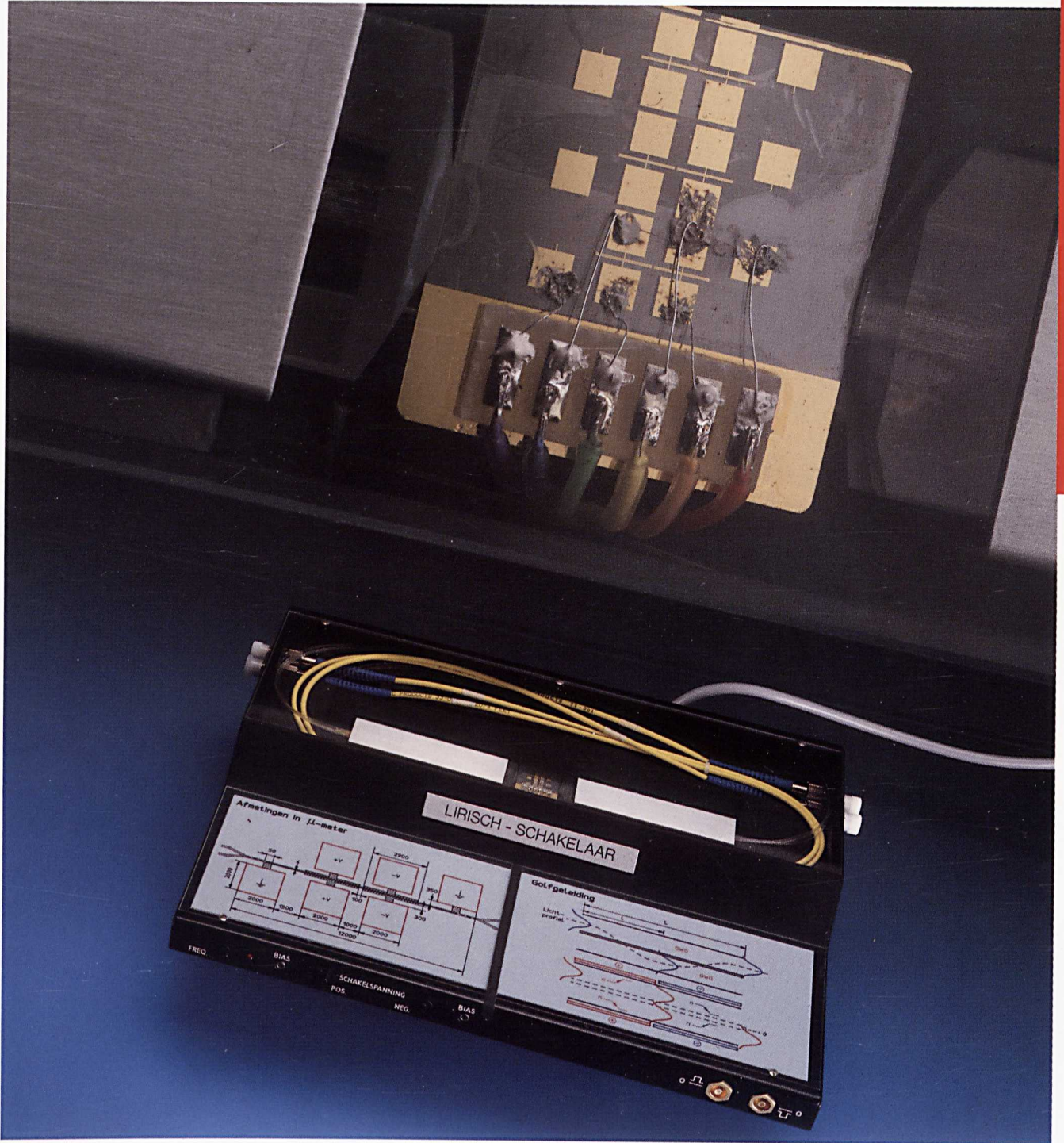


Integrated optics

The 'missing link' in optical telecommunications



Geïntegreerde optica

De 'missing link' in optische telecommunicatie

ir. H.J.M. Bastiaansen
dr. J.J.G.M. van der Tol
drs. M.B.J. Diemeer

PTT Research, Leidschendam 1993

Monografie 9301

Foto omslag:

De bij PTT Research op basis van Lithiumniobaat ontwikkelde chip voor een optische 2 x 2 schakelaar. De schakelaar werkt volgens het principe van de optische richtkoppeling (LIRISCH = Lithiumniobaat Richtkoppel SCHakelaar).

Naast de chip, geeft de foto ook zijn gehele behuizing weer.



© Koninklijke PTT Nederland NV, PTT Research, Leidschendam 1993

Behoudens uitzonderingen door de Wet gesteld mag zonder schriftelijke toestemming van de rechthebbende op het auteursrecht van deze uitgave niets hieruit worden veeveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of anderszins; het vorengesegde is ook van toepassing op de gehele of gedeeltelijke bewerking. De rechthebbende is met uitsluiting van ieder ander gerechtigd de door derden verschuldigde vergoedingen van kopiëren, als bedoeld in artikel 17 lid 2, Auteurswet 1912 en in het K.B. van 20 juni 1974 (Stb. 351) ex artikel 16b Auteurswet 1912, te innen en/of daartoe in en buiten rechte op te treden.

ISBN 90-72125-39-8 geb.

Voorwoord

De glasvezel heeft op grote schaal zijn intrede gedaan in het Nederlandse telecommunicatienetwerk. Met name in het lange-afstands- en middellange-afstandsnetwerk heeft de glasvezel de koperkabel als transmissiemedium verdrongen. Maar ook de plannen om in het aansluitnet de glasvezel te introduceren zijn reeds ver gevorderd. Dit opent de mogelijkheid om de abonnees een uitgebreid scala van nieuwe, breedbandige, diensten aan te bieden. Echter, de optimale benutting van de mogelijkheden die de glasvezel biedt en het efficiënte transport van de optische signalen tussen de individuele abonnees, vereisen dat er complexe bewerkingen op de optische signalen worden uitgevoerd. De mate waarin dit tegen een economisch aanvaardbare prijs gedaan kan worden, zal van invloed zijn op de verdere opmars van de glasvezel in de telecommunicatietechniek.

Het werkveld geïntegreerde optica richt zich op de ontwikkeling van planaire componenten voor het uitvoeren van bewerkingen op optische signalen. Conversies van optische signalen naar elektrische signalen worden vermeden (volledig optische signaalbewerking). Integratie van een aantal componenten tot een enkele schakeling en massaproductie moeten leiden tot lage prijzen. Als zodanig kan geïntegreerde optica een sleutelpositie binnen de optische telecommunicatie innemen.

In deze monografie wordt de lezer bekend gemaakt met het werkveld geïntegreerde optica. De algemene principes van optische golfgeleiding en signaalbewerking worden beschreven. Vervolgens worden de onderzoeksinspanningen van PTT Research binnen dit werkveld gepresenteerd.

juli 1993

ir. H.J.M. Bastiaansen
dr. J.J.G.M. van der Tol
drs. M.B.J. Diemeer

-
-
-
-
-



Inhoud

1.	Historisch perspectief	7
2.	Geïntegreerde optica	13
2.1	Optische golfgeleiding	14
2.2	Passieve componenten	17
2.3	Actieve componenten	19
2.4	Materialen	20
2.5	Integratie	22
2.6	Geïntegreerde optica binnen PTT Research	23
3.	Numerieke ontwerpmethoden	27
3.1	Theoretische ontwerpmethoden	27
3.2	Modale methoden	30
3.3	Propagatiemethoden	37
4.	Indiumfosfide: de ultieme integratie?	39
4.1	Waarom indiumfosfide?	39
4.2	Het Innovatief Onderzoek Programma binnen PTT Research	42
4.3	Componenten voor een coherent-optische ontvanger	44
4.4	Realisatie van golfgeleiders en componenten	46
5.	Polymeren	51
5.1	Waarom polymeren?	51
5.2	Polymeertechnologie	53
5.3	Het Eureka-project PEOCOC; elektro-optische modulators	57
5.4	Componenten	58
*	Tot slot	61
*	De auteurs	63

CIP-gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag

Bastiaansen, H.J.M.

Geïntegreerde optica : de 'missing link' in optische telecommunicatie / H.J.M. Bastiaansen / J.J.G.M. van der Tol /

M.B.J. Diemeer - Leidschendam: PTT Research.-

III. (Monografie / PTT Research; 9301)

ISBN 90-72125-39-8 geb.

Trefwoorden: glasvezelcommunicatie.

