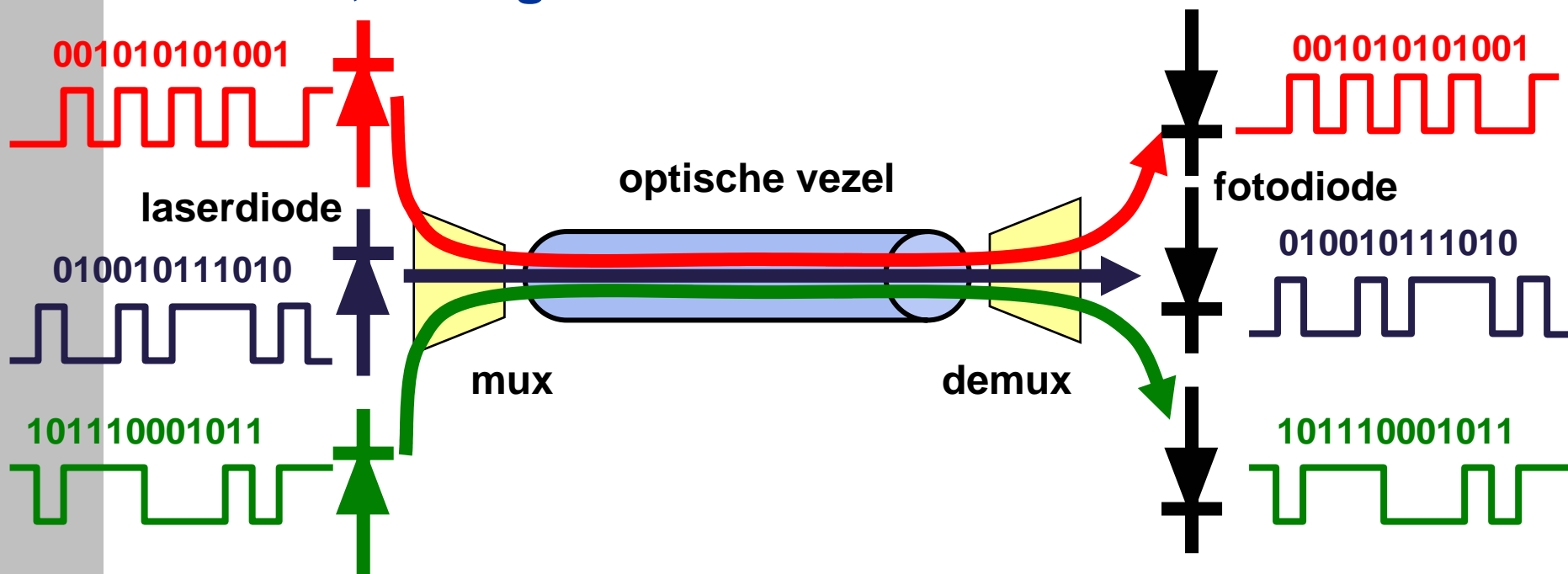
CONTEXT = Optische telecommunicatie

- **een terugslagklep dient om iets te beschermen tegen schadelijke “reflow”**
- **een optische terugslagklep beschermt dus optische componenten die gevoelig zijn aan reflecties**
- **wat moet er beschermd worden en waarom**

Optische telecommunicatie

Informatie verzenden met behulp van lichtpulsjes over een optische vezel:

- snel, weinig verlies



- en ... grote capaciteit (meerdere “kleurtjes” = WDM)

Optische telecommunicatie

De capaciteit is indrukwekkend:

elke laser \rightarrow 10Gbit/s = 10.000.000.000 bits/s

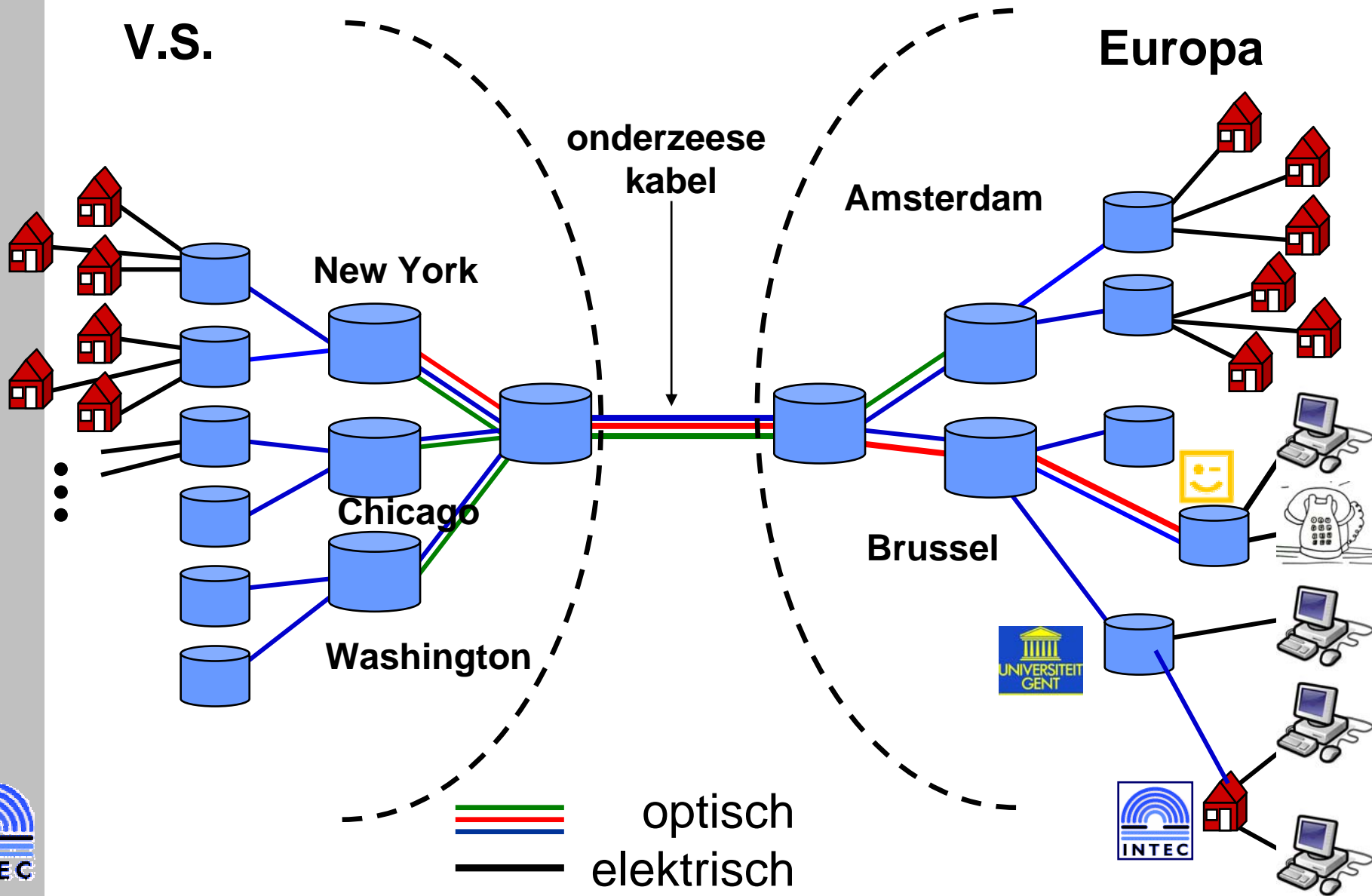
= 2 CD's per sec

\approx 1 DVD per 3 se

WDM met 32 kleurtjes = 64 CD's per sec = 32 DVD's /s

Maar dat komt niet tot aan je voordeur ☹️

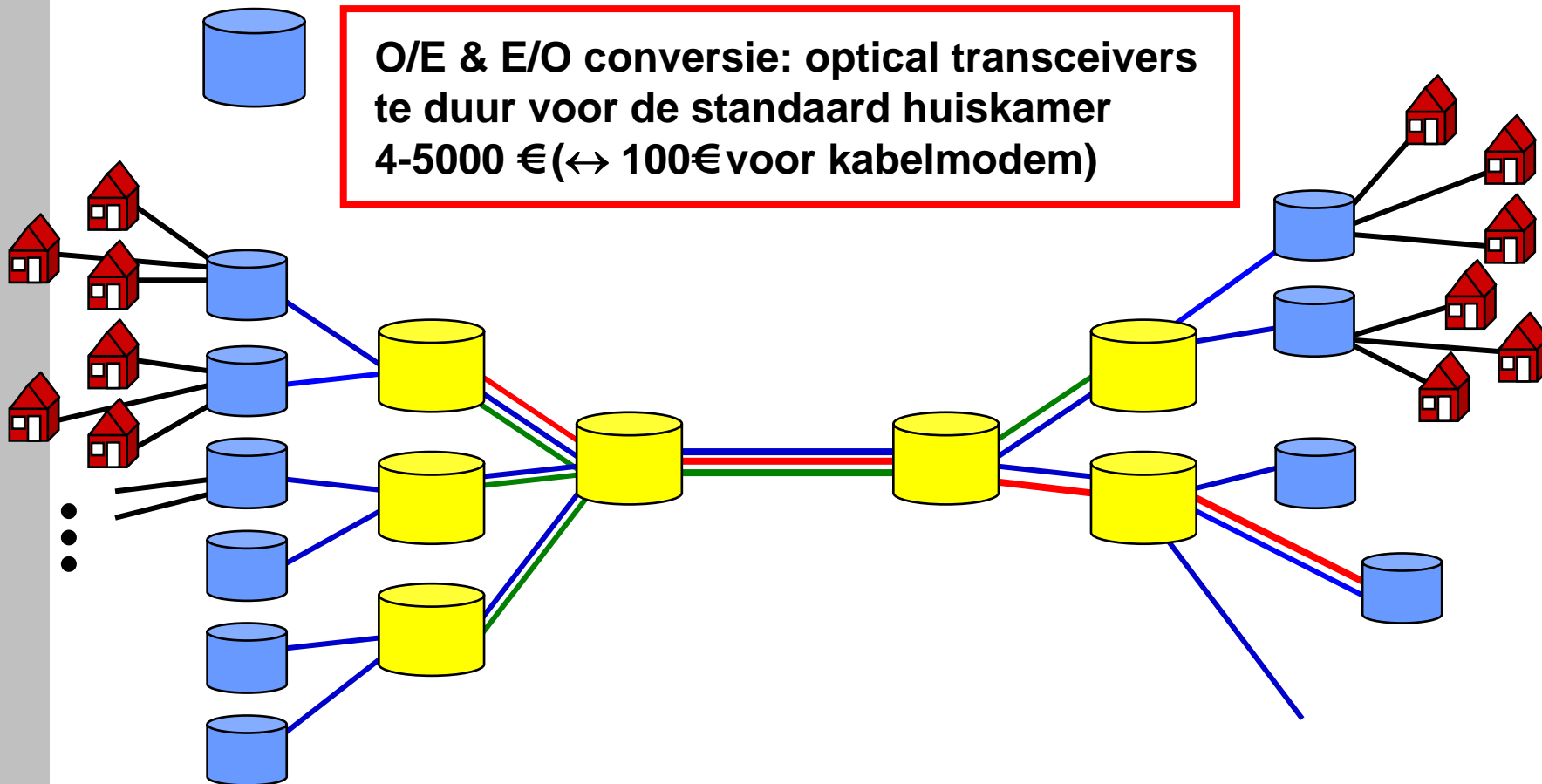
Optische telecommunicatie



Optische telecommunicatie

Problematiek behandeld in dit werk

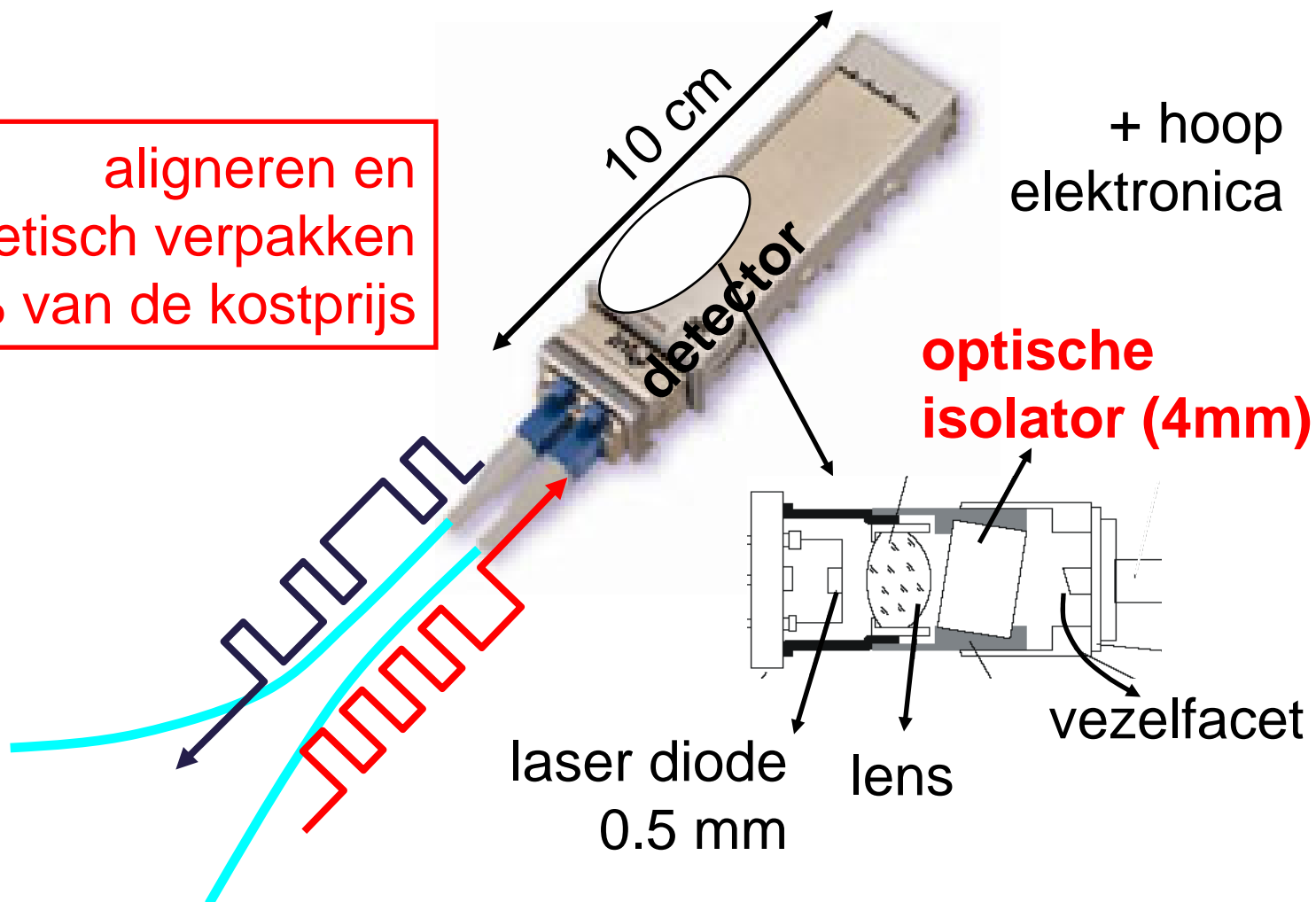
O/E & E/O conversie: optical transceivers te duur voor de standaard huiskamer 4-5000 € (↔ 100€ voor kabelmodem)



Optische telecommunicatie

optische transceiver

aligneren en
hermetisch verpakken
= 90% van de kostprijs



Optische isolator

grote “lompe” component

- inbouw in laser : verantwoordelijk voor een groot deel van de kost
- weglaten ?

ideaal



OPTISCHE ISOLATOR is van levensbelang in een moderne snelle optische telecomlink

- “**...** (↔WDM)
- ver...gen fluctueert chaotisch (DATAVERLIES!!!)
- verergert naarmate kortere bitpatronen

Opbouw van de presentatie

Situering problematiek en “theoretische” fundamenten

- waarom isolatoren?
- hoe werkt een isolator ?

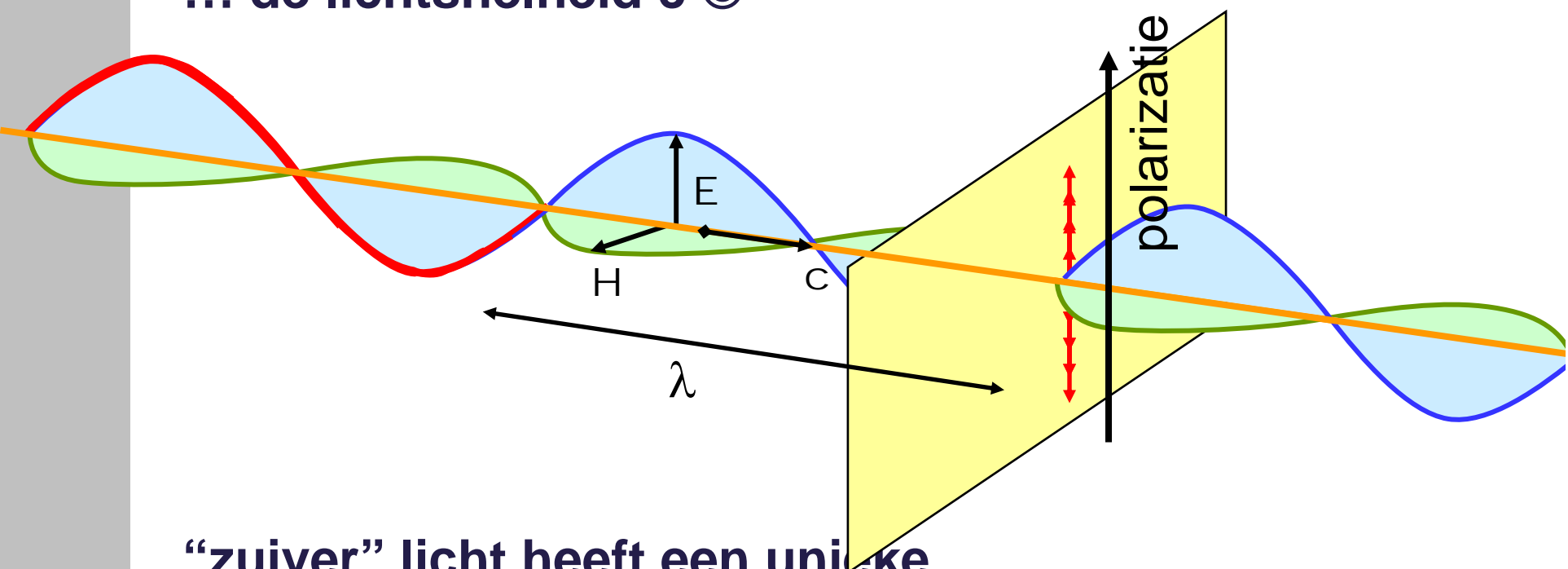
➤ **Wat is licht ? Wat is polarizatie ?**