1. Introduction

2. Methodology

3. Results

4. Discussion

5. Conclusion

6. References

7. Appendix

8. Glossary

9. Index

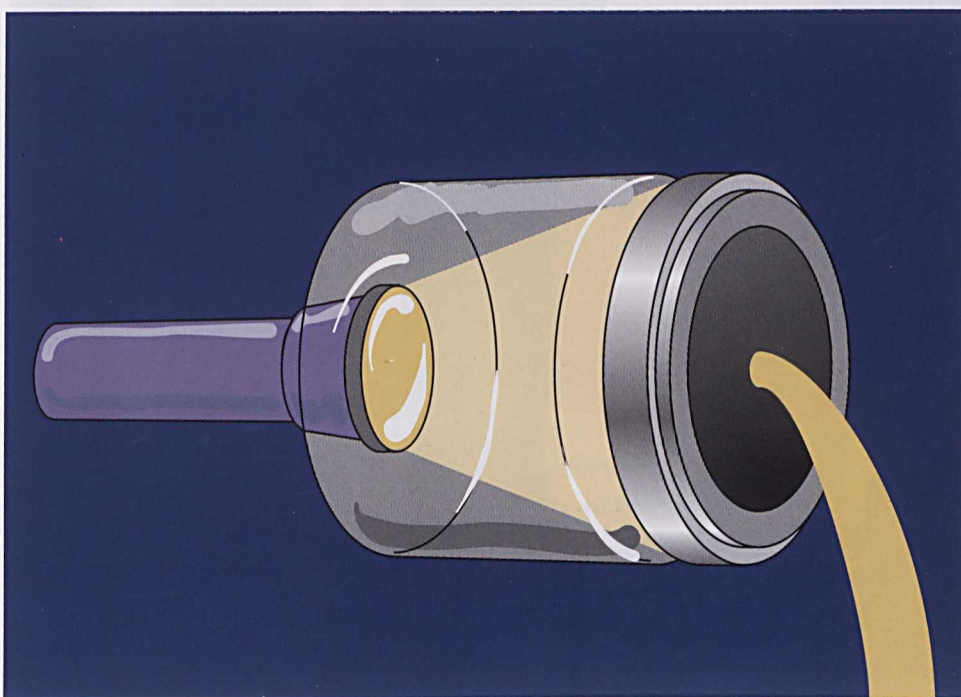
1. Historisch perspectief

Het werkveld geïntegreerde optica is voor velen nog onbekend. Echter, het belang ervan voor de commerciële toepasbaarheid van optische communicatiesystemen is groot. Dit geldt met name wanneer complexe signaalbewerkingen nodig zijn, zoals in het abonnee-aansluitnet en in lokale computernetwerken (bijv. LAN's). Het werkveld is derhalve volop in beweging, en wereldwijd wordt op grote schaal geïnvesteerd in onderzoeksprojecten op het gebied van geïntegreerde optica. Dit heeft reeds geresulteerd in de commerciële verkrijgbaarheid van eenvoudige optische schakelingen. Alvorens echter een breed scala van geïntegreerd optische producten met behulp van massaproductie-technieken gerealiseerd kan worden, is nog veel onderzoek noodzakelijk.

Geïntegreerde optica is sterk gerelateerd aan de optische communicatietechnologie. Derhalve beginnen we dit historisch perspectief met een beschouwing van de ontwikkelingen op het gebied van de optische communicatie. Dit voert ons automatisch naar het werkveld geïntegreerde optica. De geschiedenis hiervan wordt in het tweede deel van dit hoofdstuk bekeken.

Optische communicatie op basis van glasvezels heeft een stormachtige ontwikkeling doorgemaakt. Aan het begin van de jaren zeventig werd een begin gemaakt met de

Met de proef van Tyndall wordt het lichtgeleidende vermogen van een gebogen waterstraal gedemonstreerd: het deksel van een met water gevulde glazen pot wordt doorgeprikt. Door de bodem beschijnt een lichtbron het water in de pot.



- haalbaarheidsstudies en de veldproeven. In minder dan twee decennia is de optische communicatie vervolgens uitgegroeid tot het dominante transportsysteem voor informatie. Zo is in Nederland momenteel het gehele lange-afstandsnetwerk (d.w.z. tussen de districtscentrales) reeds 'verglaasd', terwijl ook in het middellange- en korte-afstandsnetwerk (dit is tot aan de wijkcentrale) de glasvezel op ruime schaal zijn intrede heeft gedaan. Aan het einde van 1992 was hiermee in Nederland ruim 13000 kilometer glasvezelkabel geïnstalleerd.

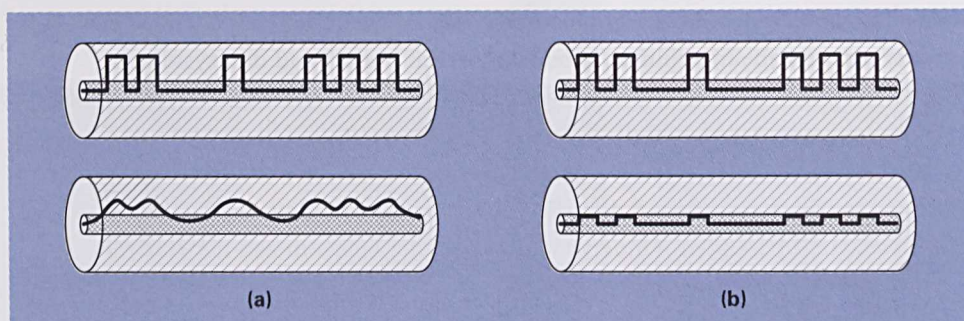


Een glasvezelkabel (rechts), een coaxiale kabel (midden) en een symmetrische kabel, opgebouwd uit een groot aantal paren koperdraad (links).

Als men bedenkt dat de glasvezelsystemen nog volop in ontwikkeling zijn, kan men zich afvragen waarom de exploitatie in zo'n hoog tempo heeft plaatsgevonden. De voornaamste drijfveren hiervoor zijn zowel economisch als technologisch van aard. Aan de economische zijde staan de lage kosten van glasvezels als transmissie-medium vanwege hun geringe eisen aan grondstoffen in vergelijking met koperkabels. Verder kunnen met glasvezelsystemen aanzienlijk grotere afstanden zonder signaalregeneratie overbrugd worden, en vereisen zij minder elektrische voedingsapparatuur, verkabelingsruimte, grondstations en onderhoud dan systemen gebaseerd op coaxkabels en tweedraads kabels. Vanuit transmissie-oogpunt is de praktisch ongelimiteerde bandbreedte die glasvezels kunnen bieden van doorslaggevend belang. Op dit gebied werden de glasvezelsystemen concurrerend op het moment dat de coaxsystemen door fysische beperking de grenzen van hun transmissiecapaciteit bereikten. Onderzoek door British Telecom aan het eind van de jaren zeventig wees uit dat bij het gebruik van coaxsystemen voor digitale transmissie de signaalregeneratie-afstand ten gevolge van dispersie tot 2 km gereduceerd moest worden om 140 Mbit/s-transmissie toe te laten. De overgang naar 565 Mbit/s zou een verdere reductie van de regeneratie-afstand tot 1 km betekend hebben. De ultieme capaciteit van de coaxkabels werd vastgesteld op 1,2 Gbit/s. Was het bij transmissie via coaxkabels de dispersie die de afstand voor signaalregeneratie beperkte, bij de glasvezel was aanvankelijk het propagatieverlies van het optische signaal hiervoor verantwoordelijk. Echter, reeds in 1970 slaagde Corning erin de zuiverheid van het glas zover te vergroten dat een mono-modale optische vezel met een demping van 20 dB/km geproduceerd werd. Dit leverde regeneratie-afstanden voor glasvezels die vergelijkbaar waren met die van de coaxkabels. Te zamen met de potentiële bandbreedte van glasvezels legde dit de fundamentele basis voor de glasvezel als basis voor het toekomstige telecommunicatienetwerk.

Heden ten dage heeft de glasvezel drie eigenschappen die het tot een bijna ideaal transmissie-medium maken: geringe fysieke afmetingen, lage propagatieverliezen ($< 0,4$ dB/km) en zeer grote bandbreedte. Deze eigenschappen maakten de directe vervanging van koper door glasvezel in het lange-afstandsnetwerk reeds rendabel. De hierin voorkomende punt-punt verbindingen worden gekenmerkt door hoge bitsnelheden, terwijl het benodigde aantal signaalbewerkingen relatief laag is. Binnen het huidige onderzoek aan telecommunicatiesystemen kijkt men echter verder dan alleen de punt-punt-verbindingen en richt men zich op de introductie van optische technologieën in het aansluitnet. Hier biedt de glasvezel mogelijkheden voor de introductie van nieuwe, breedbandige, diensten. De uitdaging voor systeemontwikkelaars is hierbij om architecturen te ontwerpen die op een efficiënte manier het schakelen van optische signalen bewerkstelligen wanneer zij gerouteerd

- worden vanaf de hoge-snelheidsverbindingen tussen de centrales naar de individuele abonnees. Geavanceerde multiplextechnieken (door efficiënte stapeling van
- vele kanalen in zowel de tijd als golflengte), te zamen met de mogelijkheden geboden door optische versterkers en coherente technieken, zorgen hierbij voor de
- optimale benutting van de capaciteit van de glasvezel.