➤ **Hoe kunnen we licht een terugslagklep doen “voelen” ?**

➤ **Waarom hebben we hier een magneetveld voor nodig ?**

Licht = elektromagnetische straling

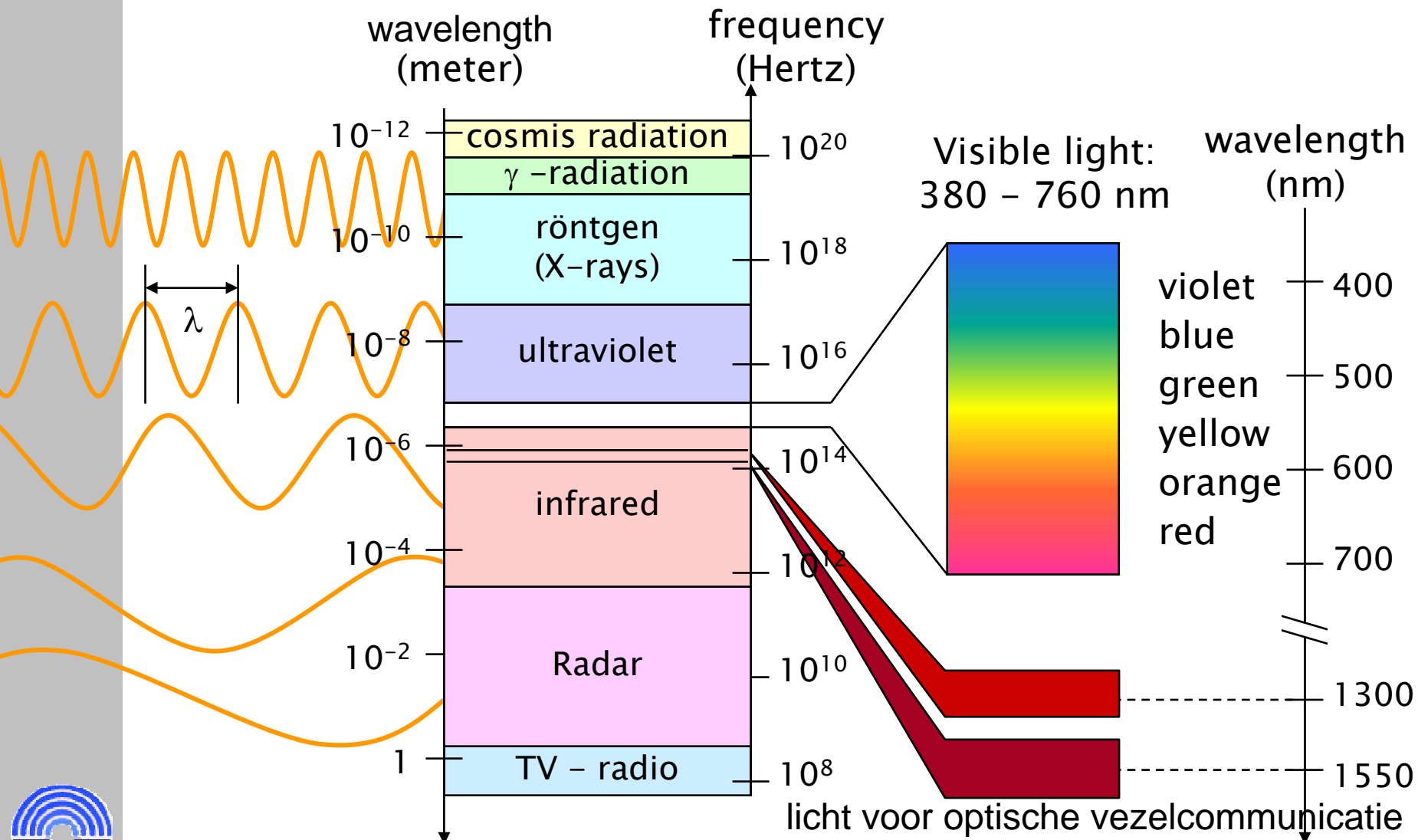
Lichtstraal is een propagerende trilling van elektrische (E) en magnetische (H) velden die zich voortplant met ... de lichtsnelheid c 😊



“zuiver” licht heeft een unieke

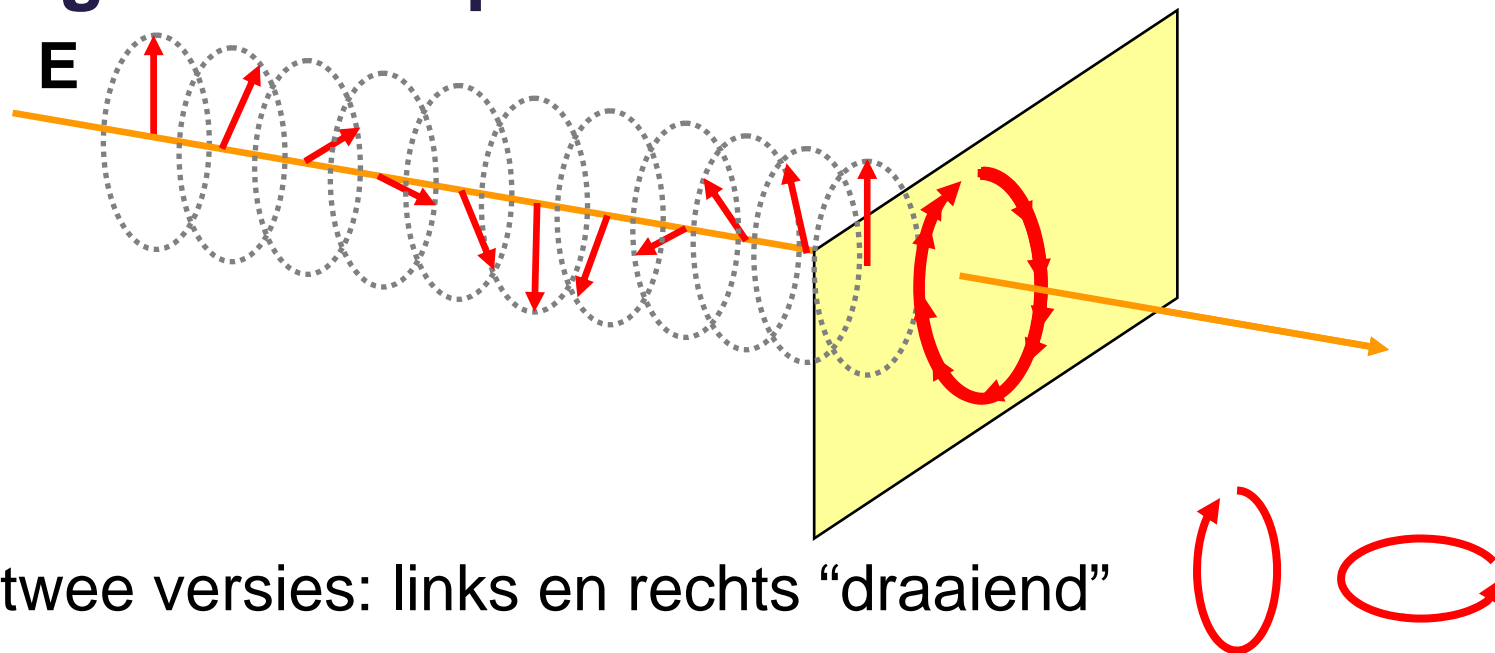
- trillingsfrequentie f , golflengte λ (afstand tijdens 1 trilling= c/λ)
- polarizatie

Licht



Polarizatie

polarizatie niet noodzakelijk lineair
algemeen elliptisch



twee versies: links en rechts “draaiend”

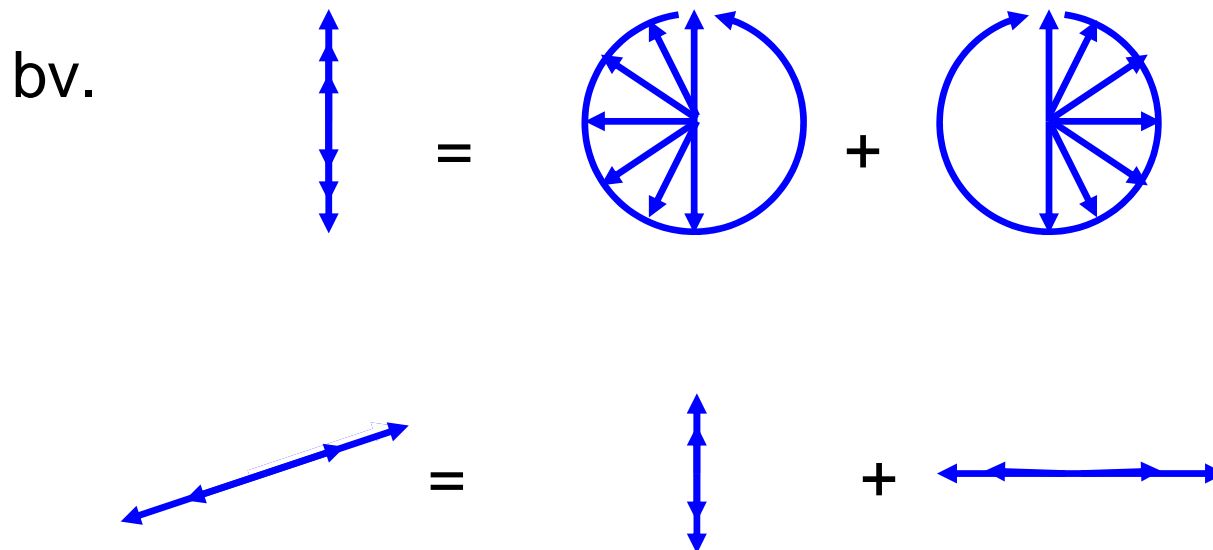
orthogonale polarizaties

niet uniek ! bijvoorbeeld ook:



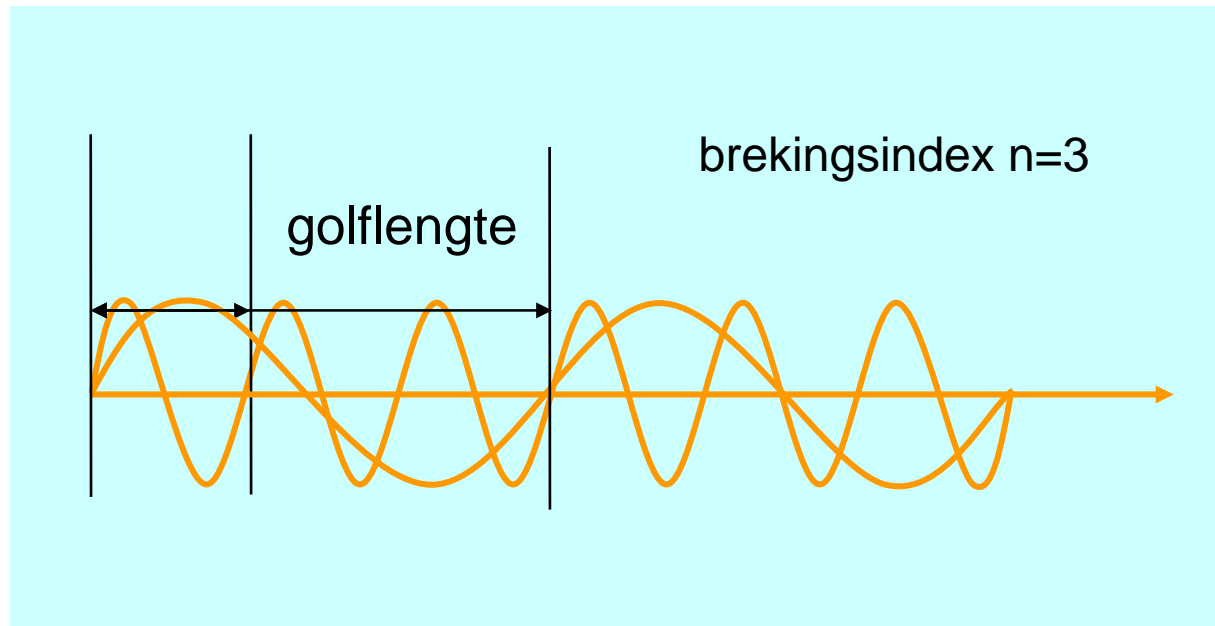
Polarizatie en licht – een paar wetten

- steeds 2 \perp polarizaties te kiezen, elke willekeurige polarizatie = som 2 \perp polarizaties



Propagatie van licht

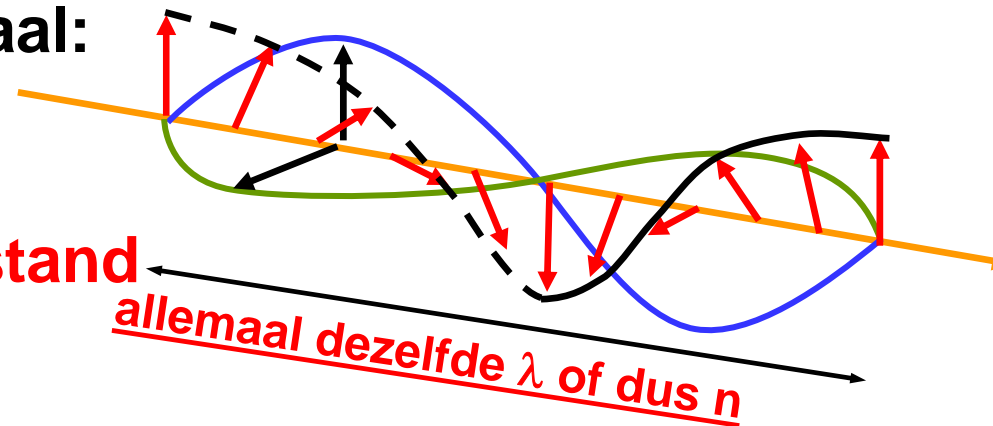
2. in een materiaal propageert licht n keer trager dan in het vacuum (λ wordt n keer korter)
 $n = \text{brekingsindex}$



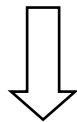
Propagatie van licht en polarizatie

3. niet alle polarizaties kunnen zich ongehinderd voortplanten in een materiaal: **enkel basispolarizaties**

in een “normaal” materiaal:
licht even snel
ongeacht richting
ongeacht polarizatietoestand



ISOTROOP MATERIAAL



alle polarizaties = basispolarizaties

Propagatie van licht en polarizatie

4. dus ... er bestaan ook niet-isotrope materialen?
licht plant zich voort met een brekingsindex
afhankelijk van zijn richting en van zijn
polarizatietoestand

niet alle polarizaties voelen zelfde n
(m.a.w. \neq snelheid)

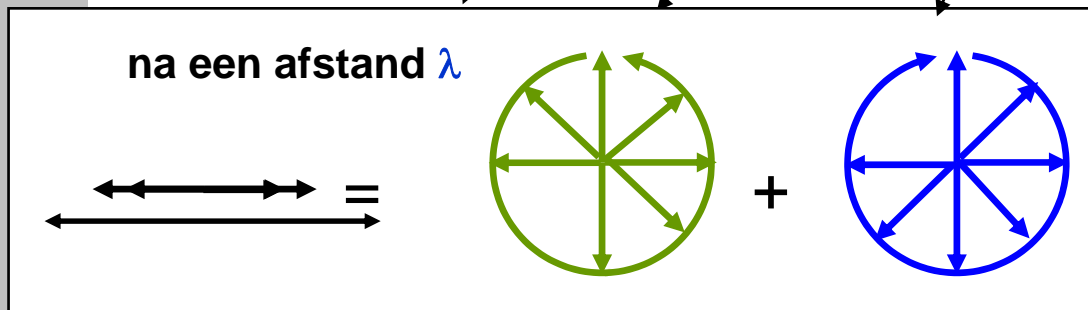
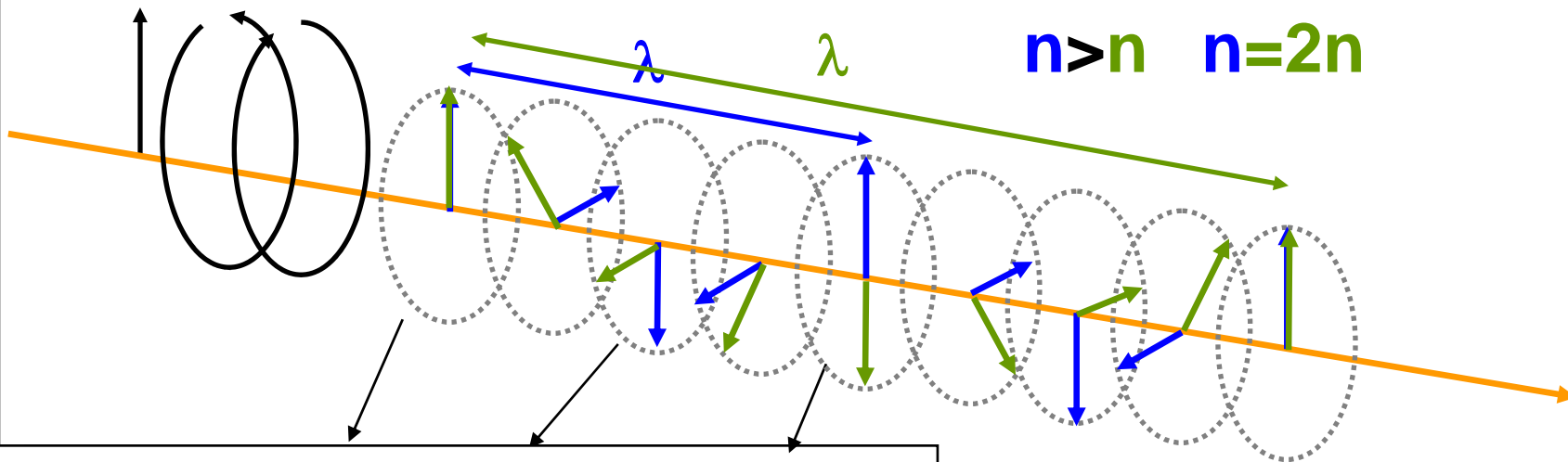
EN

in elke richting slechts twee unieke \perp
basispolarizaties (die dus “vorm” houden)

ANISOTROOP MATERIAAL

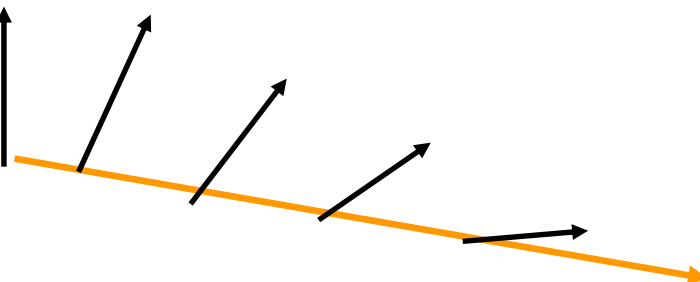
hoe gedraagt licht zich in zo een materiaal ?

Propagatie in anisotroop materiaal



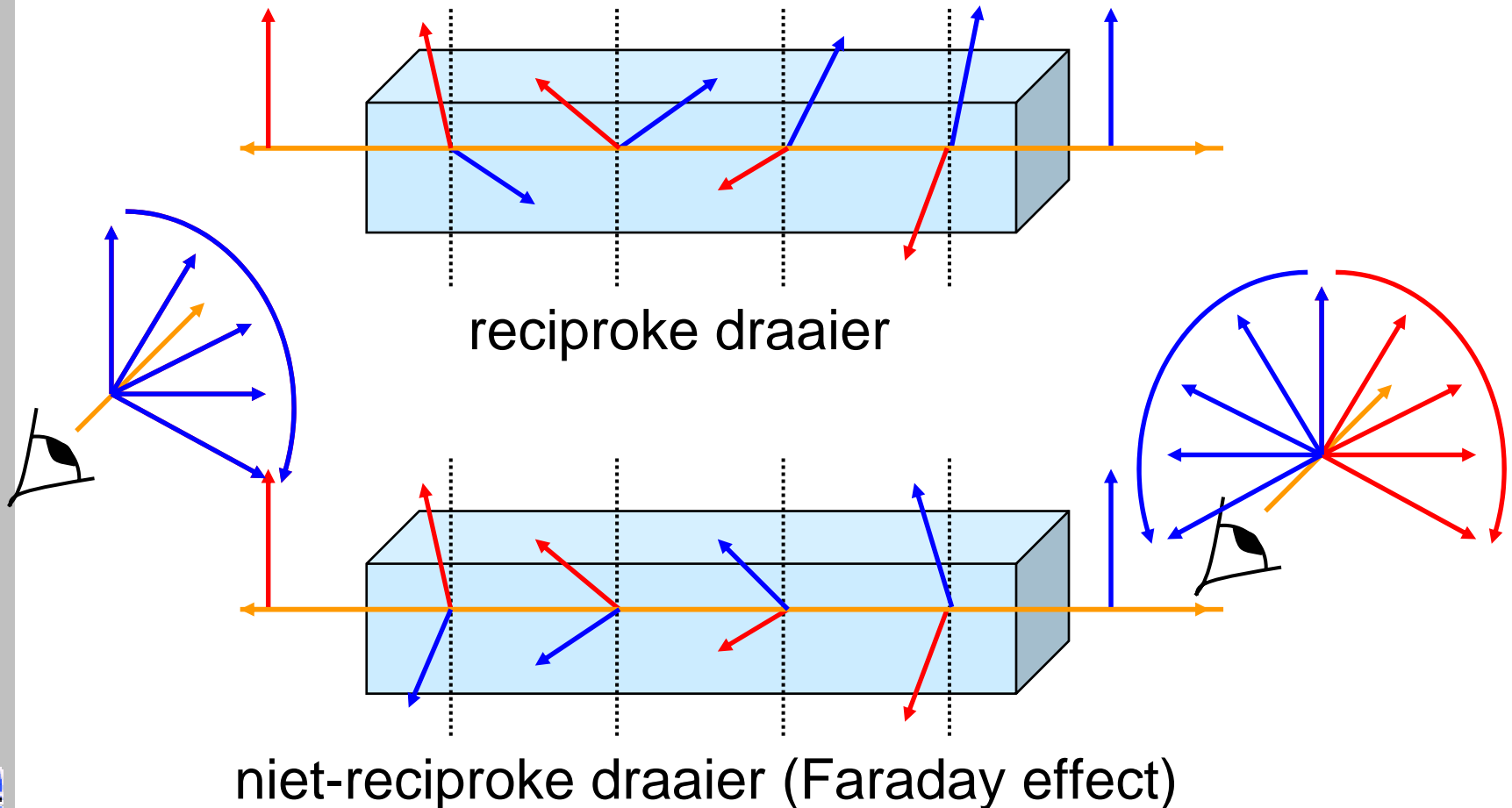
als niet-basispolarizatie "invallt" en voortplant in anisotroop materiaal

↪ polarizatie niet behouden in dit geval draait ze



Anisotrope materialen

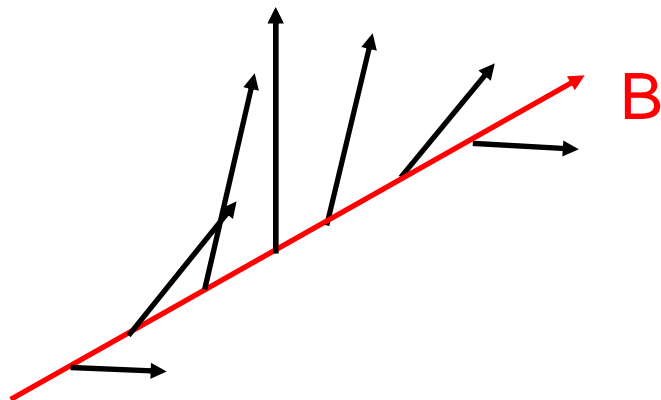
kunnen inkomende polarizatie doen draaien
twee soorten



Niet-reciproke materialen

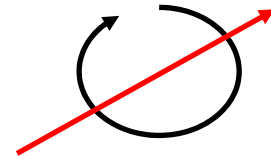
Hoe kan je een materiaal niet-reciprook maken? Is de natuur niet altijd reciprook? *als iets vooruit loopt kan het ook achteruit lopen...*

ja, behalve als er b.v. een vast magneetveld aanwezig is



B

voorkeurs "draairichting"



magneto-optica (MO): licht beïnvloeden met magneetvelden

veel MO effecten: niet-reciproke "draaiers", niet-reciproke "reflectoren", niet-reciproke absorbers, ...

Niet-reciproke MO materialen

veel soorten MO materialen, gemeenschappelijk kenmerk: **magnetisch**

kunnen inwendig een groot magnetisch veld opbouwen

meest gebruikte:

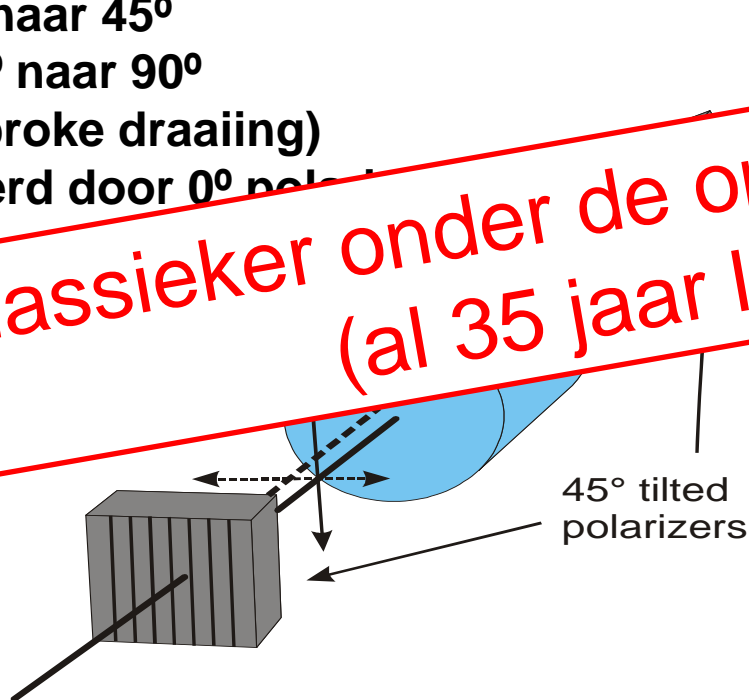
- **magnetische granaten (Yttriumijzeroxide)**
 - transparant !
 - grote niet-reciproke effecten (10⁰/mm)
 - hebben meestal magneet nodig om magnetisch te blijven
 - niet zo gemakkelijk te maken en vooral niet te combineren met niet-granaten
- **ferromagnetische metalen (Fe, Ni, Co en legeringen)**
 - héél sterk absorberend (indringdiepte: 0,00002 mm)
 - héél grote niet-reciproke effecten (10000⁰/mm)
 - zijn spontaan magnetisch en blijven dat
 - kunnen gemakkelijk aangebracht worden “op zowat alles”

Onze eerste terugslagklep

45° niet-reciproke draaier (Faraday rotator) (granaat)
twee zogenaamde polarisatoren: 45° tov elkaar gedraaid

V: van 0° naar 45°
A: van 45° naar 90°
(niet-reciproke draaiing)
geblokkeerd door 0° polarisator

de klassieker onder de optische isolatoren
(al 35 jaar lang)



door kleine imperfecties:
niet perfect 90°, nog klein
beetje lek door 0° polarisator

ISOLATIENIVEAU
(uitgedrukt in dB)

dB relatieve eenheid van versterking/verzwakking:

10dB = 10 x versterkt

-10dB = 10 x verzwakt

20 dB = 100 x versterkt

-20dB = 100 x verzwakt

30dB = 1000 x versterkt

...

Opbouw van de presentatie

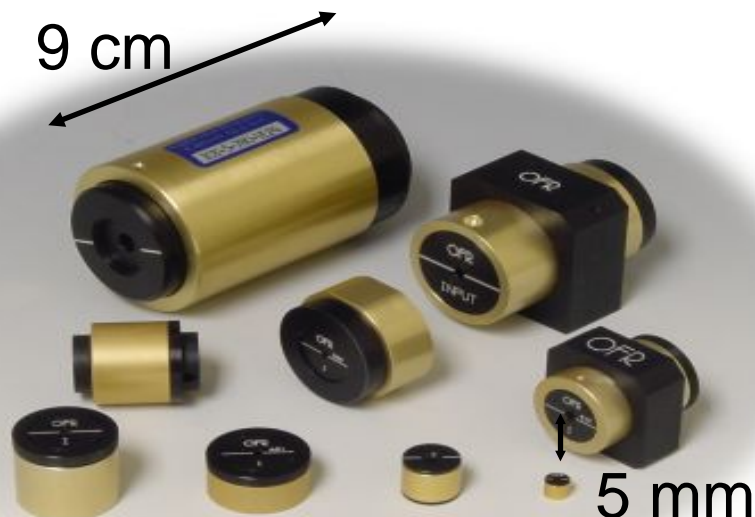
Situering problematiek en “theoretische” fundamenten

- waarom isolatoren?
- hoe werkt een isolator ?
- **wat bestaat er en waarom is er een probleem ?**

- **Waarom passen bestaande optische isolatoren zo moeilijk in een “laserdoosje”?**
- **Hoe heeft men dit proberen verbeteren?**
- **... met succes ?**

Bestaande commerciële isolatoren

Allemaal van het Faraday rotator type



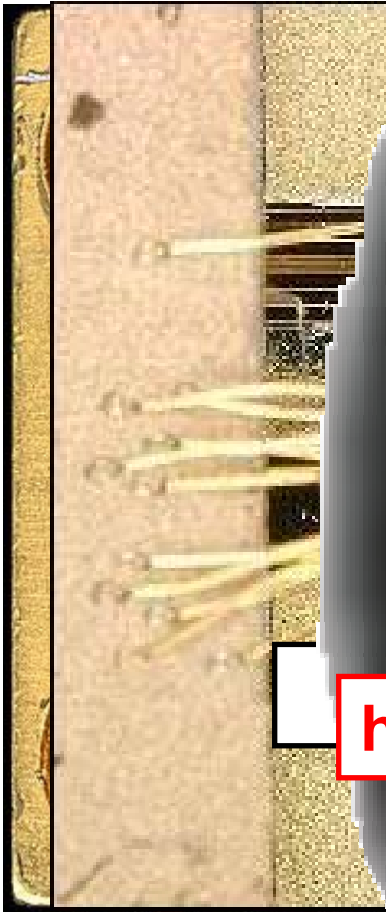
grote variaties afhankelijk van de spec's:

- λ (bv. 1550nm) en λ -bereik (1530-1562nm)
- isolatiesterkte: $-40\text{dB} = 1/10^4$
- voorwaarts verlies: -0.5dB

werken goed en zijn niet duur (tot 100-tal €)

MAAR zijn groot

Probleem

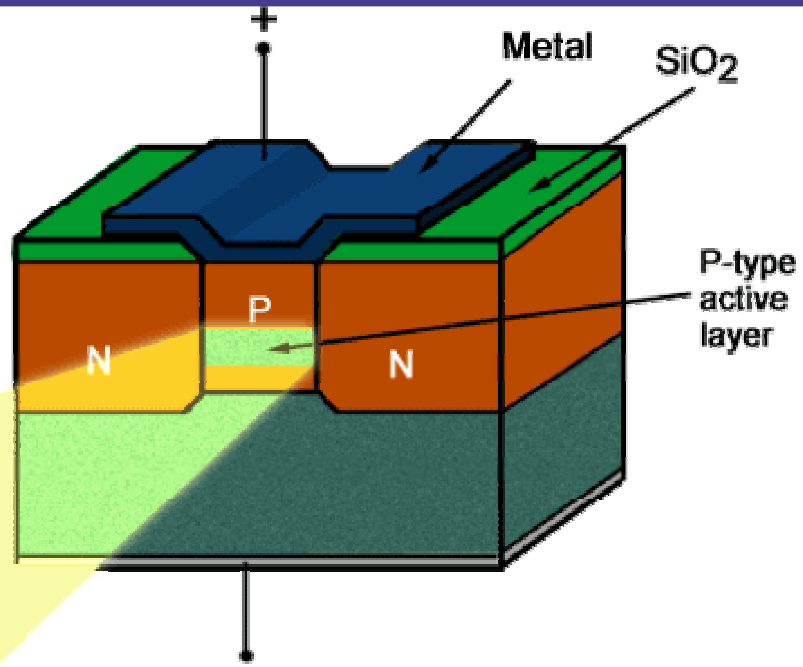
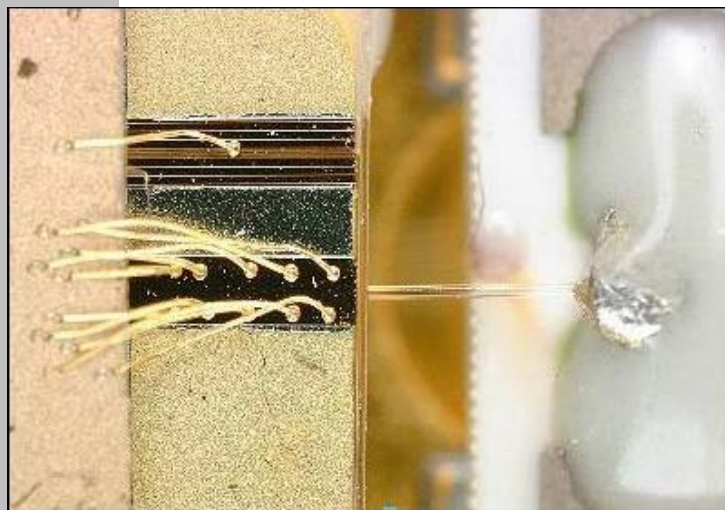


**en in werkelijkheid nog eens X 2
+ lenzen !**

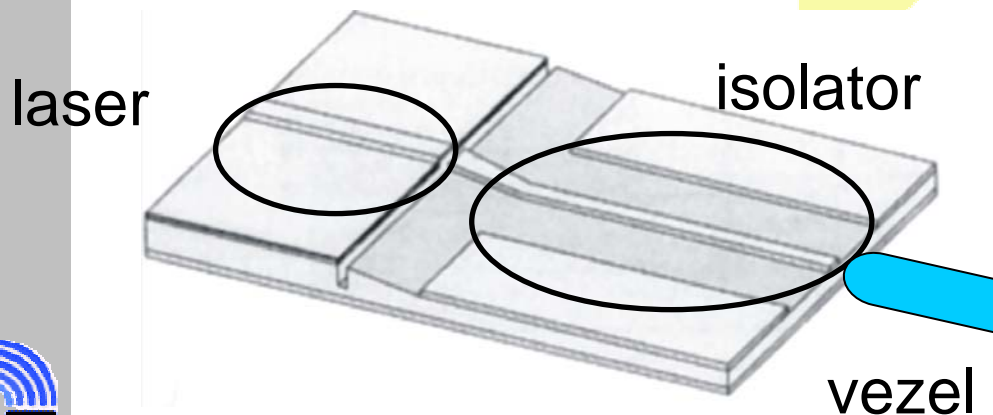
**om uiteindelijk een lichtbundeltje met
een \varnothing 1/500 mm uit de laser door de
monster-isolator te sturen en in een
vezel met \varnothing 1/100 mm**

heel moeilijk en duur verpakkingsprobleem

Probleem



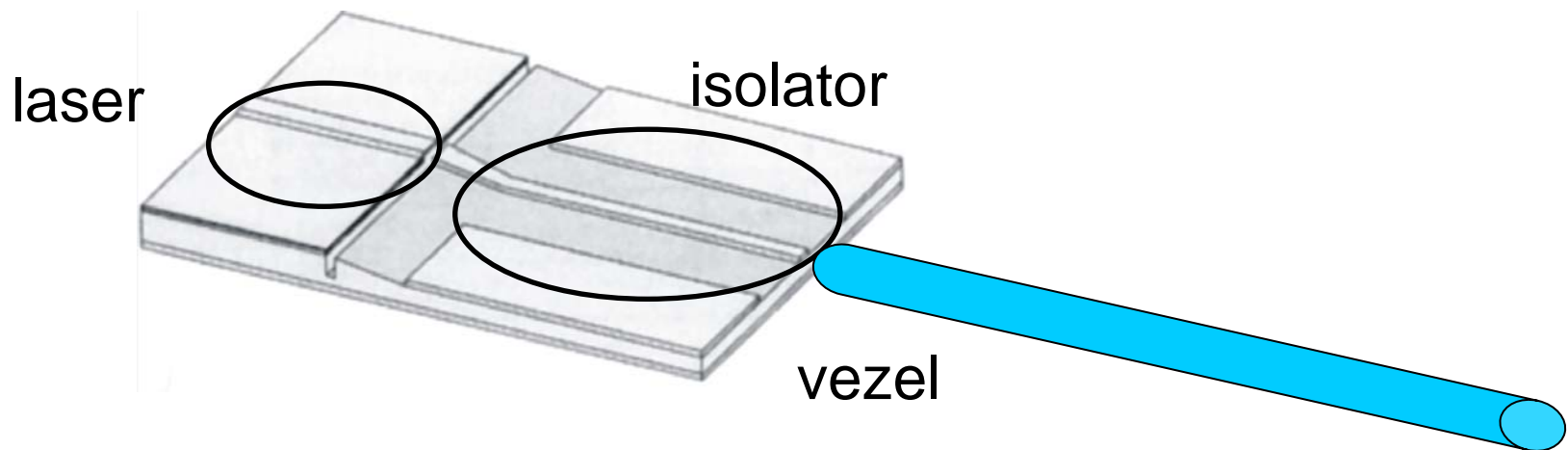
we willen dus een isolator met een chipstructuur



1 enkele chip:
 massaproductie, reductie
 alignatie- en
 verpakkingsprobleem,
 stabiel, kleiner,
GOEDKOPER

Optische chip isolator

Doel



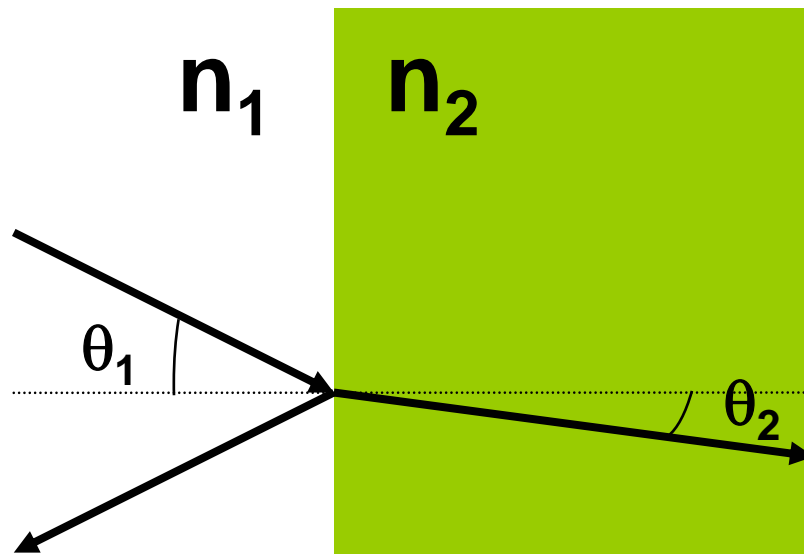
2 uitdagingen:

1. kan dit in een optische chip
2. ... en kan die optische chip “samengebouwd” worden met de laserchip

Lichtgeleiding in een optische chip

Lichtbreking

- aan de overgang tussen 2 materialen
- brekingsindex n

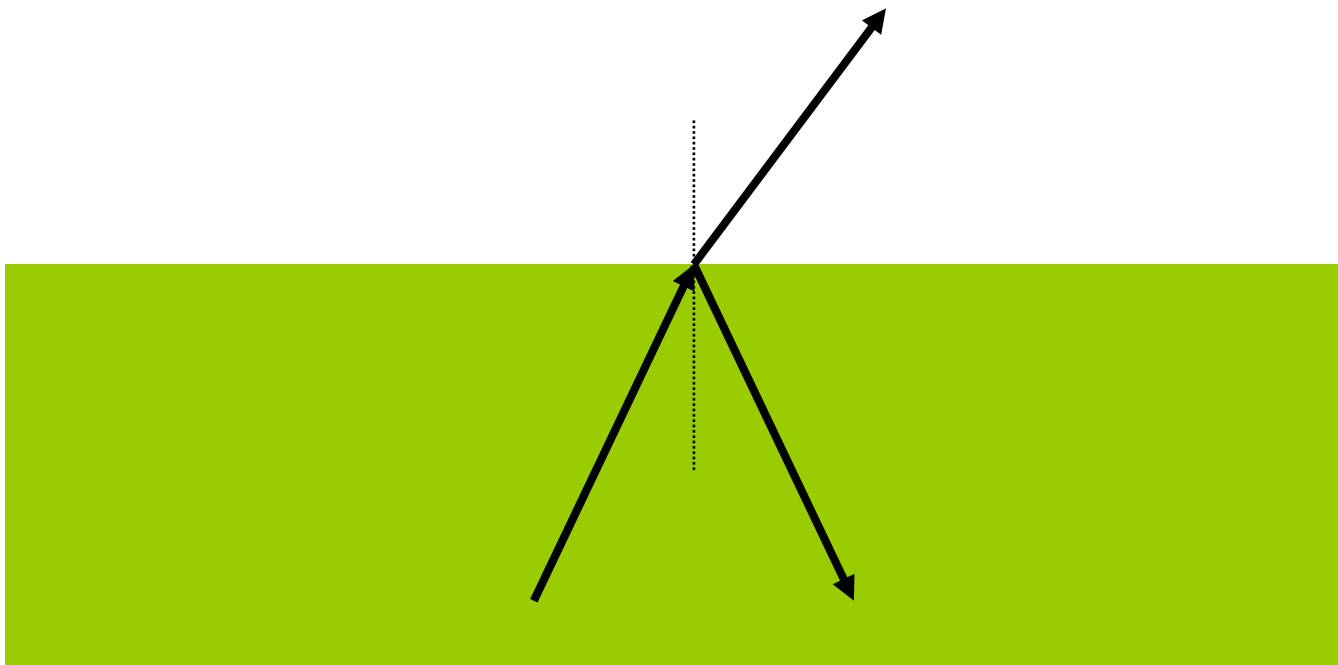


$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Lichtgeleiding in een optische chip