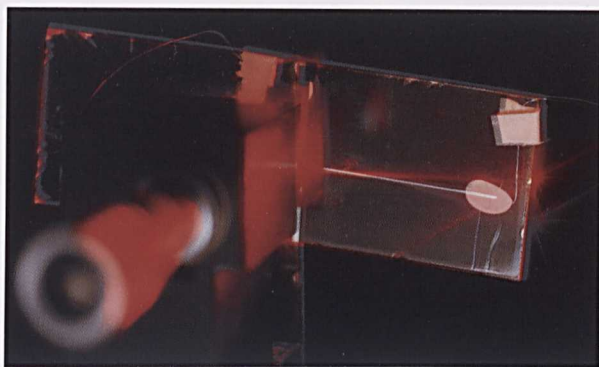


Signaalvorming van een digitaal signaal ten gevolge van dispersie (a) en demping (b).

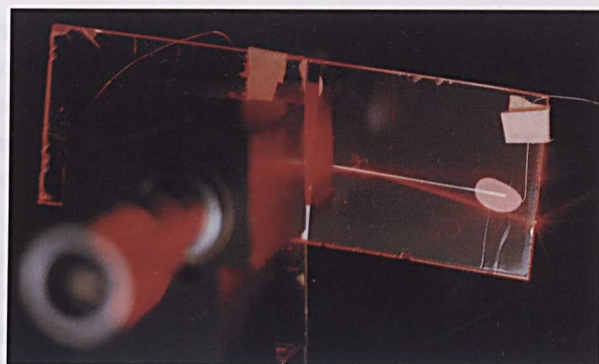
Het benodigde aantal signaalbewerkingen in het aansluitnet is groot. De beschikbaarheid van apparatuur voor het bewerken van optische signalen tegen economisch aanvaardbare kosten is derhalve van doorslaggevend belang voor het invoeren van de glasvezel in het aansluitnet. Wereldwijd wordt dan ook op grote schaal gewerkt aan de ontwikkeling van deze apparatuur. Een grote rol is hierin weggelegd voor geïntegreerde optica. Dit werkveld legt zich toe op het ontwikkelen van geïntegreerde optische schakelingen. Deze kunnen worden beschouwd als het equivalent van de geïntegreerde elektrische schakelingen uit de elektronica: op een gemeenschappelijk substraat worden verschillende componenten geïntegreerd die gezamenlijk het bewerken van het optische signaal verzorgen zonder dat hierbij enige conversies van het optische signaal naar het elektrische domein nodig zijn. De aansturing van de verschillende componenten zal echter wel vaak door middel van een elektrisch signaal gebeuren.

De basisprincipes van de optische schakelingen corresponderen met de basisprincipes van de elektrische schakelingen: het gebruik van een gemeenschappelijk substraat opent de mogelijkheden voor integratie van grote aantallen optische componenten tot een volledige schakeling, die in staat is om complexe bewerkingen op optische signalen uit te voeren. Bovendien garandeert het een stabiele positionering van de individuele componenten ten opzichte van elkaar, en een hoge mate van ongevoeligheid voor externe trillingen en temperatuurveranderingen. Ten gevolge van de geringe afmetingen van de componenten is de vermogensdissipatie laag. Door massaproductie ten slotte moeten de schakelingen tegen economisch aanvaardbare kosten vervaardigd kunnen worden.

2. Geïntegreerde optica



Een geïntegreerd-optische schakelaar, vervaardigd bij PTT Research. Op de linker foto wordt de lichtstraal in het glasplaatje naar boven afgebogen, op de rechter foto naar beneden.



De term geïntegreerde optica is in 1969 voor de eerste maal gebruikt in een inmiddels beroemd geworden artikel van S.E. Miller¹. Alhoewel dit artikel meer bedoeld is als een indicator van de mogelijkheden van geïntegreerde optica dan als een blauwdruk voor de toekomstige ontwikkelingen, worden hierin reeds ontwerpen voor verschillende schakelingen gepresenteerd. Hierop volgt vanaf het begin van de jaren zeventig een grootscheeps onderzoek naar geschikte materialen en vervaardigingsmethoden voor optische schakelingen. De lichtgeleidende eigenschappen van optische schakelingen op basis van glas, lithiumniobaat, halfgeleidermaterialen en organische polymeren worden in kaart gebracht. Tot een breed scala van geïntegreerd optische componenten komt het echter nog niet. De oorzaak hiervan moet gezocht worden in het feit dat tot dan toe de optische communicatie technologie veelal gebaseerd was op multi-modale glasvezels, terwijl veel geïntegreerd-optische toepassingen een mono-modaal signaal vereisen. De kentering komt tot stand met de algemene invoering van de mono-modale glasvezel in het optische telecommunicatienetwerk aan het begin van de jaren tachtig. Dit staat aan de basis van groot-schalig onderzoek naar geïntegreerd-optische componenten. Aanvankelijk richt het onderzoek zich op eenvoudige structuren, zoals signaalsplitters en schakelaars. Geleidelijk aan worden de schakelingen echter complexer en de eisen aan de individuele componenten strenger. Een aantal optische componenten wordt samen geïntegreerd op een gemeenschappelijk substraat. Naast de optische componenten worden ook elektronische componenten geïntegreerd. In dat geval spreekt men van geïntegreerde opto-elektronica. De vervaardiging van volledig geïntegreerde complexe schakelingen, zoals coherent-optische ontvangers en grote schakelmatri-ces, liggen hiermee binnen de mogelijkheden.

¹) S.E. Miller, *Integrated Optics: an introduction*, Bell Syst. Techn. J., vol. 48, no.7, 1969, blz 2059-2068

- Naast de meest directe toepassingen in optische communicatiesystemen heeft geïntegreerde optica een sterke spin-off naar andere werkvelden. De toepassingen
- van geïntegreerd optische schakelingen in de sensor-technologie zijn legio, terwijl ook de vervanging van elektronica in computersystemen door optische equivalenten
- binnen handbereik lijkt te komen.

- In het volgende hoofdstuk zullen de basisprincipes van de geïntegreerde optica uiteen gezet worden. In de daarop volgende hoofdstukken komen de activiteiten van
- PTT Research op het gebied van de geïntegreerde optica ter sprake.

2. Geïntegreerde optica

De integratie van grote hoeveelheden elektronische componenten op een gemeenschappelijk substraat heeft tot een revolutie binnen de wereld van de elektronica geleid. Complete wanden vol met elektronenbuizen uit de jaren '50 zijn vervangen door minuscule chips, die met massaproductie-technieken tegen zeer lage prijzen vervaardigd worden. Zal zich binnen de optische wereld eenzelfde ontwikkeling voordoen?

Geïntegreerde optica beoogt inderdaad een vergelijkbare trend binnen de optische wereld tot stand te brengen. Traditionele elementen voor het bewerken van optische signalen (zoals prisma's, tralies en lenzen) worden als optische componenten op basis van een vlak substraat vervaardigd, maar ook geheel nieuwe componenten worden ontwikkeld. Grootschalige integratie en massaproductie van geavanceerde optische schakelingen moeten leiden tot optische signaalbewerking tegen economisch aanvaardbare prijzen.

In dit hoofdstuk worden de fundamenteën van het werkveld geïntegreerde optica besproken. De fysische grondslag van lichttransport door een schakeling wordt uiteengezet in paragraaf 2.1. Op basis van de mogelijkheid tot externe aansturing van het te bewerken optische signaal, worden de optische componenten onderscheiden in twee groepen: de passieve componenten (paragraaf 2.2) en de actieve componenten (paragraaf 2.3). De verschillende materialen die gebruikt kunnen worden om optische componenten te vervaardigen worden behandeld in paragraaf 2.4. In paragraaf 2.5 worden enige aspecten met betrekking tot integratie van verschillende componenten behandeld. De inspanningen van de werkgroep Geïntegreerde Optica binnen PTT Research komen tot slot aan de orde in paragraaf 2.6.

Wit licht dat een prisma binnenvalt wordt gesplitst in verschillende kleuren: rood, oranje, geel, groen, blauw, indigo en violet.