Lichtbreking (refractie)

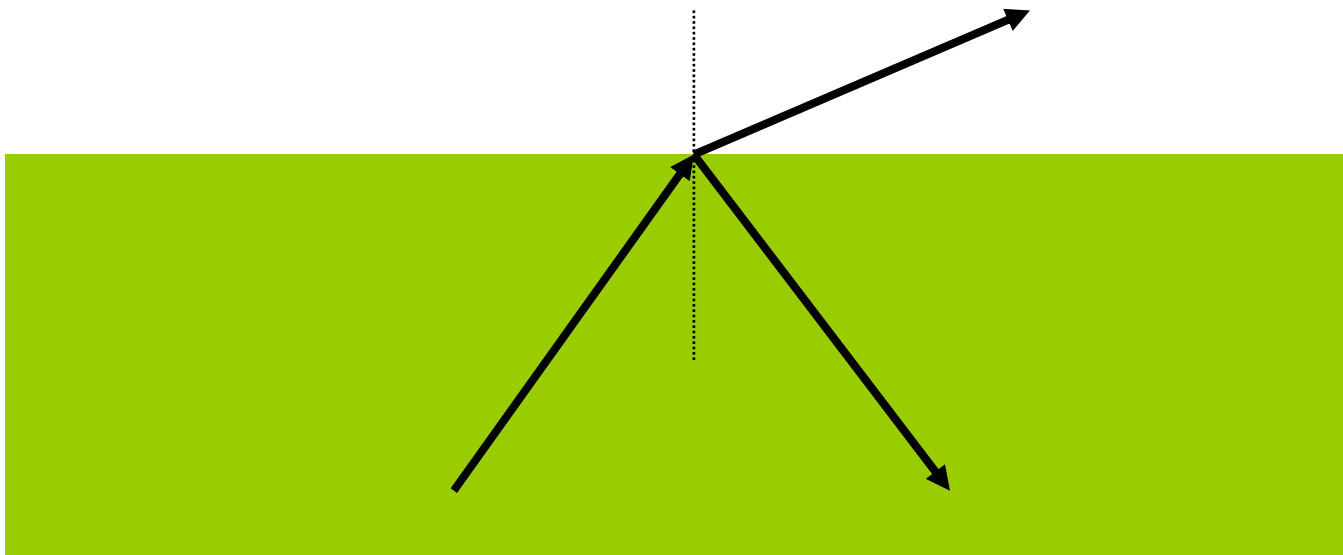
- inval vanuit materiaal met hogere brekingsindex



Lichtgeleiding in een optische chip

Lichtbreking (refractie)

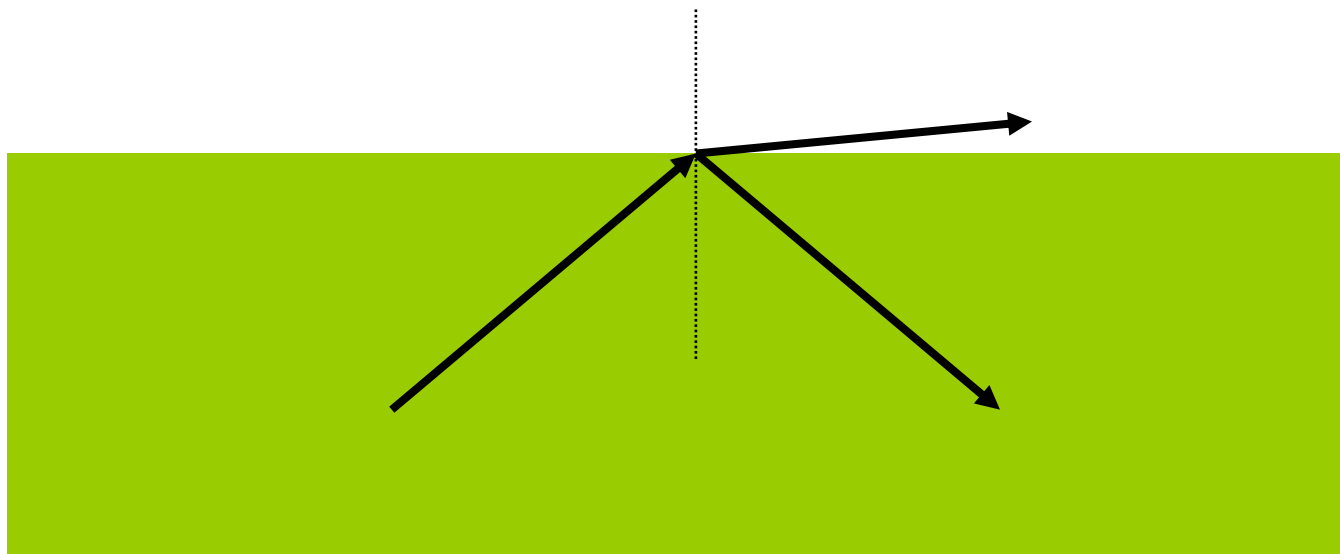
- inval vanuit materiaal met hogere brekingsindex
- als de hoek vergroot



Lichtgeleiding in een optische chip

Lichtbreking (refractie)

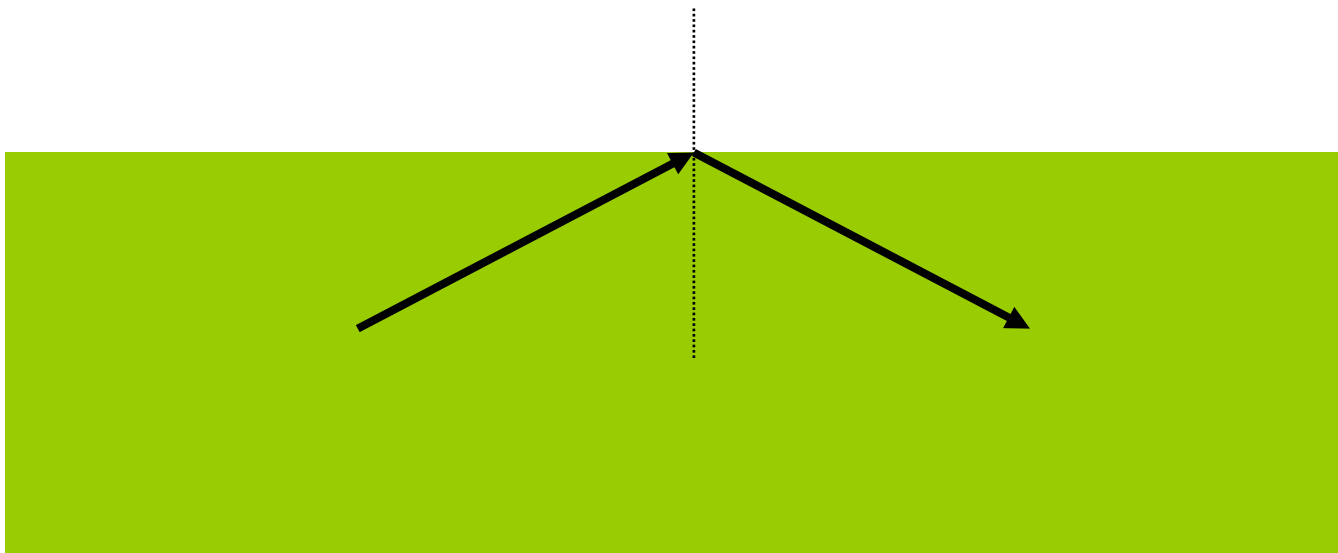
- inval vanuit materiaal met hogere brekingsindex
- als de hoek vergroot



Lichtgeleiding in een optische chip

Lichtbreking (refractie)

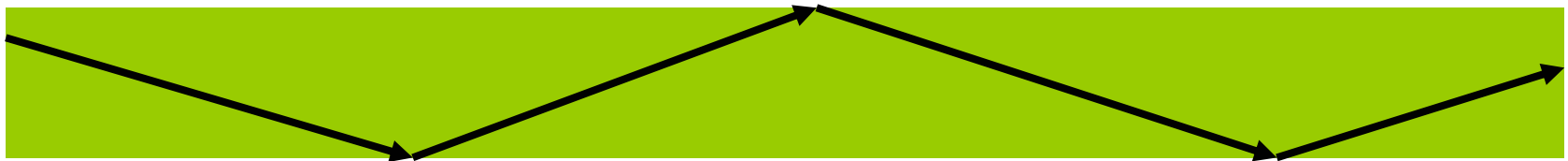
- inval vanuit materiaal met hogere brekingsindex
- als de hoek voldoende groot is :
- totale interne reflectie



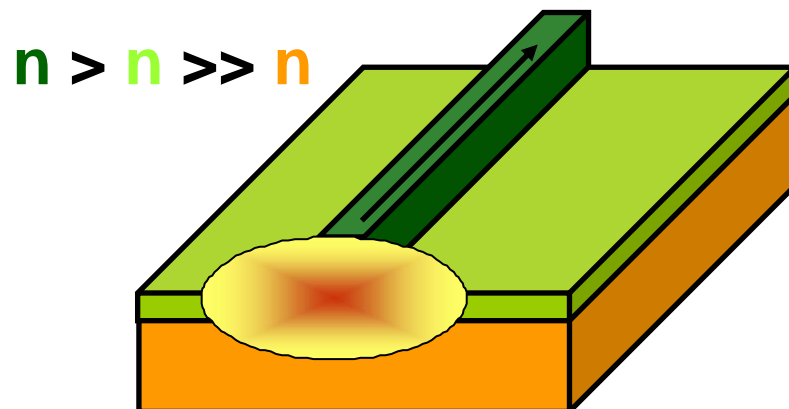
Lichtgeleiding in een optische chip

Totale interne reflectie

- licht kan 'gevangen' zitten in materiaal met hogere brekingsindex



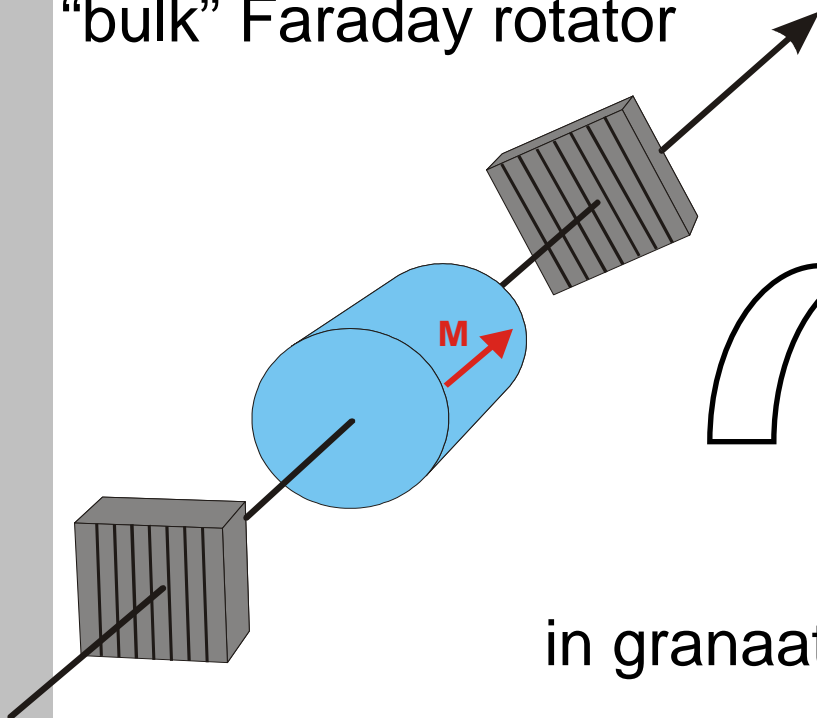
- in meerder richtingen indexverschil: optische chipgolfsgeleider



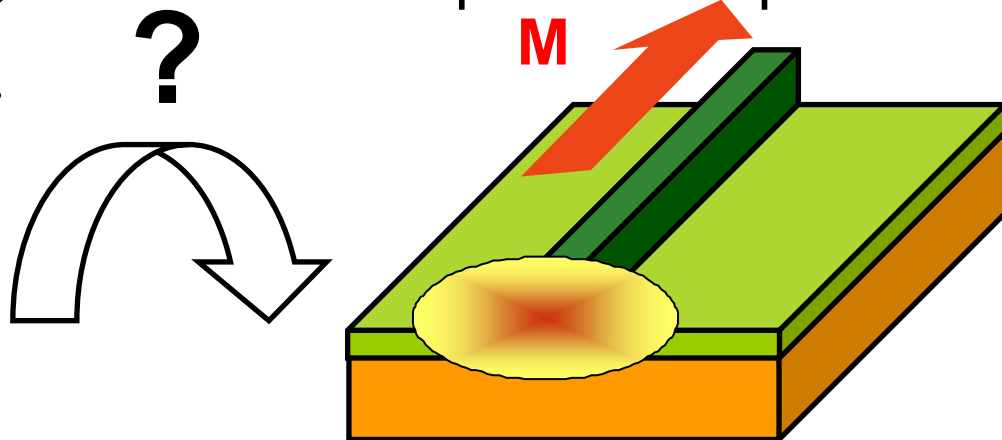
- niet zozeer lichtstralen,
- eerder concentratie van licht in gebied hoge index
 \Rightarrow geleide mode
 \Rightarrow plant zich voort als 1 "geheel"

Optische chip isolator

“bulk” Faraday rotator



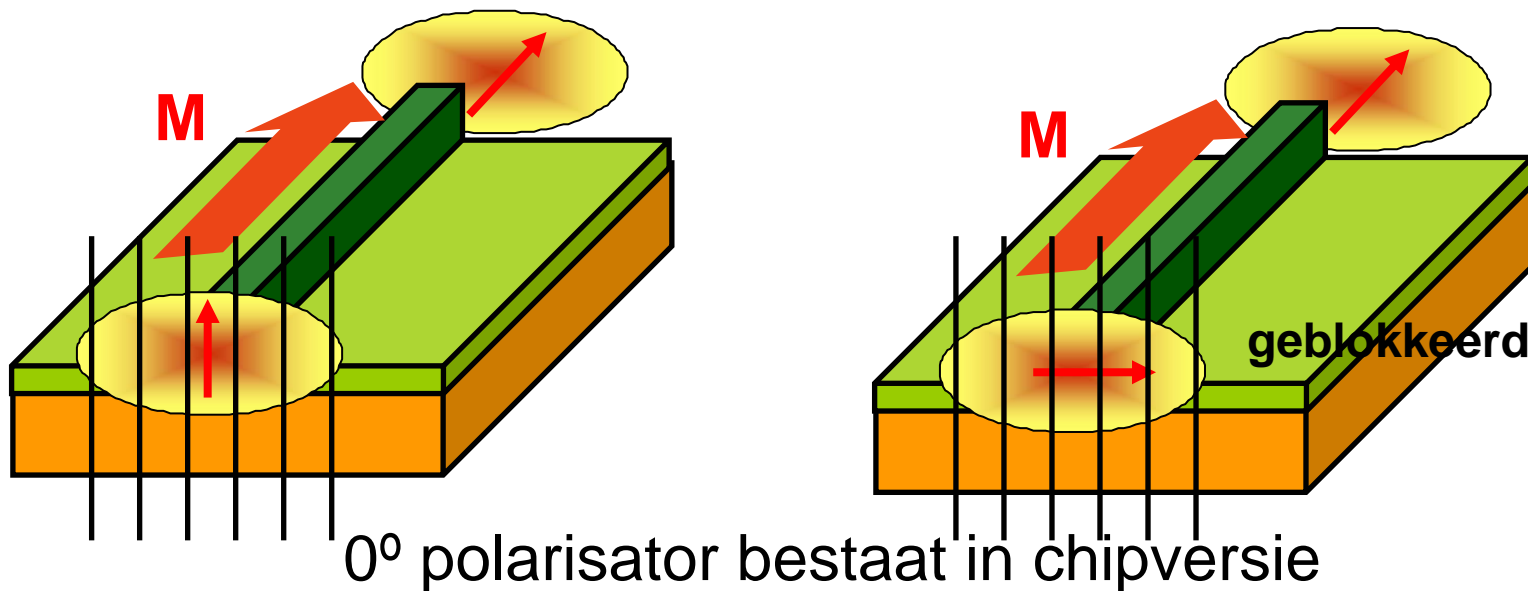
“planaire” Faraday rotator
in optische chip



in granaat materiaal kan je Δn maken
yttrium ijzeroxide $n = 2.3$
gadolinium gallium granaat: $n = 1.89$

**Onderzoekers proberen dit sedert jaren '70
... met beperkt succes**

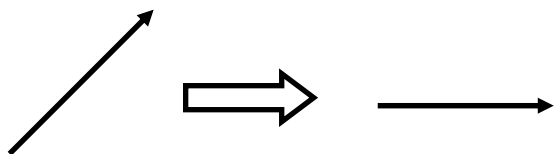
Pogingen tot chipversie isolator



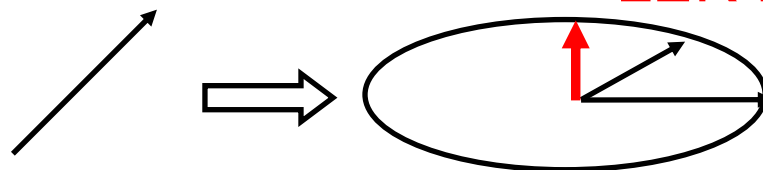
Problemen

1. geen 45° polarisatoren in een chipversie (wel 0° en 90°)
2. Faraday rotatie in een optische chip is niet zo efficiënt:

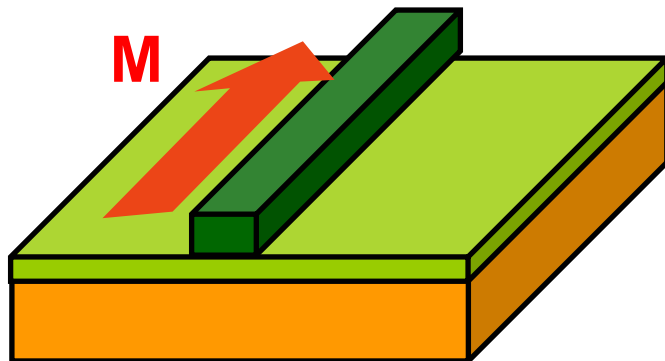
ideaal in



LEK !



Pogingen tot chipversie isolator

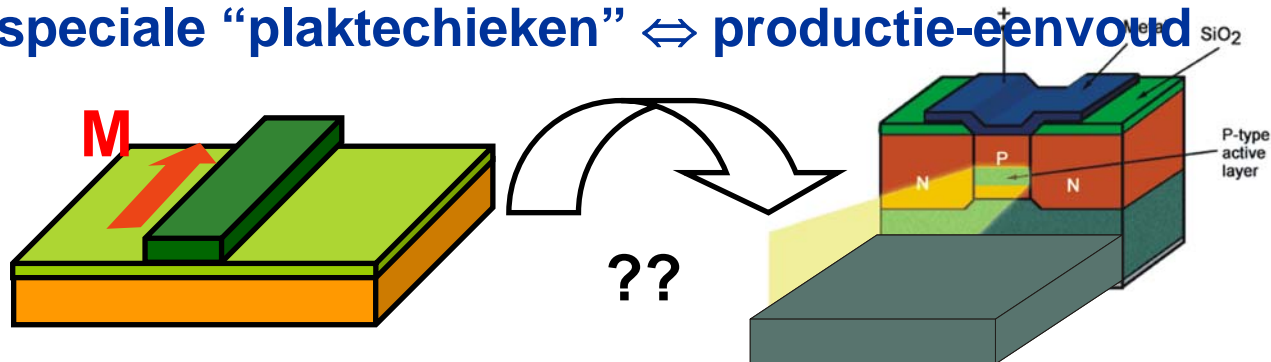


Beste resultaten behaald

- 20-30dB isolatie (uitdoving achterwaarts factor 100-1000)
- lengte 2-3 mm

Maar

- polarisatoren in chipversie ?
- moeilijk te maken (precisie moet heel hoog zijn)
- “doorzichtig” magnetisch materiaal nodig (granaten) magneet nodig
- verschilt sterk van lasermateriaal
speciale “plaktechieken” \Leftrightarrow productie-eenvoud



Opbouw van de presentatie

Situering problematiek en “theoretische” fundamenten

- waarom isolatoren?
- hoe werkt een isolator ?
- wat bestaat er en waarom is er een probleem ?
- **wat is onze oplossing ?**

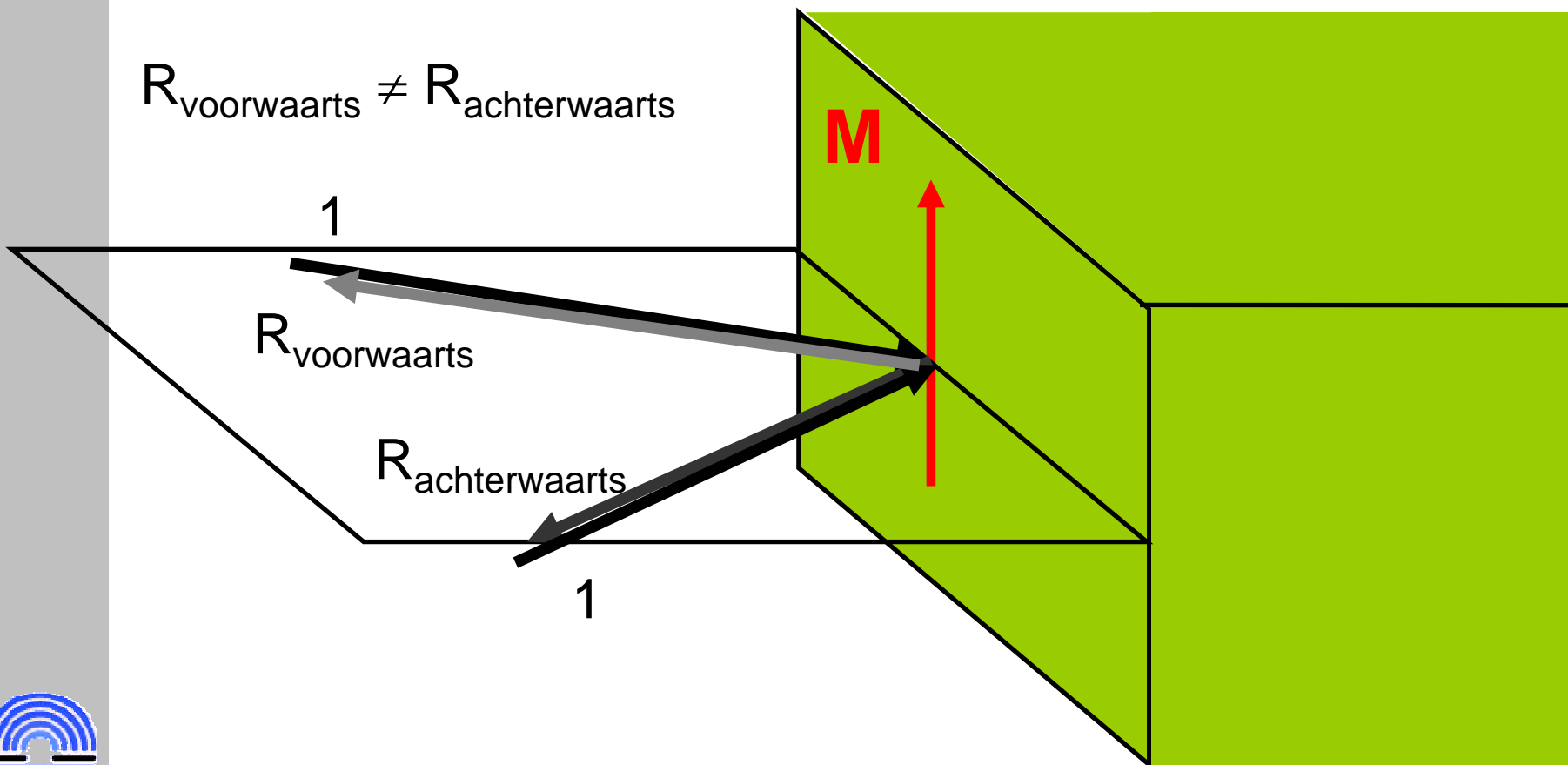
Onze aanpak

- wat zijn de uitdagingen ?
- ... hoe lossen we ze op ?
- ... maar vooral: werkt het ?

“Onze” oplossing (... en die van Yoshi)

gebruik een niet-reciprook MO reflectie-effect

transversaal Kerr effect



Transversaal Kerr effect

Voordeel

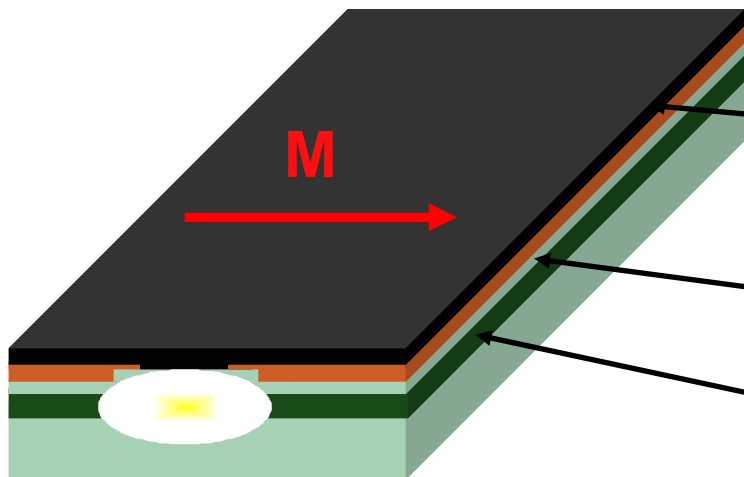
- chip kan in lasermateriaal met een niet-reciproke MO reflectielaag “erbovenop”
- MO reflectielaag hoeft niet meer noodzakelijk transparant te zijn!
**heel “sterke” en gemakkelijk aan te brengen
ferromagnetische metalen bruikbaar**
- met een metaal: geen magneet meer nodig
(metaal is zelf de magneet)

Nadeel

- ... als je metaal gebruikt: héél veel verlies
- enkel voor TM polarizatie

Nieuw isolatorconcept

Optische chip in InP met een ferromagnetisch MO metaal als niet-reciproke reflectielaag

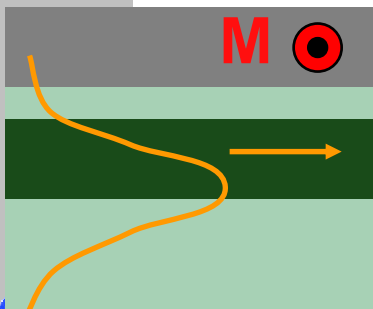


ferromagnetisch metaal met $M \perp$ voortplantingsrichting

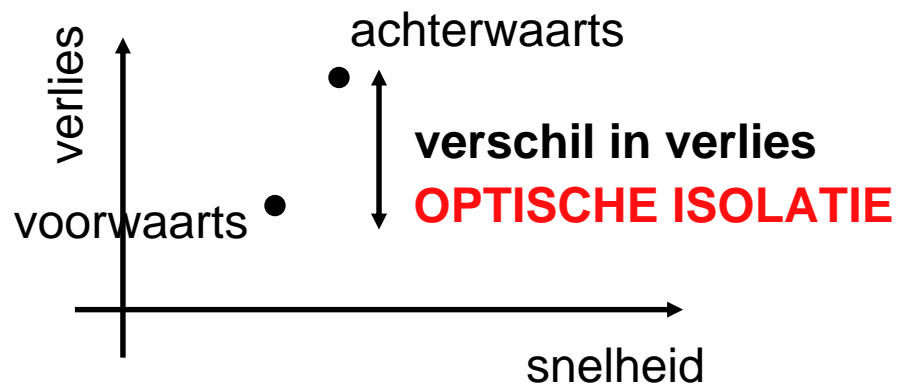
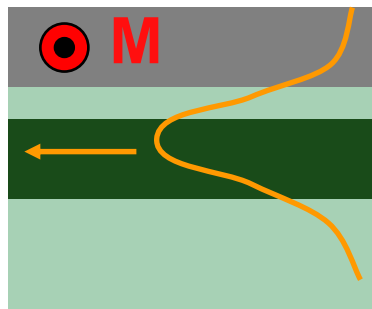
dun laagje tussen kern en metaal

hoge n kernlaag

voorwaarts



achterwaarts



maar ook voorwaarts nog veel verlies

Nieuw isolatorconcept

Bijna een heel elegante optische isolator

- geen polarisatoren nodig
- geen moeilijke magnetische materialen
- “makkelijk” te maken en te integreren
 - zelfde structuur als de laser: know-how
 - magnetische metalen deponeren: niks nieuws !

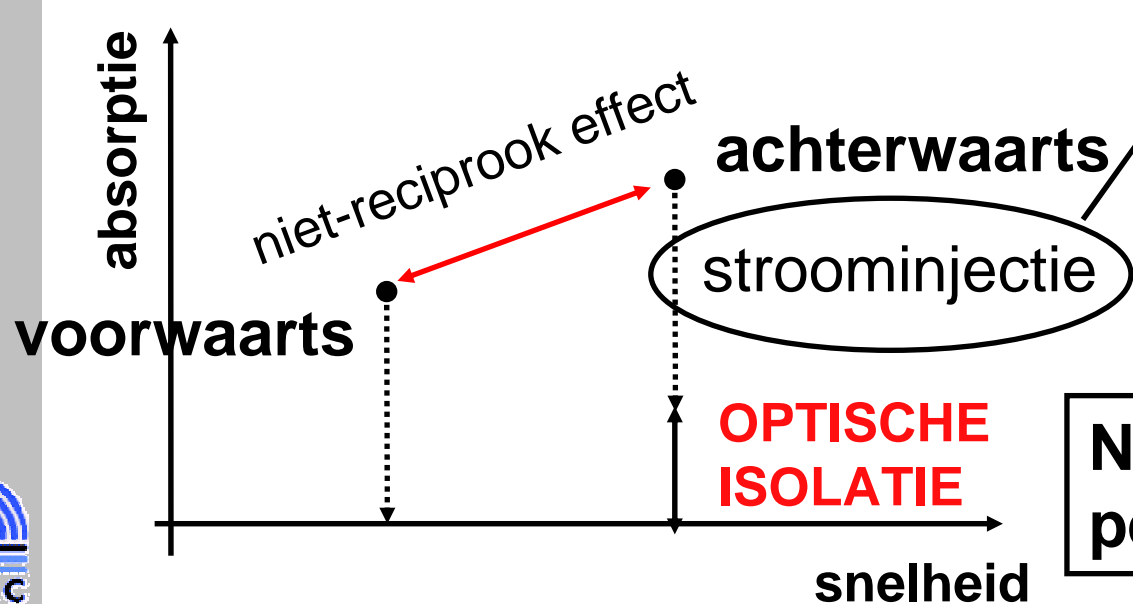
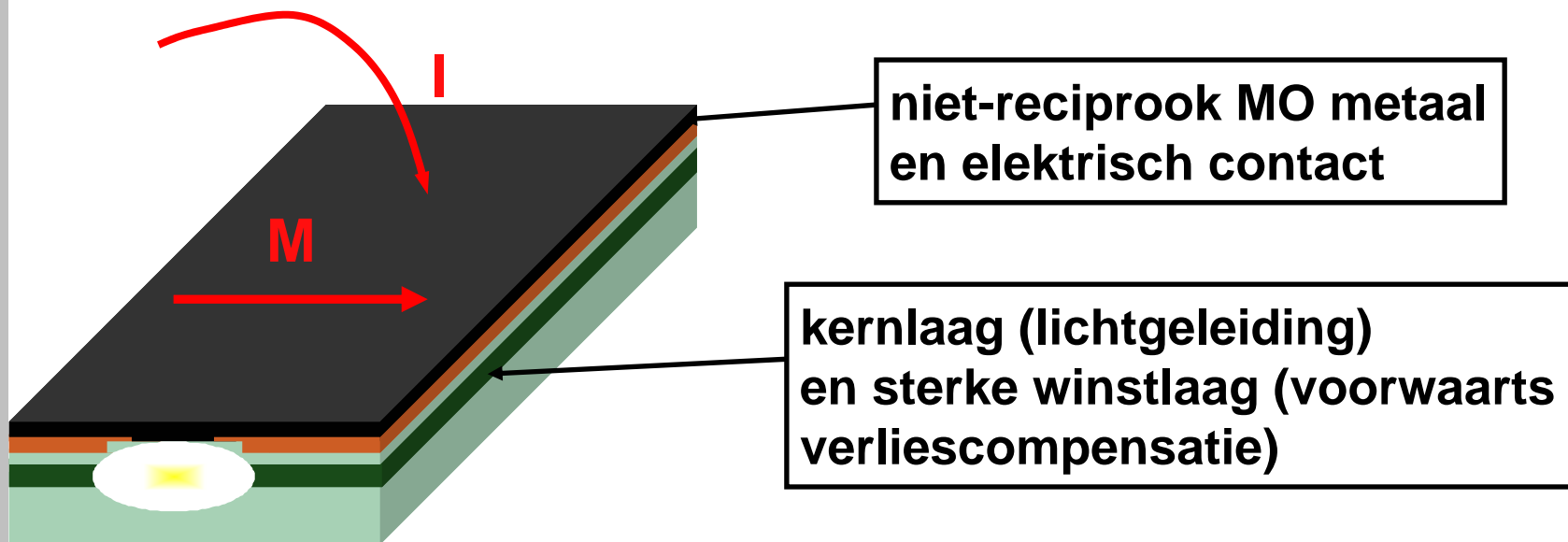
Maar ... verlies voorwaarts ?

hart van structuur is versterkende laserlaag:
 optische versterking mogelijk bij stroominjectie

$$\alpha_{\text{voorwaarts}} < \alpha_{\text{achterwaarts}} \xrightarrow{\text{stroom}} \begin{cases} \alpha_{\text{voorwaarts}} = 0 \\ \alpha_{\text{achterwaarts}} > 0 \end{cases}$$

ECHTE ISOLATOR

Nieuw isolatorconcept



het ei van ... Nakano
 maar ook de Achilleshiel
 de verliezen zijn
 héél hoog
 orde 60dB/mm

**Nakano: factor 400
 per mm**

Opbouw van de presentatie

Situering problematiek en “theoretische” fundamenten

- waarom isolatoren?
- hoe werkt een isolator ?
- wat bestaat er en waarom is er een probleem ?
- wat is onze oplossing ?

Onze aanpak

- **wat zijn de uitdagingen ?**
- ... hoe lossen we ze op ?
- ... maar vooral: werkt het ?

Van riskant concept naar component

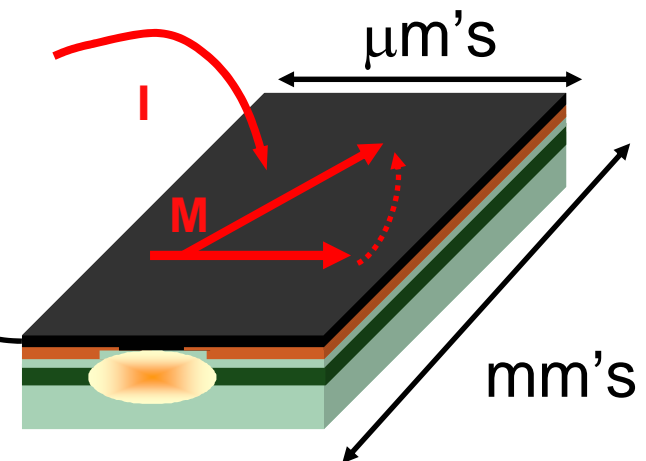
1. theoretische modellering

- model ontwikkelen voor niet-reciproke golfgeleiders
- toepassen op concept: weegt isolatie op tegen nodige winst

2. experimentele validatie

- bouwstenen met goed gedrag

grote MO effecten,
goede permanente magneet,
goed elektrisch contact



magnetische vormanisotropie

Van riskant concept naar component

1. theoretische modellering

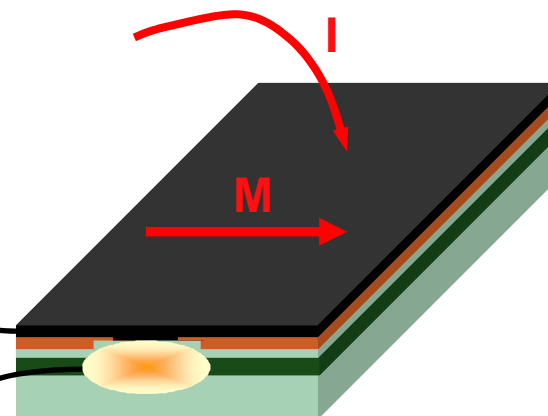
- model ontwikkelen voor niet-reciproke golfgeleiders
- toepassen op concept: weegt isolatie op tegen nodige winst

2. experimentele validatie

- bouwstenen met goed gedrag

welk metaal heeft grote MO effecten, is een goede magneet, en een goed elektrisch contact

welke laserstructuur is sterk genoeg om het metaalverlies te compenseren



remember: zonder versterking
→ verzwakking 10^6 per mm

- karakterisatie prototype

- is het effect sowieso aanwezig ? hoe (w)meet je het ?
- ... is het realistisch?

Opbouw van de presentatie

Situering problematiek en “theoretische” fundamenten

- waarom isolatoren?
- hoe werkt een isolator ?
- wat bestaat er en waarom is er een probleem ?
- wat is onze oplossing ?

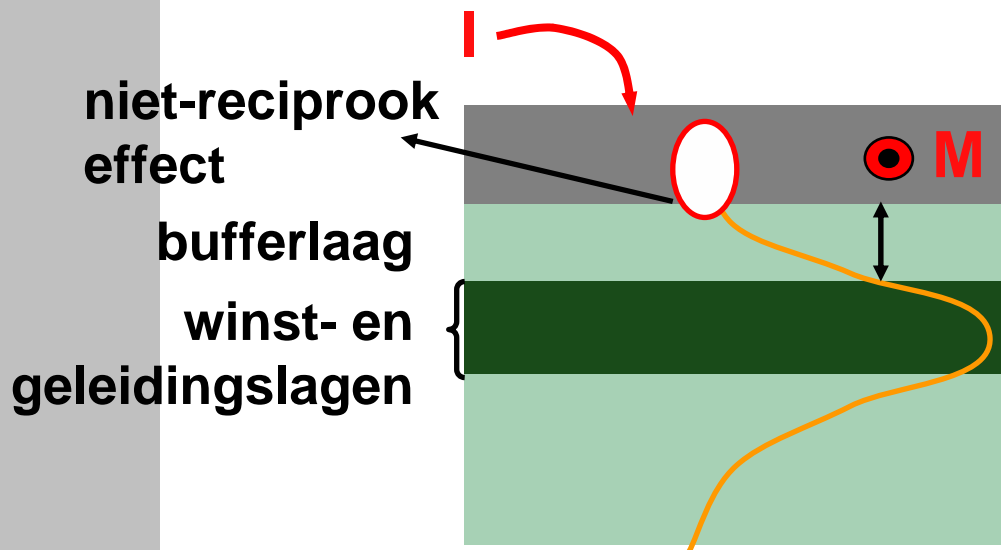
Onze aanpak

- wat zijn de uitdagingen ?
- ... hoe lossen we ze op ?
- ... maar vooral: werkt het ?