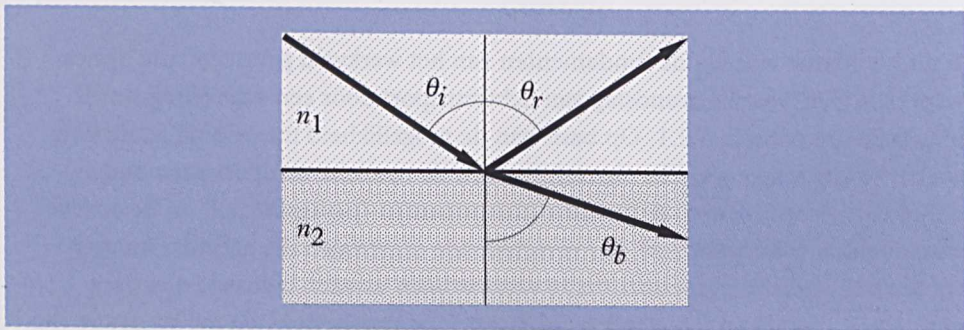


- **2.1 Optische golfgeleiding**

Het transport van een optisch signaal door de componenten en over de totale schakeling wordt optische golfgeleiding genoemd. Golfgeleiding is gebaseerd op totale interne reflectie van optische golven aan scheidingsvlakken tussen gebieden met een hoge en een lage brekingsindex.

- **Totale interne reflectie**

Wanneer een optische golf vanuit diëlektrisch medium 1 (brekingsindex n_1) invalt op het grensvlak met diëlektrisch medium 2 (brekingsindex n_2), dan wordt de golf in twee delen opgesplitst: een gereflecteerde golf die zich voortplant in medium 1 en een gebroken golf die zich voortplant in medium 2 (figuur 2.1). Dit verschijnsel wordt beschreven door de vergelijkingen van Fresnel en de wet van Snellius.



Figuur 2.1:
Brekning en reflectie van een lichtgolf.

De vergelijkingen van Fresnel geven weer hoe de amplitudes van de invallende golf, de gereflecteerde golf en de gebroken golf zich tot elkaar verhouden. Deze worden verder buiten beschouwing gelaten. De wet van Snellius geeft de verhouding van de invalshoek θ_i , de reflectiehoek θ_r en de brekingshoek θ_b weer:

$$\theta_i = \theta_r,$$
$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_b} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Indien n_2 kleiner is dan n_1 , zegt de tweede vergelijking dat de gebroken golf naar het scheidingsvlak toe buigt en dat de brekingshoek θ_b groter wordt indien de invalshoek θ_i groter wordt. Op een gegeven moment geldt zelfs $\theta_b = \frac{\pi}{2}$ en houdt de transmissie naar medium 2 volledig op; de totale energie van de invallende golf wordt gereflecteerd naar medium 1.

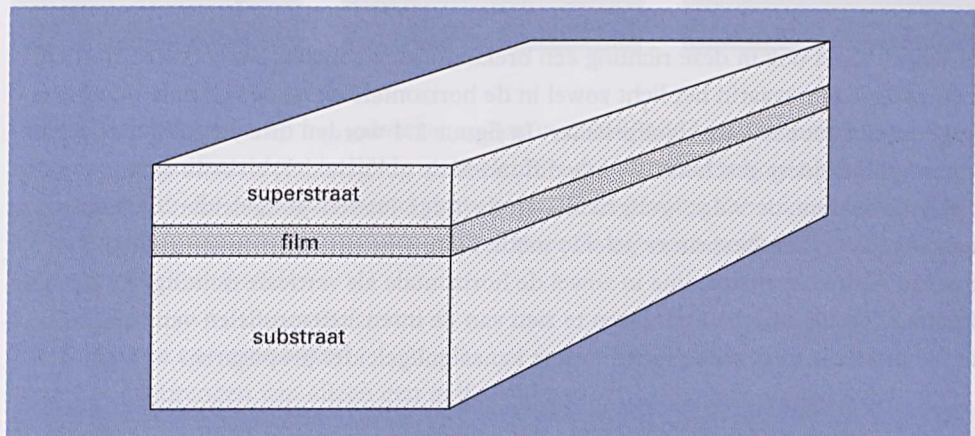
De invalshoek $\theta_i = \theta_c$ waarvoor dit gebeurt wordt de kritische hoek of de hoek van totale interne reflectie genoemd. Er geldt

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$

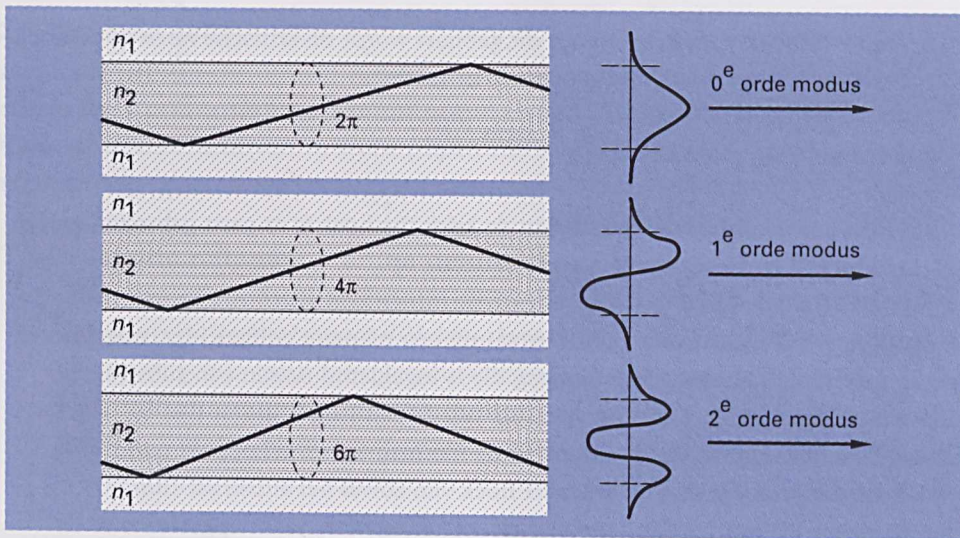
Ook voor invalshoeken groter dan de kritische hoek is er geen gebroken golf in medium 2 en treedt totale interne reflectie op.

De basis van optische schakelingen bestaat uit een planaire golfgeleider, opgebouwd uit een (eventueel inhomogene) filmlaag die is ingeklemd tussen een substraat en superstraat (figuur 2.2). De brekingsindex van de filmlaag is groter dan die van het substraat en het superstraat. Licht dat in de filmlaag wordt gekoppeld onder een invalshoek die groter is dan de kritische hoek van zowel het substraat-film scheidingsvlak als van het film-superstraat scheidingsvlak, raakt opgesloten in de filmlaag ten gevolge van totale interne reflectie.

Figuur 2.2:
Configuratie van een
planaire golfgeleider.

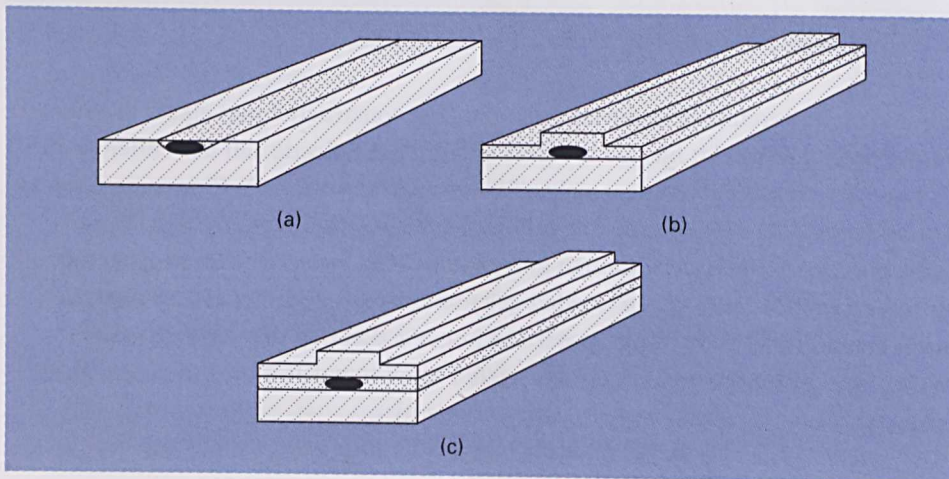


Indien de reflecterende lichtgolven in de filmlaag constructief met elkaar interfereren wordt de golf geleid; hiertoe moet de lichtgolf na reflectie aan het onderste en het bovenste scheidingsvlak met zichzelf in fase zijn (figuur 2.3). Binnen de filmlaag bestaat het veld dan uit een staande golf in de richting loodrecht op film. Voor rechte planaire golfgeleiders kunnen golven ongedeformeerd de film propageren. Dit zijn de geleide modi. Deze worden gekarakteriseerd door het aantal maxima van de staande golf in de filmlaag, dat één hoger is dan de orde van de modus. De 0-e orde (of fundamentele) modus heeft 1 maximum, de 1-e orde modus heeft 2 maxima, etc.