Theoretische modellering

Snel model ontwikkeld om niet-reciproke golfgeleiders te ontwerpen (storingsrekening)

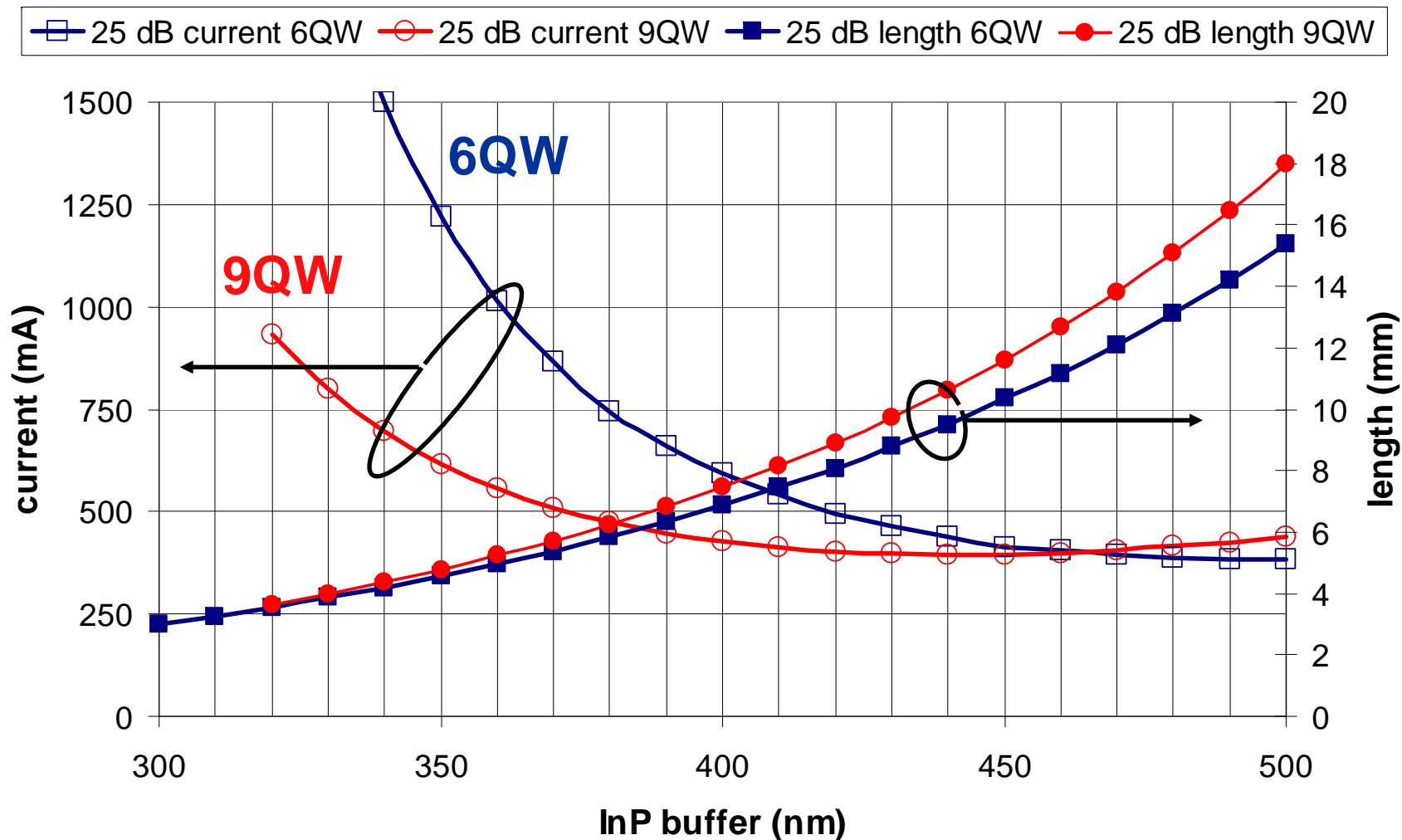
toegepast op het ontwerp van “onze” component



buffer ↓: isolatie ↑ stroom ↑

BETER:
bufferlaag samen met geleidingslaag variëren om nodige stroom zo efficiënt mogelijk te gebruiken

Theoretische modellering



25dB isolatie in 5 mm en met 500 mA stroom

Bouwstenen – experimenteel gedrag

Metaalcontact: legering van Co en Fe op basis van literatuur

- voor het eerst MO sterkte gemeten bij 1300nm: $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ beste combinatie van verlies en MO sterkte
- dunne (50nm), langwerpige permanente magneet met >90% magnetizatie transversaal vormanisotropie tegengewerkt door deponeren CoFe in aanwezigheid van een magneetveld
- elektrisch contact met zeer lage weerstand $<1\Omega$

Doorgedreven experimentele studie van diverse soorten laserwinstlagen:

- interne materiaalversterking behaald van 60dB/mm bij een stroom $< 100\text{mA/mm}$
- “speciale” groeitechnieken ontwikkeld door Alcatel: winstlagen gegroeid onder rekspanning

Opbouw van de presentatie

Situering problematiek en “theoretische” fundamenten

- waarom isolatoren?
- hoe werkt een isolator ?
- wat bestaat er en waarom is er een probleem ?
- wat is onze oplossing ?

Onze aanpak

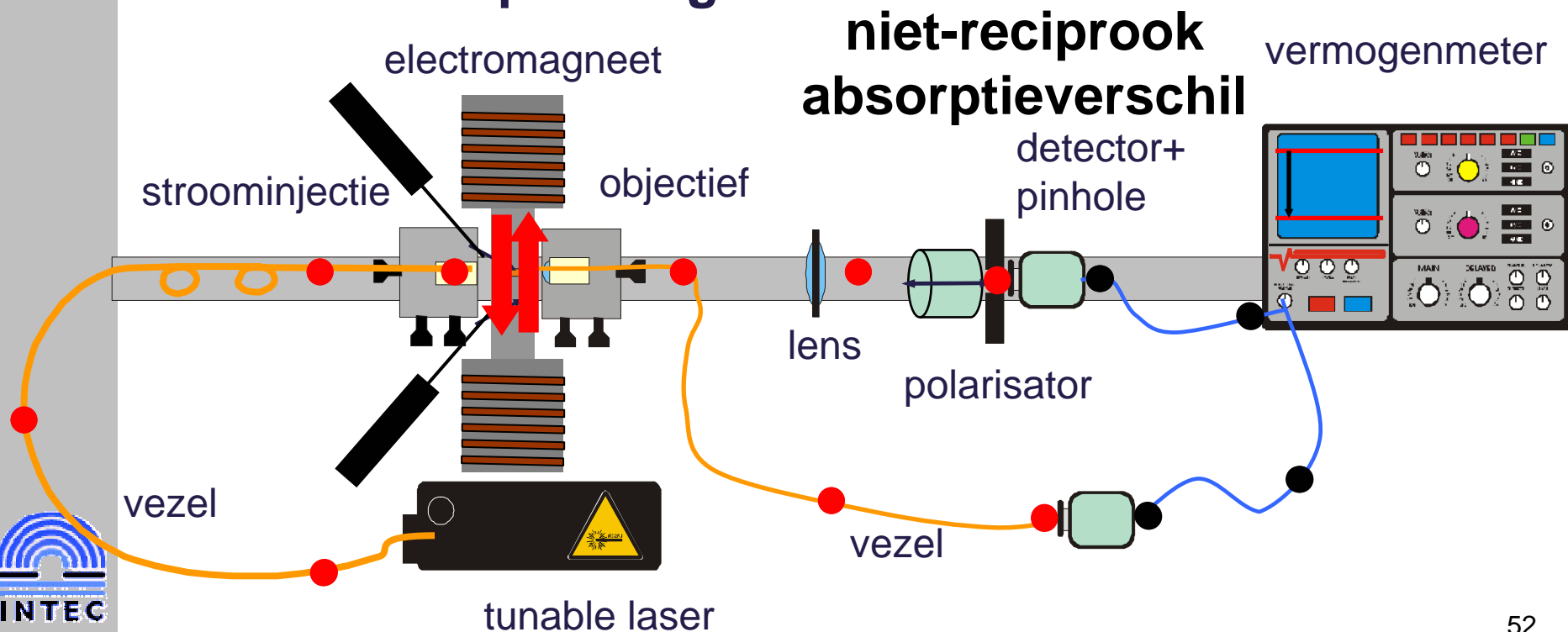
- wat zijn de uitdagingen ?
- ... hoe lossen we ze op ?
- ... **maar vooral: werkt het ?**

Meetopstelling

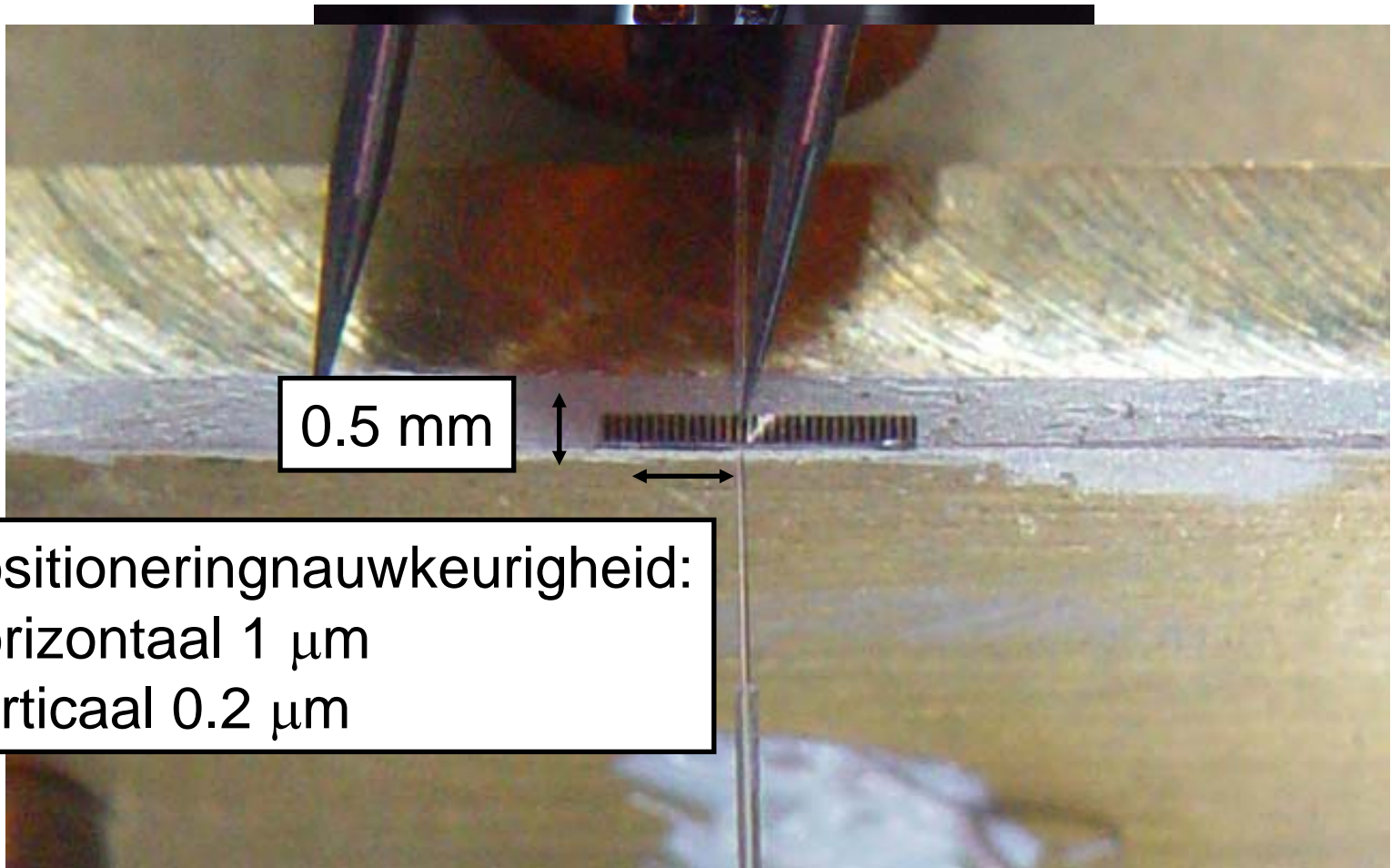
Niet-reciproke metingen:

- NIET door aan twee zijden te meten
experimentele omstandigheden nooit identiek
- WEL door 1 “uitgang” waar te nemen en magnetizatie om te schakelen

Ideale meetopstelling:



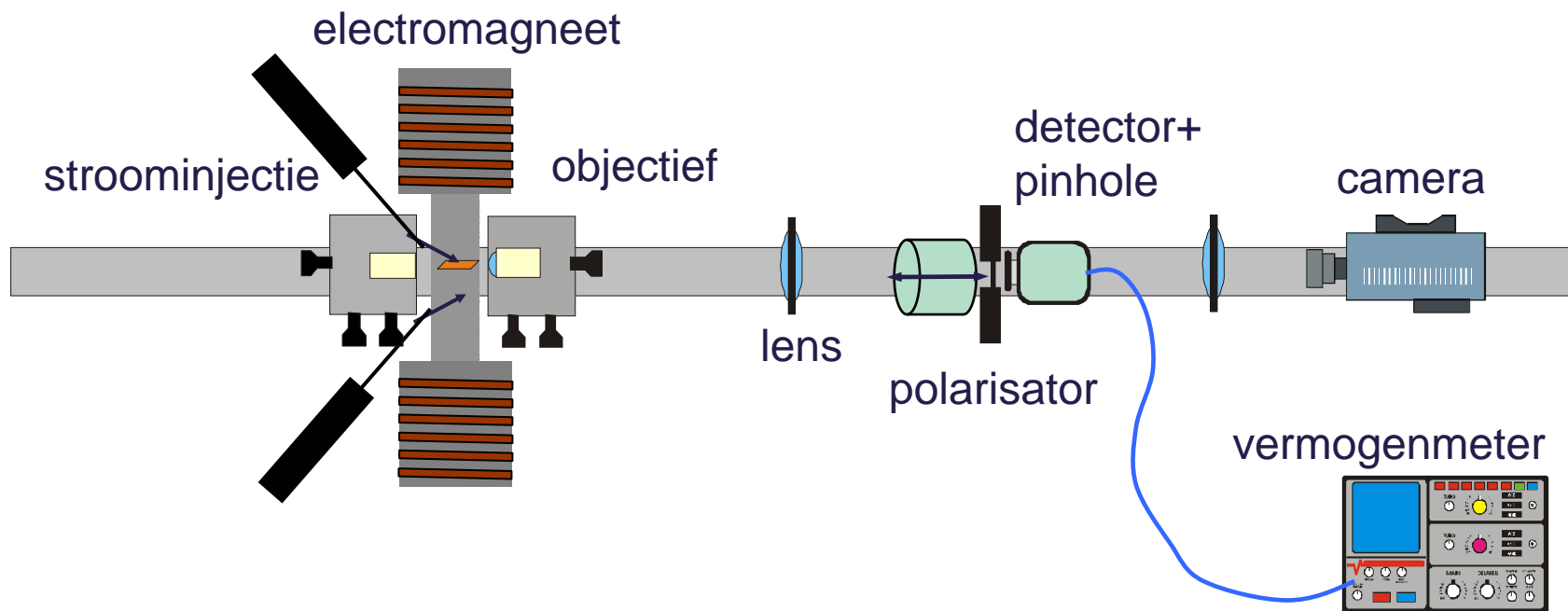
Meetopstelling



positioneringnauwkeurigheid:
horizontaal 1 μm
verticaal 0.2 μm

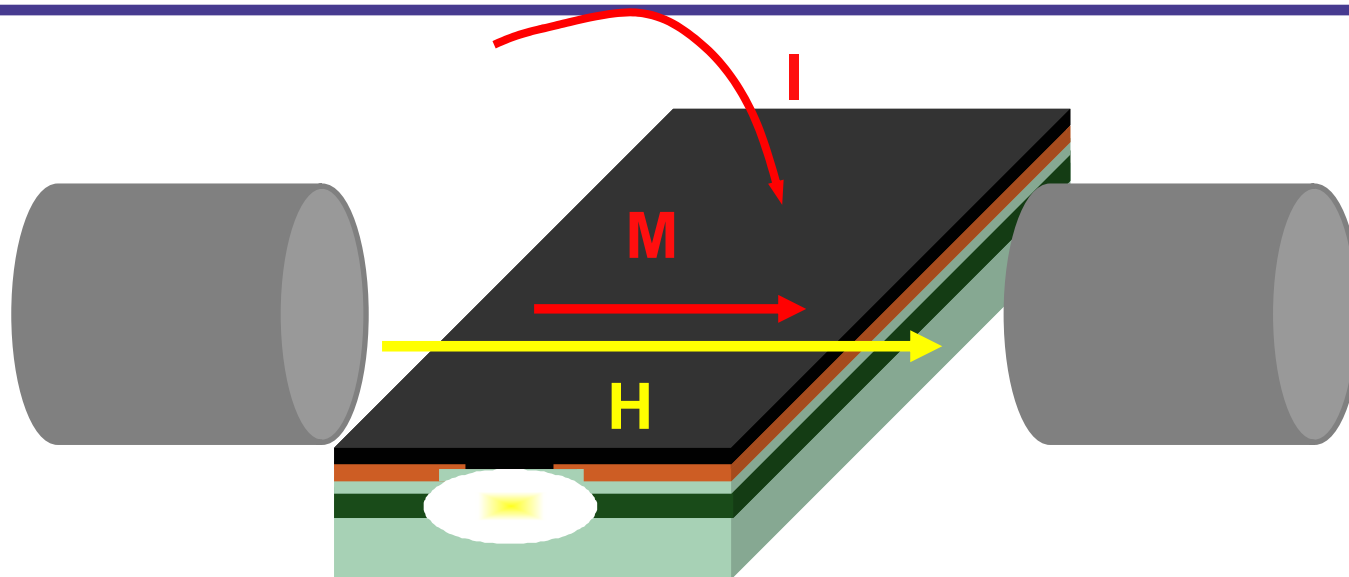
Meetopstelling

Voor eerste demonstratie eenvoudiger opstelling mogelijk

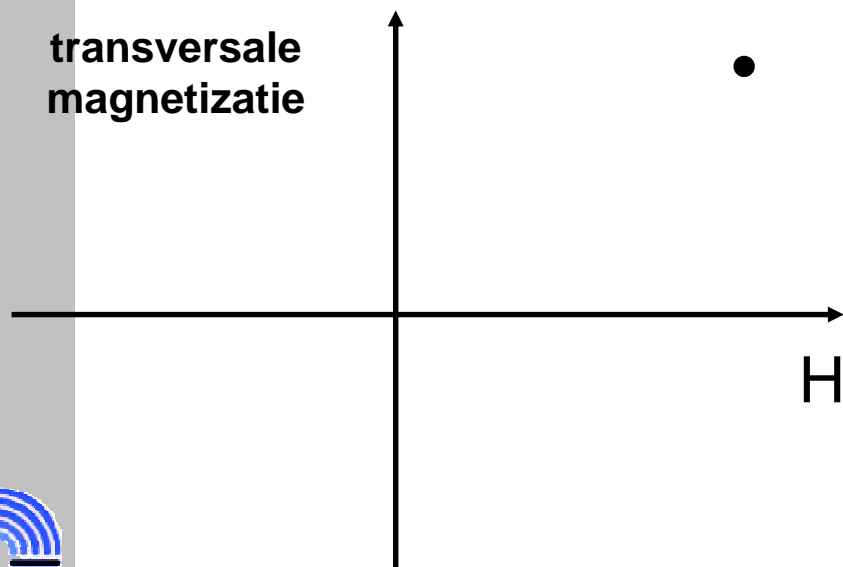


bestudeer het licht dat door de isolator zelf gegeneerd wordt bij stroominjectie

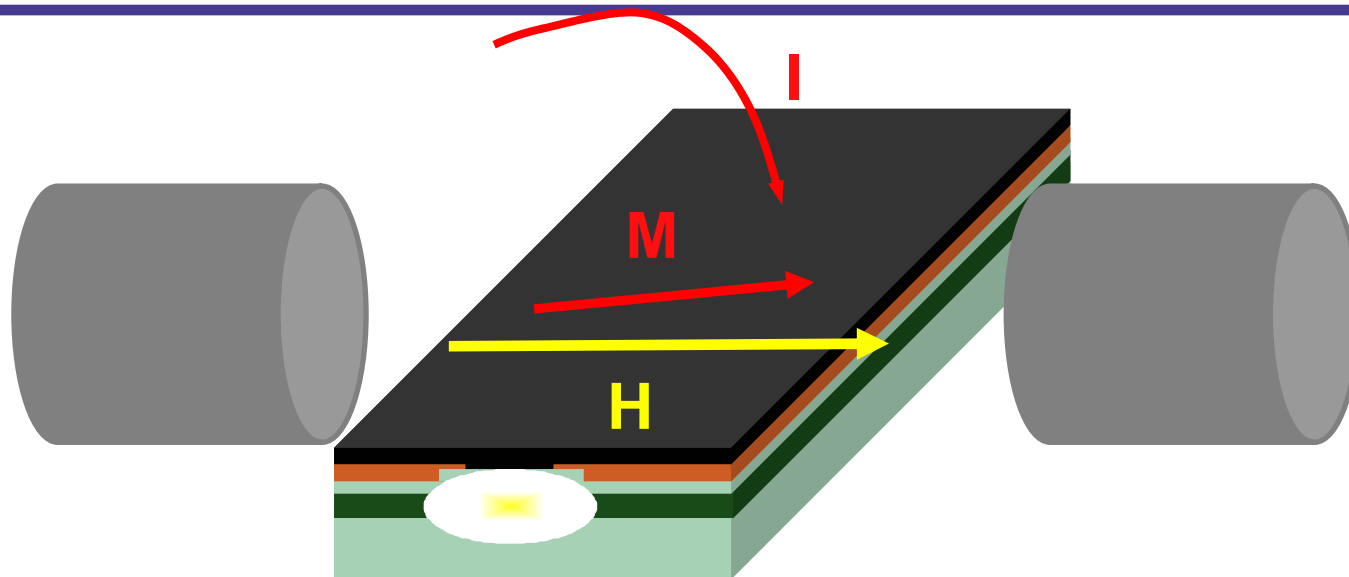
Meetmethode



transversale
magnetizatie



Meetmethode

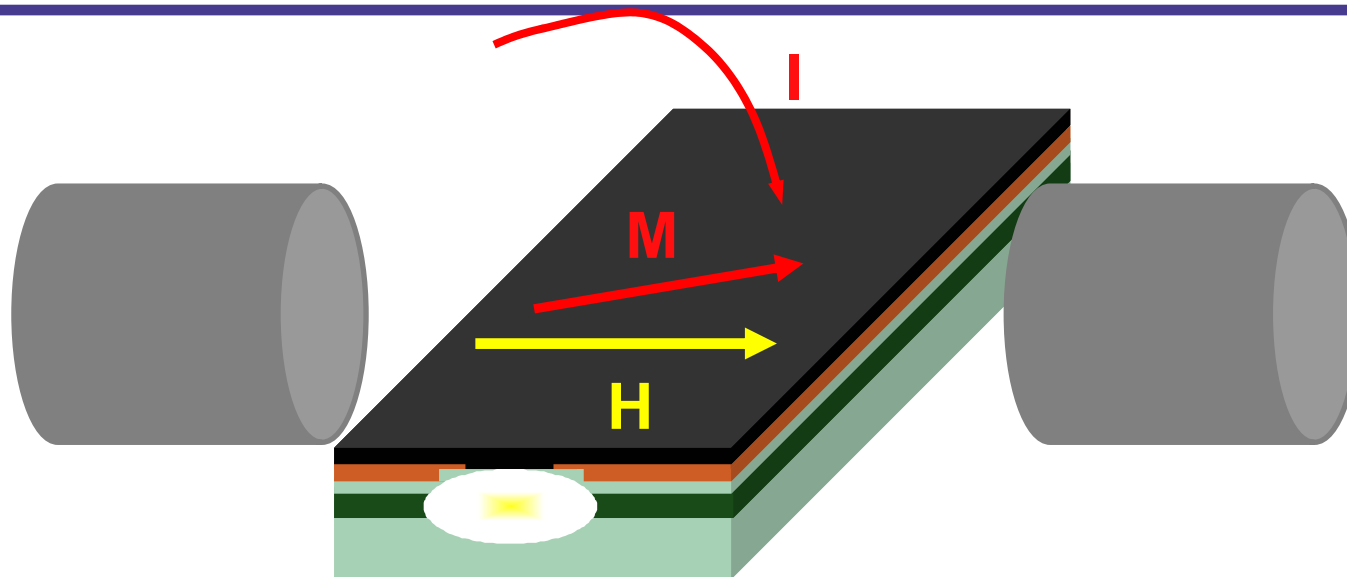


transversale
magnetizatie

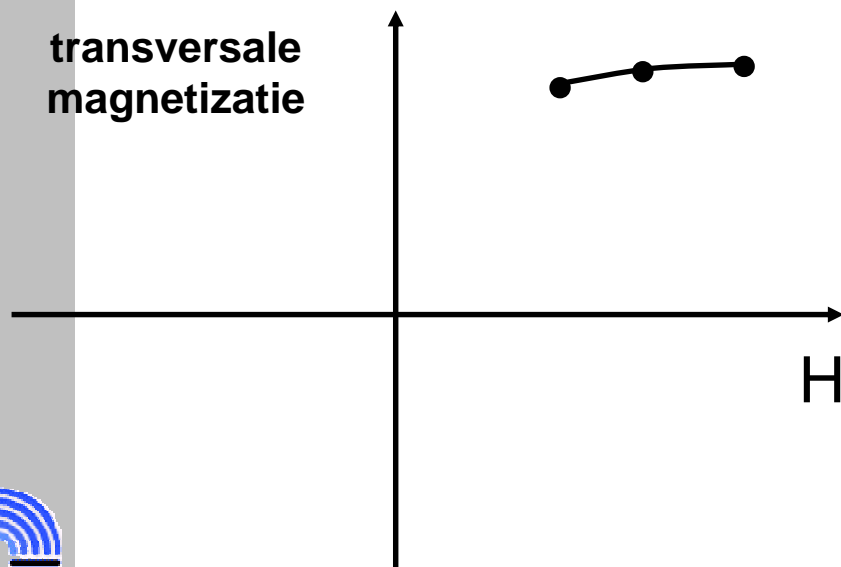


H

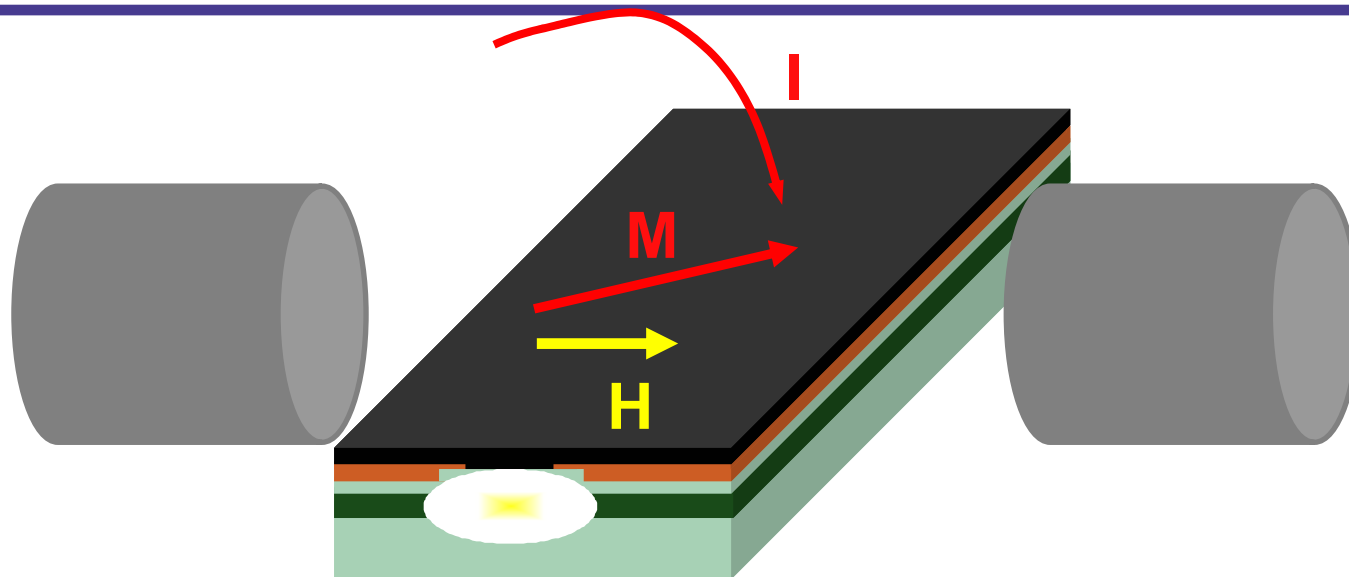
Meetmethode



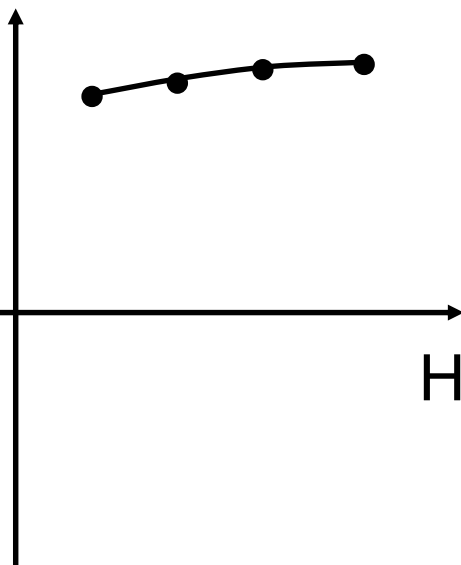
transversale
magnetizatie



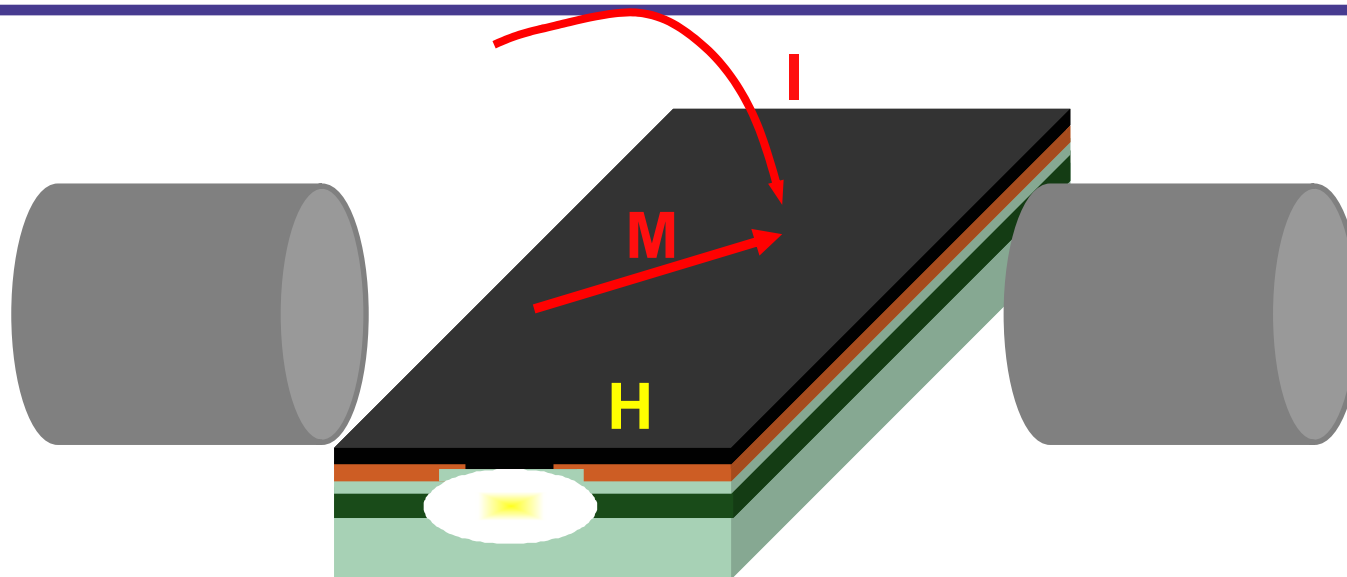
Meetmethode



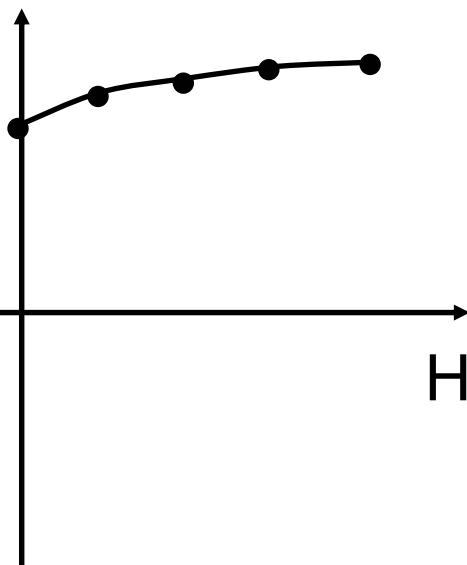
transversale
magnetizatie



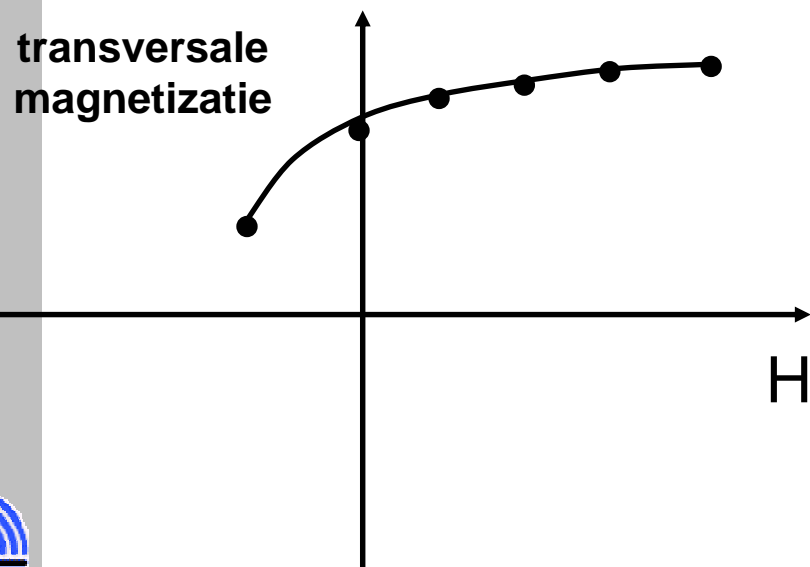
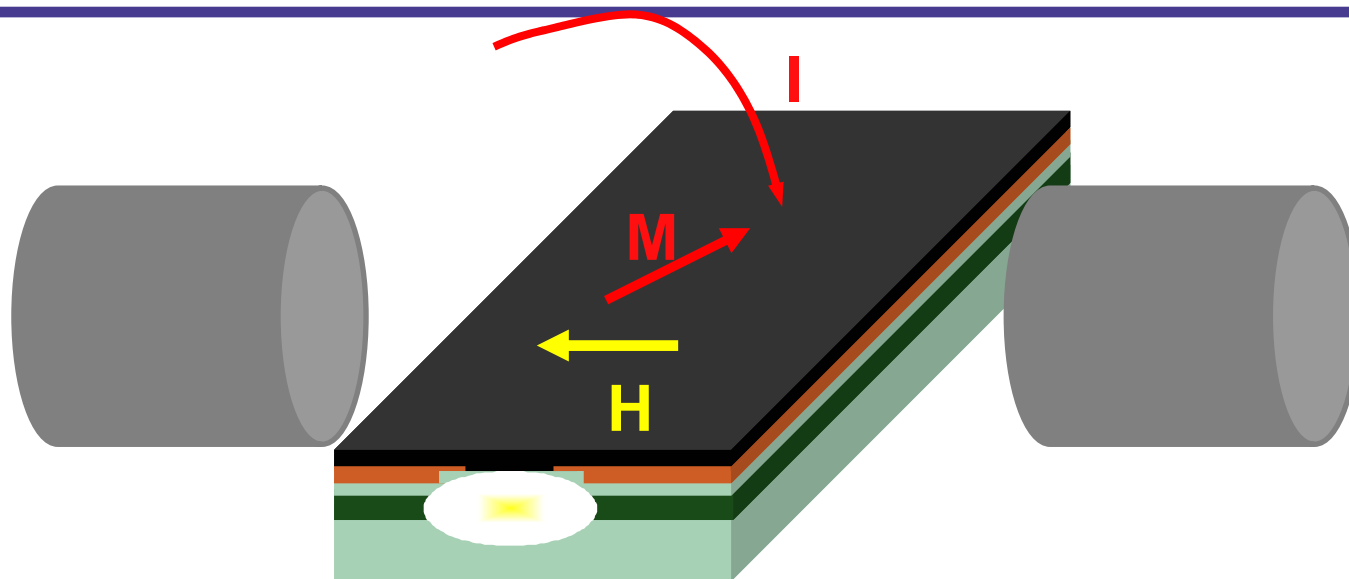
Meetmethode



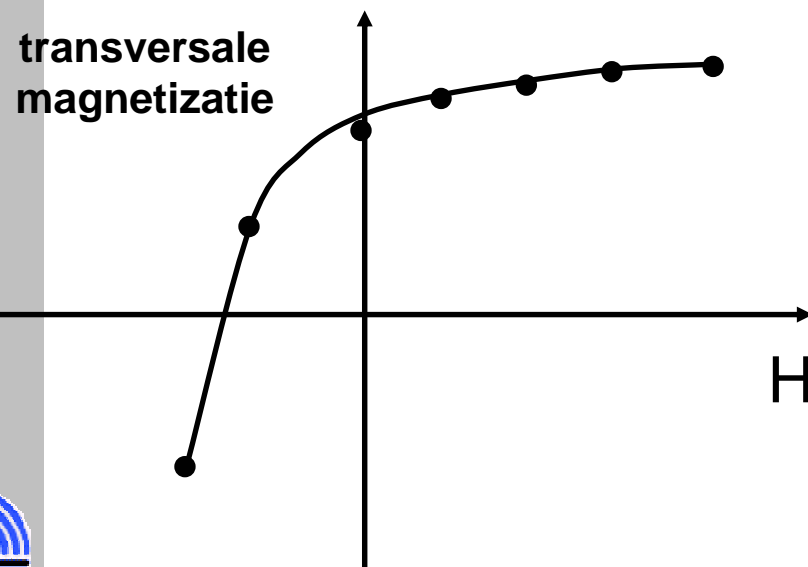
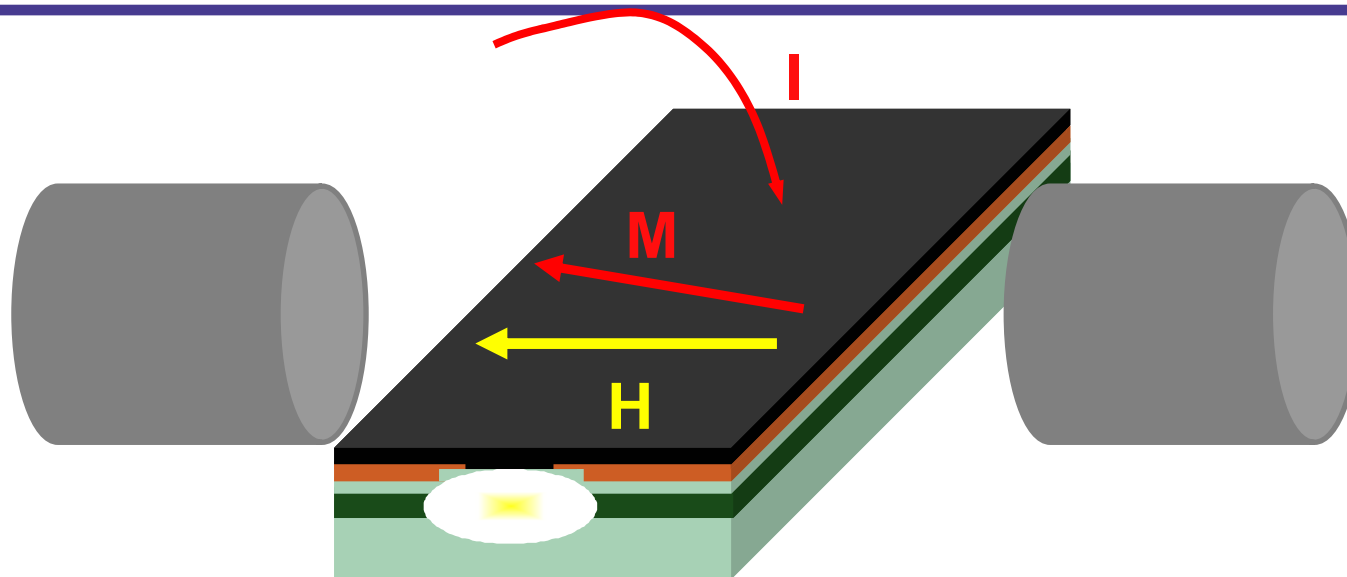
transversale
magnetizatie