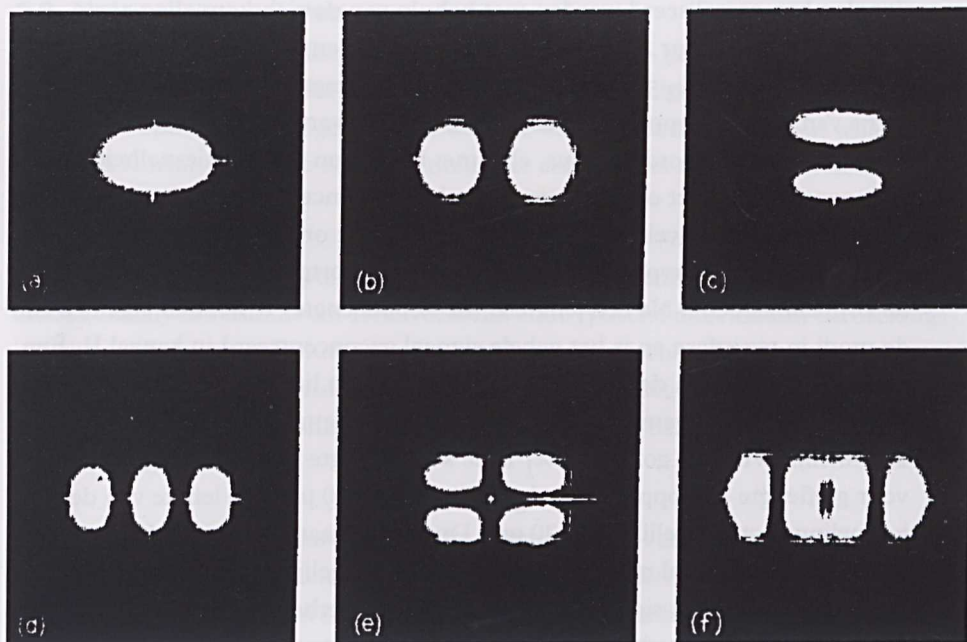
Figuur 2.3:
Constructieve interferentie
van reflecterende golven,
leidend tot geleide modi.

In een planaire golfgeleider is een optisch signaal alleen in de richting loodrecht op de film (de verticale richting) opgesloten. Om het licht ook in de horizontale richting op te sluiten moet ook in deze richting een brekingsindex-contrast aangebracht worden. Een golfgeleider waarin het licht zowel in de horizontale als in de verticale richting is opgesloten heet een kanaalgolfgeleider. In figuur 2.4 worden drie verschillende typen kanaalgolfgeleiders geschetst: de ingediffundeerde golfgeleider, en twee typen dijk-golfgeleiders: de 'ridge'-golfgeleider en de 'ridge-loaded'-golfgeleider. Ook voor kanaalgolfgeleiders bestaan er geleide modi. Deze worden nu gekarakteriseerd door het aantal intensiteitsmaxima in zowel de horizontale als verticale richting. Zo zijn in figuur 2.5 fotografische weergaven te zien van de intensiteitsprofielen van verschillende modi die in dezelfde rechthoekige kanaalgolfgeleider propageren.



Figuur 2.4:
Verschillende typen
kanaalgolfgeleiders: de
ingediffundeerde
golfgeleider (a),
de 'ridge' golfgeleider (b)
en de 'ridge loaded'
golfgeleider (c).

Figuur 2.5:
 Intensiteitsplaatjes van de
 geleide modi in een recht-
 hoekige kanaalgolfgeleider:
 een 00-modus (a),
 een 01-modus (b),
 een 10-modus (c),
 een 02-modus (d),
 een 11-modus (e),
 een 03-modus (f).



Om optische signalen op het substraat tussen verschillende locaties te transporteren zijn gebogen golfgeleiders nodig. In golfgeleiders die circulair gebogen zijn, bestaan eveneens modi die ongedeformeerd propageren. Ten gevolge van afstraling van licht zal tijdens propagatie van de geleide modus door de gebogen golfgeleider echter vermogensverlies optreden.

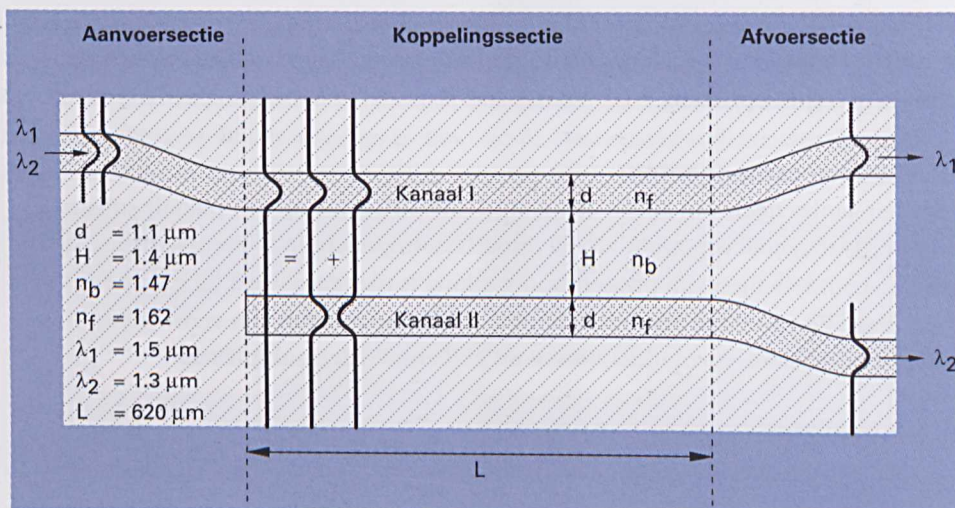
2.2 Passieve componenten

Door het aanbrengen van alleen een golfgeleiderstructuur op een planair substraat is het reeds mogelijk een groot aantal optische componenten te vervaardigen. Deze optische componenten zijn passief: hun werking is niet gebaseerd op externe aansturing. Voorbeelden van passieve optische componenten zijn vermogens-splitters, polarisatie- en modussplitters en golflengte-(de)multiplexers.

De passieve golflengte-demultiplexer

De capaciteit van een optische communicatienetwerk kan aanzienlijk uitgebreid worden door toepassing van golflengte-multiplexers. Hierbij worden optische signalen met verschillende golflengte gebruikt om verschillende signalen te vervoeren. Uiteraard moeten deze signalen weer van elkaar gescheiden worden met behulp van een golflengte-demultiplexer. Een passieve golflengte-demultiplexer voor het scheiden van twee optische

- signalen kan gerealiseerd worden met behulp van de richtkoppeling zoals weergegeven in figuur 2.6. Signaal 1 heeft de golflengte $\lambda_1 = 1,5 \mu\text{m}$, signaal 2 heeft de golflengte $\lambda_2 = 1,3 \mu\text{m}$. Voor beide golflengten kan de koppelingsectie van de richtkoppeling twee geleide modi bevatten, de fundamentele modus en de eerste orde modus, elke met hun eigen propagatiesnelheid. Aan de ingangszijde is het optische signaal geheel geconcentreerd in kanaal I, en daarmee worden zowel de fundamentele als eerste orde modus aangeslagen. Deze propageren vervolgens met verschillende voortplantingssnelheden door de koppelingsectie. Na een lengte L (de koppellengte) te hebben afgelegd zijn de modi in tegenfase en is het gehele signaal geconcentreerd in kanaal II. Een afstand L verder zijn de modi weer in fase en is het licht daarmee teruggekoppeld naar de bovenste golfgeleider. De koppellengte L is golflengteafhankelijk. Voor de golflengte λ_1 is de koppellengte gelijk aan $310 \mu\text{m}$ terwijl voor golflengte de koppellengte λ_2 gelijk is aan $620 \mu\text{m}$. De lengte van de koppelingsectie is gelijk aan $620 \mu\text{m}$. Dit is gelijk aan twee maal de koppellengte van het signaal met golflengte λ_1 en het is gelijk aan één maal de koppellengte van het signaal met golflengte λ_2 . Derhalve koppelt lichtsignaal 1 uit in het bovenste uitgangskanaal, terwijl lichtsignaal 2 uitkoppelt in het onderste uitgangskanaal: een volledige demultiplex van beide optische signalen heeft plaatsgevonden.



Figuur 2.6:
De passieve golflengte-
demultiplexer.

2.3 Actieve componenten

Voor veel toepassingen is het nodig om bewerkingen op het optische signaal actief aan te sturen. Als voorbeeld kan men denken aan een schakelaar, waarbij een inkomend optisch signaal geschakeld dient te kunnen worden naar een willekeurig uitgaand kanaal. Optische componenten met een externe aansturing heten actieve componenten.

Externe aansturing van optische componenten wordt verkregen door de brekingsindex (lokaal) te veranderen. Drie veelbelovende fysische effecten om de brekingsindexveranderingen te induceren zijn: het thermo-optische effect (met behulp van een temperatuursverandering), het elektro-optische effect (met behulp van een extern elektrisch veld) en het opto-optische effect (met behulp van een extern optisch veld).

Niet in alle materialen waarvan optische componenten vervaardigd worden, zijn de verschillende fysische effecten om brekingsindexveranderingen te verkrijgen in gelijke mate aanwezig. Bovendien lopen de responsiesnelheden voor de verschillende effecten sterk uiteen. Derhalve bepaalt de beoogde functionaliteit van een component in hoge mate het te gebruiken fysische effect, en daarmee ook het materiaal.

Zo kan met behulp van het thermo-optische effect slechts schakelwerking in milliseconden gerealiseerd worden. Voor toepassingen in routingsschakelaars kan dit voldoende zijn. Voor modulatiesnelheden in de orde van nanoseconden is echter gebruik van het elektro-optisch effect noodzakelijk. Zowel het thermo-optische als het elektro-optische effect kunnen met behulp van een elektrodeconstructuur relatief eenvoudig opgewekt worden.

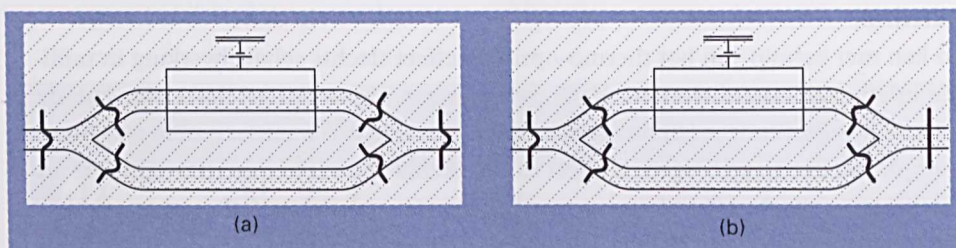
De Mach-Zehnder intensiteitsmodulator

Voor het aanbrenge van een digitaal signaal op een optische drager kan bijvoorbeeld intensiteitsmodulatie gebruikt worden. Intensiteitsmodulatie kan gerealiseerd worden door de aanstuurstroom van de zendlaser te variëren. Dit heeft echter een lijnbreedteverandering van de laser tot gevolg. Om dit negatieve effect te voorkomen gaat daarom vaak de voorkeur uit naar externe modulatie van de optische golf. Intensiteitsmodulatie met behulp van een Mach-Zehnder intensiteits-modulator is dan een veelbelovende optie.

De structuur van een Mach-Zehnder is weergegeven in figuur 2.7. Het binnenkomende optische signaal wordt verdeeld over twee identieke takken.

- Op één van de takken is een elektrode aangebracht. Door een spanning over de elektrode aan te leggen zal ten gevolge van bijvoorbeeld het elektro-optische effect de brekingsindex in de desbetreffende golfgeleider veranderen.
- Dit heeft op zijn beurt weer invloed op de fase van het optische signaal aan de uitgangszijde van de golfgeleider.
- Wanneer de spanning zodanig wordt ingesteld dat de uitgangssignalen van beide golfgeleiders met elkaar in tegenfase zijn treedt in de uitgaande golfgeleider volledige uitdoving van het signaal op en is daarmee intensiteitmodulatie bereikt. In hoofdstuk 3 wordt een numerieke simulatie van de werking van de Mach-Zehnder intensiteitsmodulator gepresenteerd.

De mogelijkheid tot volledig optische chips wordt geboden door het opto-optische effect. Hierbij zijn zowel het te moduleren signaal als het aansturende signaal optisch. Hiervoor worden niet-lineaire materialen ontwikkeld waarvan de brekingsindex verandert ten gevolge van de intensiteit van het optische signaal. Tevens openen deze materialen de mogelijkheid om de intensiteit van een inkomend signaal bepalend te laten zijn voor de wijze waarop het signaal geschakeld dan wel gemoduleerd wordt.



Figuur 2.7:
De Mach-Zehnder intensiteitsmodulator. Zonder bekrachting van de elektrode passeert het signaal ongedeformeerd de modulator (a). Bij bekrachting vindt volledige uitdoving van het signaal plaats (b).

2.4 Materialen

Voor de vervaardiging van optische componenten zijn diverse materialen beschikbaar. Aan elk daarvan is een specifieke technologie voor het aanbrengen van golfgeleiderstructuren gekoppeld. Binnen PTT Research is ervaring opgedaan met vier materialen:

- Glas
Golfgeleiders met lage demping kunnen verkregen worden door ionen-uitwisseling in glas. Hiervoor worden bij verhoogde temperaturen in het glas aanwezige ionen, bijvoorbeeld natrium-ionen, door middel van diffusie uitgewisseld met andere ionen, bijvoorbeeld kalium-ionen. Na afkoeling geeft dit een golfgeleider van het ingediffundeerde type. De elektro-optische effecten in glas zijn miniem.

Derhalve wordt glas voornamelijk gebruikt bij de vervaardiging van passieve componenten. Glas heeft als voordeel dat de overeenkomst van de brekingsindex met die van de glasvezel een efficiënte koppeling van beide mogelijk maakt.

- Lithiumniobaat

Door middel van diffusie van een strip titanium in een lithiumniobaat substraat kunnen kanaalgolfgeleiders van het ingediffundeerde type met een lage demping vervaardigd worden. Het elektro-optische effect in lithiumniobaat is zeer groot. Op dit moment is lithiumniobaat het standaard elektro-optische materiaal voor geïntegreerde optica. Het is reeds mogelijk een aantal optische schakelingen op basis van lithiumniobaat op commerciële basis te verkrijgen.

Evenals bij glas-golfgeleiders is ook hier een efficiënte koppeling van optische component en glasvezel mogelijk.

- Elektro-optische polymeren

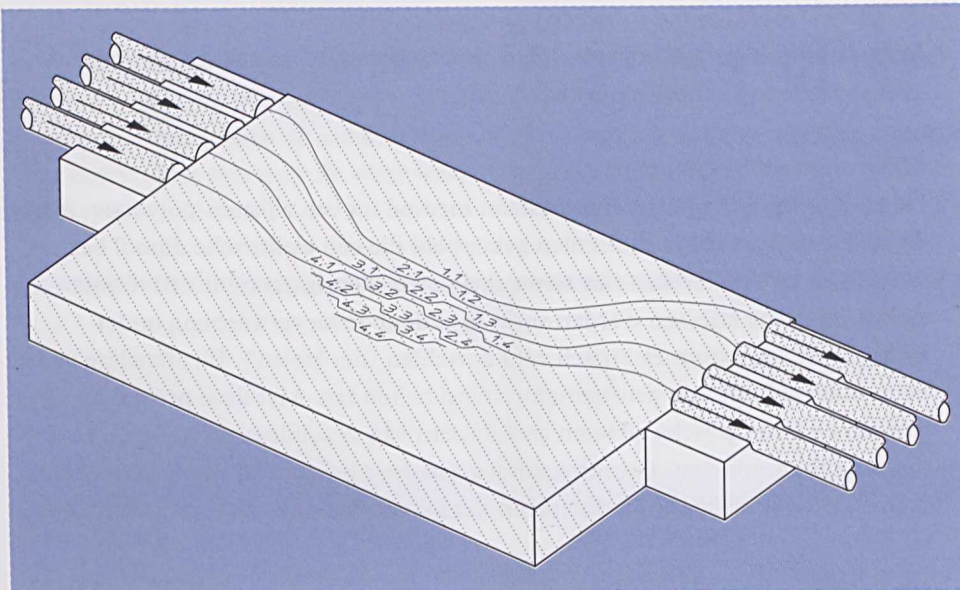
De elektro-optische polymeren bestaan meestal uit een zijketen-polymeer. Aan de zijketens zijn actieve moleculen gekoppeld die een elektrische dipool bezitten. De actieve moleculen zijn aanvankelijk willekeurig georiënteerd. Grote elektro-optische effecten worden verkregen door ze na verwarming onder invloed van een extern elektrisch veld te richten (het 'polen'). Bij afkoeling van het materiaal blijft hun gelijkgerichte stand behouden. Met deze procedure worden elektro-optische effecten gerealiseerd van dezelfde orde van grootte als die van lithiumniobaat. Grote voordelen van deze polymeren zijn hun geschiktheid voor hoge-snelheidsmodulatie en het gemak waarmee ze te bewerken zijn.