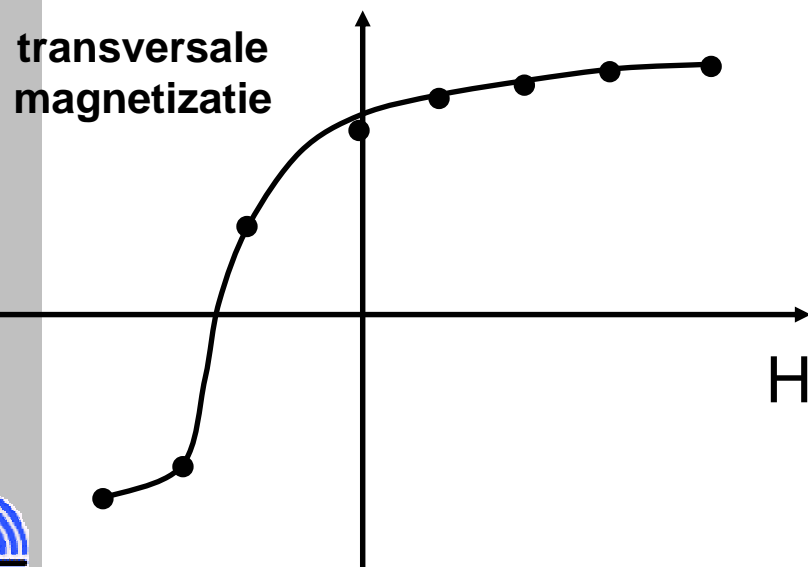
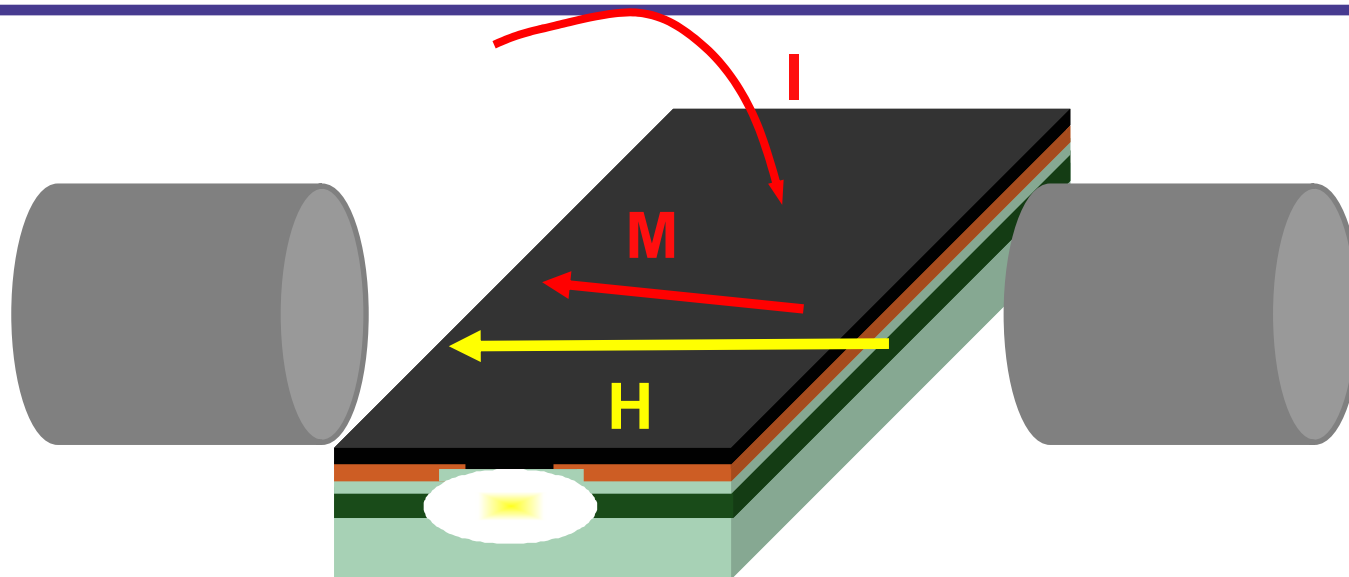
Meetmethode



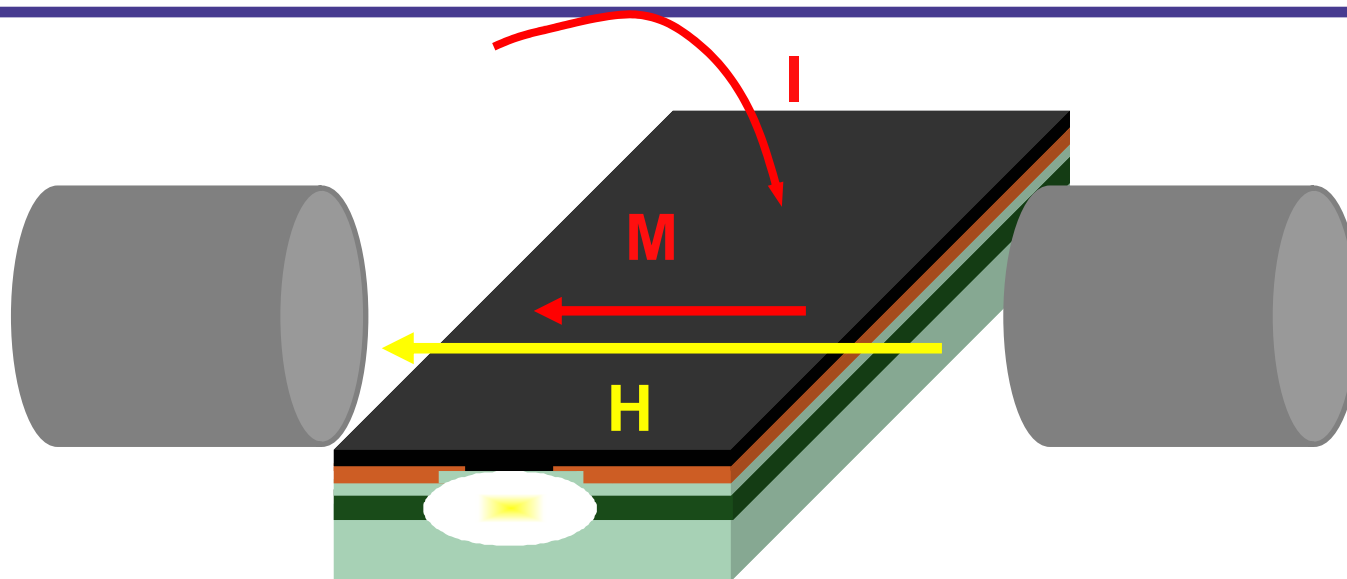
Meetmethode



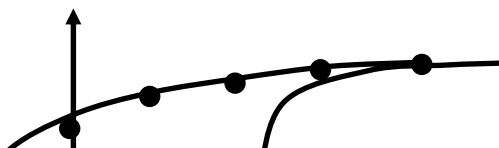
Meetmethode



Meetmethode

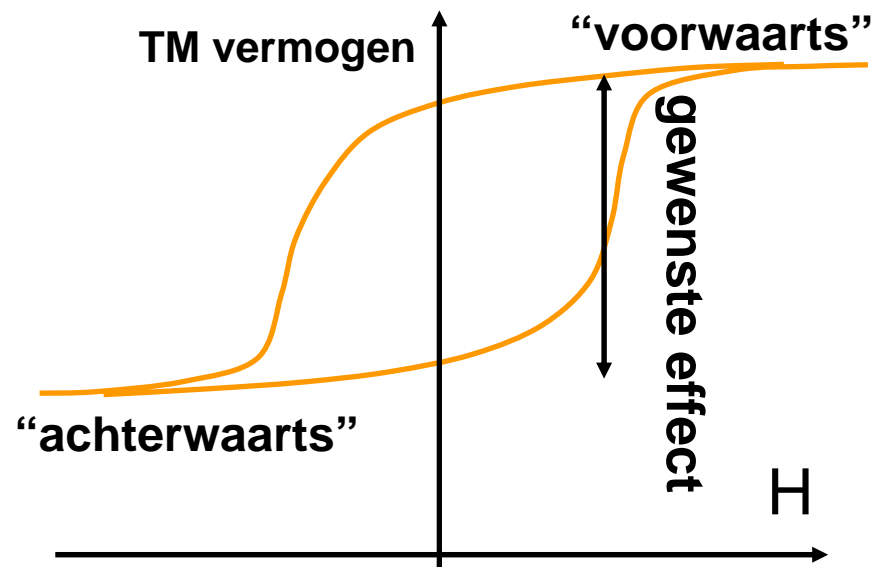


transversale magnetizatie

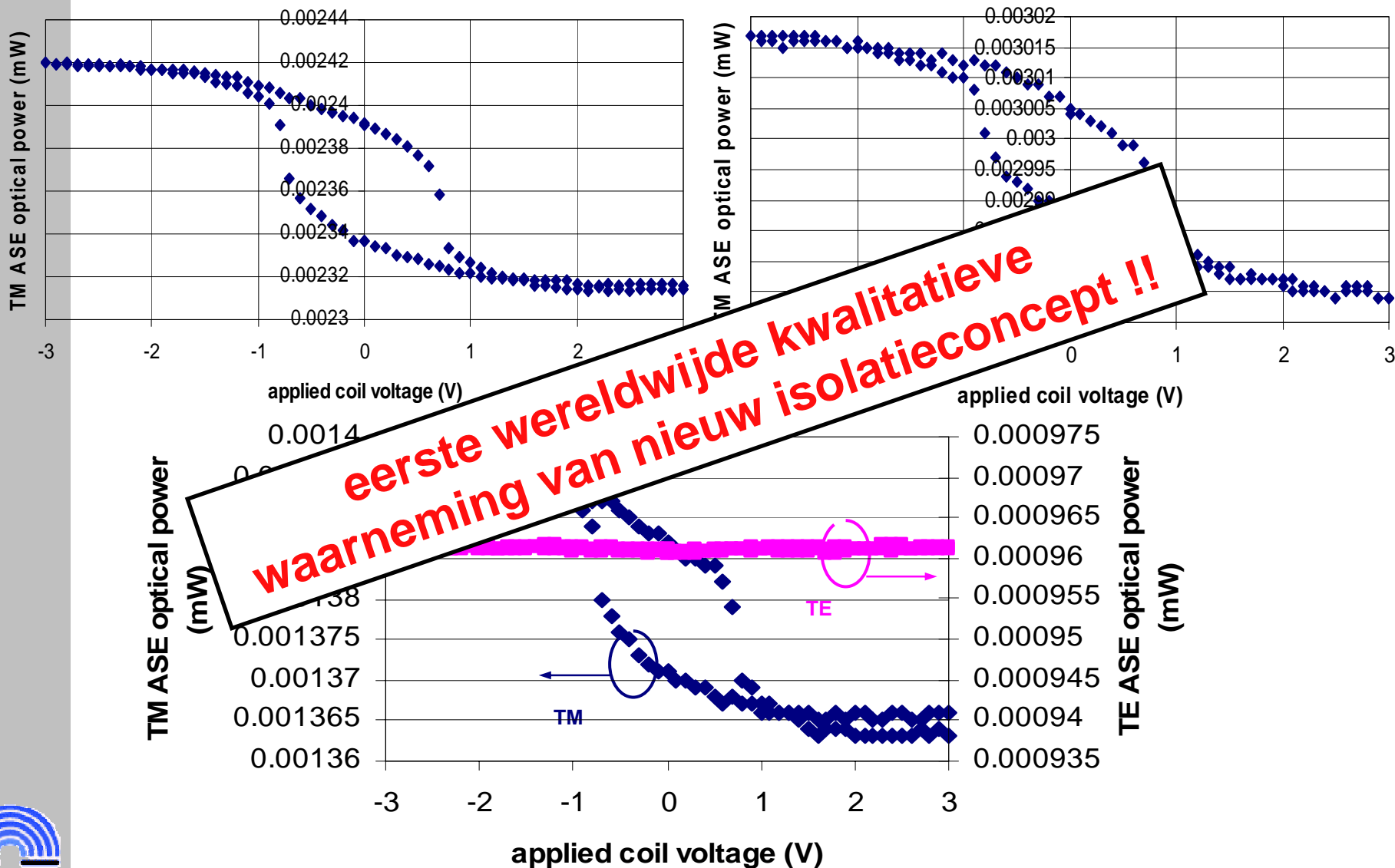


als effect aanwezig is dan hysteresis weerspiegelt in geëmitteerd TM vermogen

magnetische hysteresis

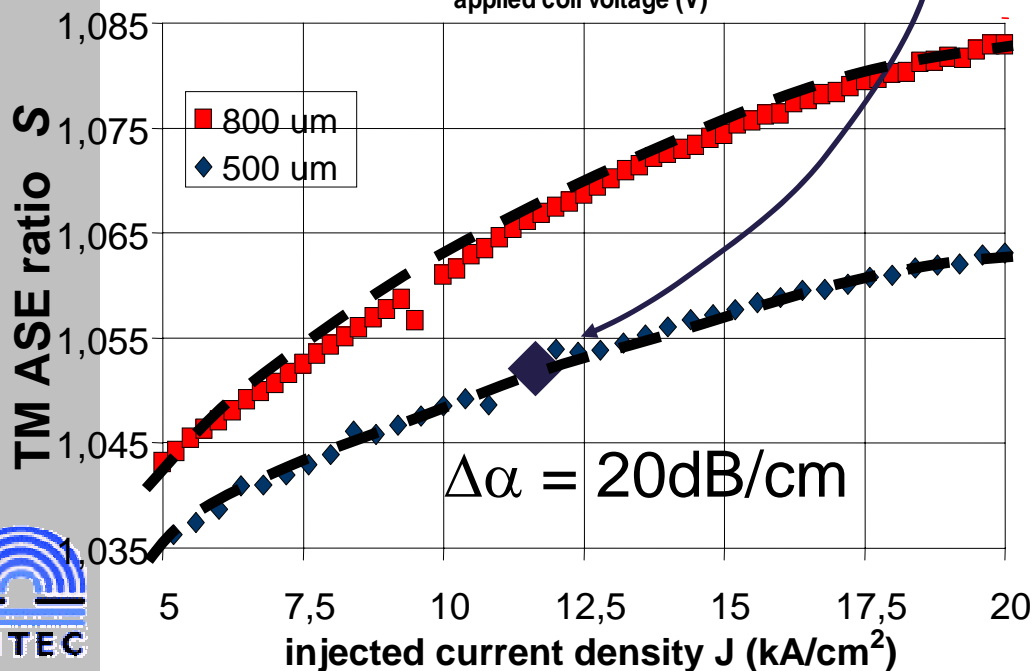
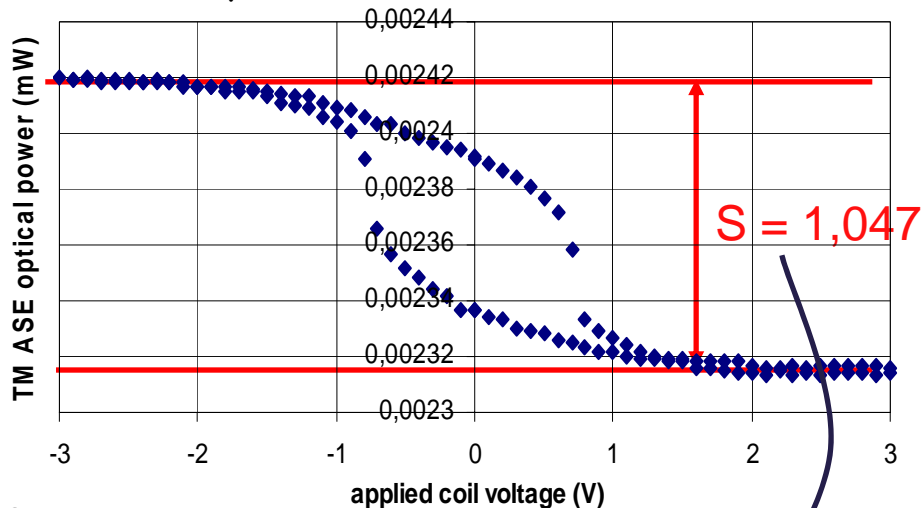


Hysteresismetingen



Kwantitatieve karakterisatie

$w=2,5\mu\text{m}$ $L=0,5\text{mm}$ $I = 150\text{mA}$



verhouding $S > 1$ is een relatieve maat voor niet-reciprook effect



S is een functie van:
 stroom (meer licht dat "meedoet")
 lengte (meer effect)

fitten van model voor niet-reciprooke versterking
 waarde voor $\Delta\alpha$

Prototypes

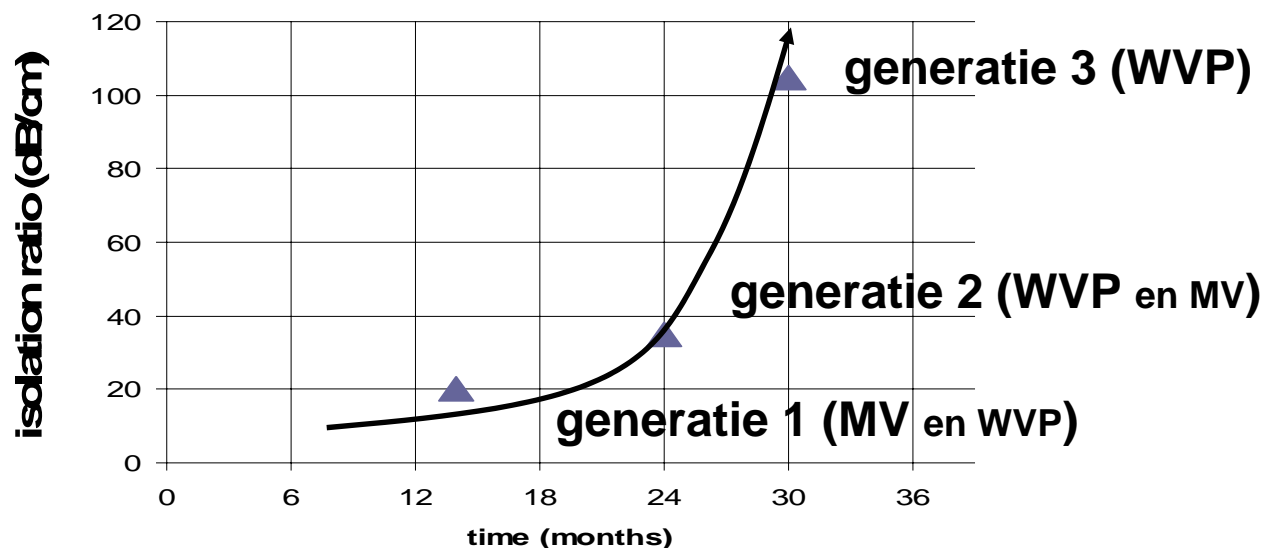
2 Generaties gefabriceerd

- **Co₉₀Fe₁₀ op InGaAsP MQW**
 - veel onzekerheid op het moment van design (parameters)
 - eerste observatie effect
 - eerste extractie $\Delta\alpha = 20$ dB/cm, maar veel verlies 30dB/mm
 - factor 4 zwakker dan ontwerp
- **Co₅₀Fe₅₀ op InAlGaAs MQW**
 - nauwkeurig ontwerp
 - 35 dB/cm isolatie
 - transparant (maar bij 20kA/cm²): betekent 1A voor 10dB in een lengte van 3mm
 - factor 2 zwakker dan ontwerp

Ondertussen op INTEC

Derde generatie prototypes en een geduldige, getalenteerde doctorandus

- **$\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ op InAlGaAs MQW (geoptimaliseerde fabricatie)**
- **$\Delta\alpha = 105\text{dB/cm}$!! en transparant bij $10\text{kA/cm}^2 = 20\text{dB}$ isolatie bij 500mA**
- **slechts factor 1.4 zwakker dan ontwerp**



Conclusies

Gezocht: compacte integreerbare optische isolator

Bestudeerd: nieuw maar riskant concept voor een InP-gebaseerde magnetisch-metaal-gecontacteerde optische isolator

Gerealiseerd (in samenwerking):

- modellerings know-how
- sterke winstlagen: $>-1\%$ strained InAlGaAs $>60\text{dB/mm}$ interne winst
- CoFe contacten met gekarakteriseerde magnetische, elektrische, optische en magneto-optische eigenschappen

Geobserveerd als eersten:

- niet-reciproke absorptie
- realistische isolatieniveaus bij aanvaardbare stroomniveaus

Op het programma: fantastisch doctoraat Wouter met een geïntegreerde laser-modulator module

Merci !!!



<http://www.intec.ugent.be/isolaser>