- III-V halfgeleidermaterialen

Vanwege de mogelijkheid van monolithische integratie met optische bronnen en detectoren en elektronische componenten staan golfgeleiderstructuren op basis van zogenaamde III-V halfgeleidermaterialen, zoals galliumarsenide en indiumfosfide, sterk in de belangstelling. De basisstructuur wordt hierbij gevormd door een lagenpakket van III-V halfgeleidermaterialen, verkregen met een epitaxiale groei methode. Door de deklaag gedeeltelijk weg te etsen kan een kanaalgolfgeleider van het dijktype verkregen worden, die goed koppelt met laserbronnen en detectoren.

• 2.5 Integratie

- Integratie van verschillende optische componenten tot een enkel optische schakeling heeft een compacter, stabiel en meer functioneel optisch systeem tot gevolg. Men onderscheidt de hybride en monolitische integratie. Bij hybride integratie worden de verschillende componenten individueel op verschillende substraten vervaardigd, waarna ze tot één geheel worden samengevoegd. Bij monolitische integratie worden echter alle componenten op hetzelfde substraat aangebracht. Zo kunnen grote $N \times M$ -schakelmatrices verkregen worden door integratie van een aantal 2×2 -schakelaars (figuur 2.8): de vervaardiging van een prototype 16×16 -schakelaars op basis van monolitische integratie op lithiumniobaat is reeds mogelijk. Voor grotere schakelmatrices is echter nog hybride integratie vereist.



Figuur 2.8

4 x 4 schakelaar.

Naast passieve en actieve componenten is het voor veel toepassingen wenselijk om tevens optische bronnen en detectoren en elektronische componenten te integreren. Deze componenten worden gerealiseerd op basis van halfgeleidermaterialen. Monolitische integratie vereist derhalve halfgeleidermaterialen als substraat. In de voor de telecommunicatie belangrijke optische vensters in het 1300 en 1500 nanometergebied is daarvoor alleen het materiaal indiumfosfide beschikbaar.

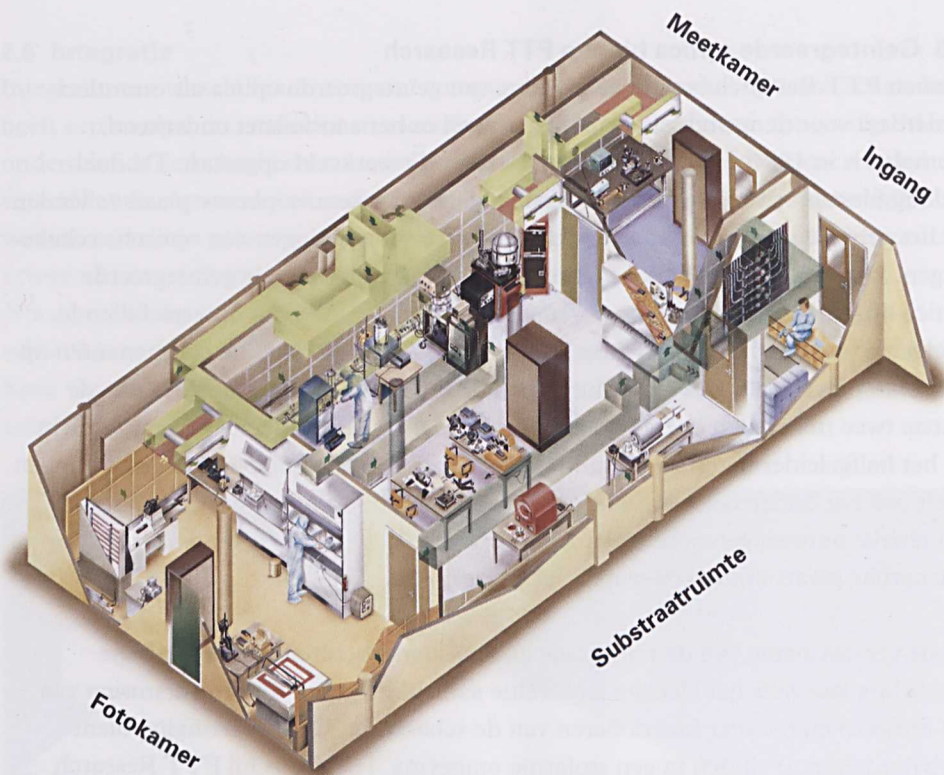
2.6 Geïntegreerde optica binnen PTT Research

Binnen PTT Research is tijdig het belang van geïntegreerde optica als essentieel onderdeel voor de introductie van de glasvezel in het aansluitnet onderkend. Derhalve is in 1980 een onderzoeksgroep voor dit werkveld opgestart. De doelstelling hiervan is tweeledig. In de eerste plaats dient kennisopbouw plaats te vinden op het gebied van toepassingen en technologische uitvoeringen van optische schakelingen. Daarnaast wordt actief aan de ontwikkelingen binnen de geïntegreerde optica bijgedragen door het uitvoeren van innovatief onderzoek op verschillende deelgebieden. Aanvankelijk richtte het onderzoek zich op optische componenten op basis van polymeren, glas en lithiumniobaat. Inmiddels is het onderzoek aan de laatste twee materialen beëindigd en opgevolgd door een onderzoekproject gericht op het halfgeleidermateriaal indiumfosfide. Naast deze technologische inspanningen heeft ook het onderzoek naar de theoretische onderbouwing en ontwikkeling van numerieke ontwerp gereedschappen voor optische golfgeleiderstructuren altijd een belangrijke plaats binnen de werkgroep ingenomen.

Bij de vervaardiging van de minuscule golfgeleiderstructuren van de optische schakeling kan zelfs het kleinste stofdeeltje aanleiding geven tot een verstoring van het ontwerp en het niet functioneren van de schakeling. De vervaardiging dient derhalve plaats te vinden in een stofarme omgeving. Hiertoe is bij PTT Research een stofarme ruimte aanwezig. Het dragen van beschermende kleding geeft het werk in de stofarme ruimte een zeer futuristische aanblik.

De stofarme ruimte

De componenten op optische schakelingen bevatten structuren met afmetingen van tienden van micrometers tot enkele micrometers. Dit is van dezelfde orde van grootte als de afmetingen van stofdeeltjes. Aangezien in 'normale' ruimten ongeveer 1.000.000 stofdeeltjes per kubieke voet voorkomen, is fabricage van deze componenten onder normale omstandigheden vrijwel onmogelijk. Voor het onderzoek aan optische chips is daarom bij PTT Research een stofarme ruimte gebouwd (figuur 2.9). De ruimte heeft een oppervlakte van 200 m². Binnen de ruimte wordt een stofklasse 100 gehandhaafd. Dit betekent dat er minder dan 100 stofdeeltjes met een grootte van 2 micrometer per kubieke voet aanwezig zijn. Het lage stofgehalte wordt bereikt door continu een laminaire, gefilterde luchtstroom door de ruimte te leiden. Tevens wordt de ruimte op overdruk gehouden om het binnendringen van stof van buitenaf tegen te gaan. Omdat de mens in deze ruimte een belangrijke bron van stof vormt, is het dragen van nylon overalls, speciale schoenen en hoofdkappen in de ruimte verplicht.



Figuur 2.9:
Stofarme ruimte

De ingang van de stofarme ruimte bestaat uit een *stofsluis*. Hier trekt men een nylon overall, een soort ruimtepak, aan waarmee voorkomen wordt dat stof uit kleding en van de huid in de ruimte komt.

Vanuit de sluis komt men in de *substraatruimte*. In deze ruimte worden de substraten waarop de optische chips gefabriceerd worden grondig gereinigd. Bovendien worden in deze ruimte met verschillende technieken de golfgeleiders gerealiseerd in de materialen waarmee bij PTT Research gewerkt wordt.

Vanuit de substraatruimte kan de *fotokamer* bereikt worden. In deze ruimte wordt met een fotolithografisch proces een gewenst patroon, bijvoorbeeld de golfgeleiderstructuur, in een lichtgevoelige laklaag gemaakt. Aangezien het fotolithografische proces een groot aantal zeer kritische stappen omvat, heeft

3. Numerieke ontwerpmethoden

de fotokamer een eigen luchtbehandelings-installatie en wordt deze ruimte op overdruk gehouden ten opzichte van de substraatruimte. Tevens is in deze ruimte meetapparatuur opgesteld voor het meten van staphoogten.

Tenslotte bevat de *stofarme ruimte* een *meetkamer*. In deze ruimte worden de gemaakte chips voorzien van glasvezels en verder uitgetest. Hiertoe is in deze ruimte een trillingsvrije tafel opgesteld.

In de volgende hoofdstukken worden de onderzoeksinspanningen van de werkgroep Geïntegreerde Optica op de verschillende deelgebieden nader beschouwd. In hoofdstuk 3 wordt een overzicht gegeven van het theoretische en numerieke werk dat aan optische golfgeleiding wordt verricht. De hierin aangedragen kennis is nuttig voor het begrip van de te presenteren optische componenten. De onderzoeksinspanningen op het gebied van de optische schakelingen op basis van het halfgeleidermateriaal indiumfosfide en de organische niet-lineaire polymeren komen in respectievelijk de hoofdstukken 4 en 5 aan de orde.

Figuur 3.1
Een schematische afbeelding van de opstelling van de meetkamer. De afbeelding toont de afmetingen van de meetkamer en de positie van de meetapparatuur. De afbeelding is een schematische afbeelding van de opstelling van de meetkamer.



-
-
-
-
-

3. Numerieke ontwerpmethoden

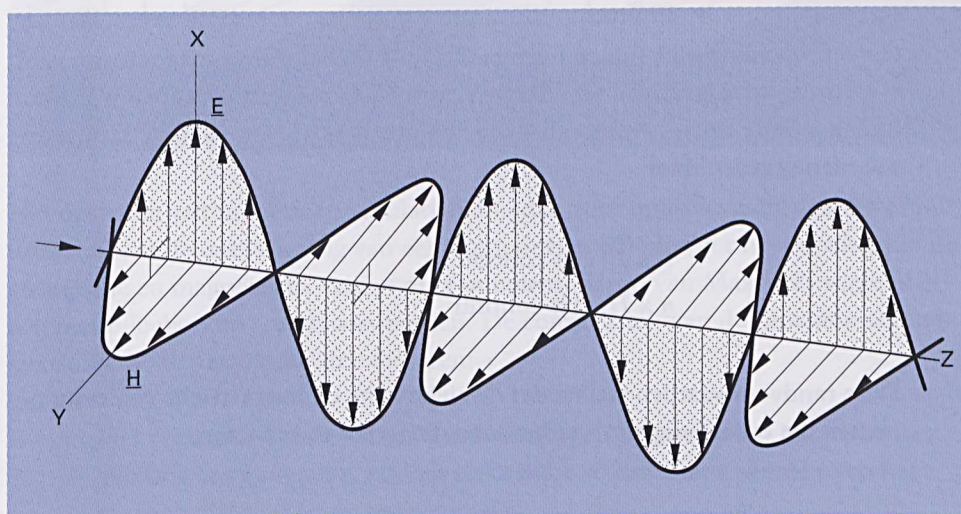
De ontwerpen van optische componenten worden steeds complexer. Het ontwerpen op basis van trial and error is zowel duur als tijdrovend. Derhalve zijn ondersteunende numerieke simulatiemethoden onontbeerlijk. Daarnaast verschaffen deze ontwerpmethoden nieuwe inzichten in het fysische proces van de optische golfgeleiding.

In dit hoofdstuk wordt een theoretische onderbouwing van het verschijnsel van lichtgeleiding door optische golfgeleiderstructuren gegeven (paragraaf 3.1). Twee hieruit voortvloeiende numerieke ontwerpmethoden voor optische componenten worden besproken (de modale methoden in paragraaf 3.2 en de propagatiemethoden in paragraaf 3.3). In de kaders zijn enige wiskundige formuleringen opgenomen. De lezers die hiermee onbekend zijn, kunnen deze overslaan zonder dat de betoogtend van het verhaal verloren gaat.

3.1 Theoretische beschrijving van lichtvoortplanting

Lichtgolven zijn elektromagnetisch van aard. Dit betekent dat ze zijn opgebouwd uit een elektrisch en een magnetisch veld. Het elektrische en magnetische veld zijn vectorvelden, die elkaar onderling in stand houden: een veranderend elektrisch veld wekt een magnetisch veld op, terwijl een veranderend magnetisch veld op zijn beurt een elektrisch veld opwekt. Het elektrische en magnetische veld zijn hierbij in ieder punt loodrecht ten opzichte van elkaar georiënteerd (figuur 3.1). De richting waarin het elektrische veld wijst wordt daarbij de polarisatierichting genoemd.

Figuur 3.1:
Elektromagnetische golven bestaan uit een elektrisch veld E en een magnetisch veld H . Deze velden zijn loodrecht ten opzichte van elkaar georiënteerd.



- De interactie tussen het elektrische en magnetische veld wordt wiskundig beschreven door een stelsel van twee vectoriële veldvergelijkingen, in 1873 voor de eerste maal geformuleerd door James Clerk Maxwell in zijn beroemde boek².
- In het kader zijn Maxwell's vergelijkingen en de hieruit volgende randvoorwaarden voor overgangen tussen twee media gegeven.

- **De vergelijkingen van Maxwell**

De Maxwell vergelijkingen beschrijven de interactie tussen het elektrische veld $\underline{E}(\underline{x},t) = (E_x, E_y, E_z)(\underline{x},t)$ en het magnetische veld $\underline{H}(\underline{x},t) = (H_x, H_y, H_z)(\underline{x},t)$ in willekeurig punt $\underline{x} = (x,y,z)$ in de ruimte en op tijdstip t . De velden gegenereerd door een tijdharmonische monochromatische lichtbron met frequentie ω zijn van de vorm

$$\{\underline{E}, \underline{H}\}(\underline{x},t) = \{\underline{E}, \underline{H}\}(\underline{x}) \cdot \exp[j\omega t].$$

Indien geen externe elektrisch of magnetische bronnen aanwezig zijn luiden Maxwell's vergelijkingen in een homogeen diëlectrisch medium met brekingsindex n :

$$\begin{aligned} -\text{rot } \underline{H}(\underline{x}) + j\omega \epsilon_0 n^2 \underline{E}(\underline{x}) &= \underline{0}, \\ \text{rot } \underline{E}(\underline{x}) + j\omega \mu_0 \underline{H}(\underline{x}) &= \underline{0}. \end{aligned}$$

Hierin zijn ϵ_0 en μ_0 respectievelijk de permittiviteit en permeabiliteit in vacuüm.

Op het scheidingsvlak tussen twee media voldoet het elektromagnetische veld aan randvoorwaarden die uit Maxwell's vergelijking afgeleid kunnen worden. Indien \underline{n} de normaalvector op het scheidingsvlak is, dan worden de randvoorwaarden gegeven door

$$\begin{aligned} \underline{n} \times \underline{E}(\underline{x}) &\text{ is continu} \\ \underline{n} \times \underline{H}(\underline{x}) &\text{ is continu} \end{aligned}$$

Deze randvoorwaarden stellen dat de elektrische en magnetische veldcomponenten die evenwijdig zijn aan het scheidingsvlak continu zijn.

²J.C. Maxwell, A treatise on electricity and magnetism, Clarendon Press, Oxford 1873

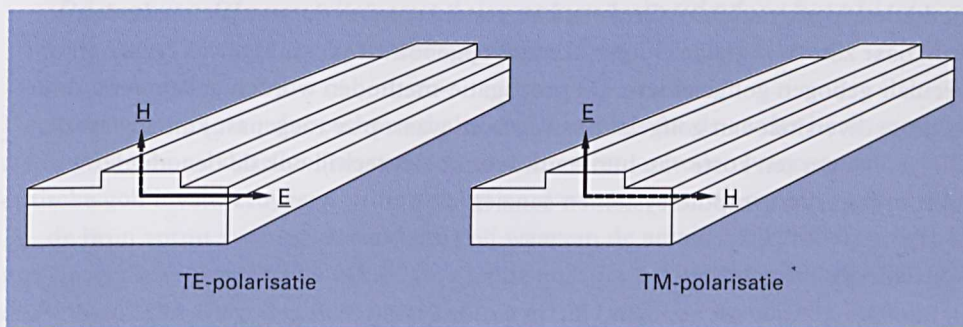
Uit de vectoriële Maxwell-vergelijkingen volgt dat iedere component van het elektromagnetische veld op zich voldoet aan de scalaire golfvergelijking

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 \right\} \psi(x, y, z) = 0, \quad k_0^2 = \omega^2 \epsilon_0 \mu_0,$$

waarin ψ een willekeurige component van het elektrische of magnetische veld kan zijn. Alhoewel ieder van de veldcomponenten op zich aan de scalaire golfvergelijking voldoet, worden alle componenten aan elkaar gekoppeld door de randvoorwaarden die op het scheidingsvlak van twee media gelden.

In de golfgeleiderstructuren zoals ze in de geïntegreerde optica gebruikt worden blijken in het algemeen twee typen van golven te kunnen propageren: de Transversaal Elektrisch gepolariseerde golven (TE-polarisatie) en de Transversaal Magnetisch gepolariseerde golven (TM-polarisatie). Voor de TE-polarisatie is het elektrische veld loodrecht op de voortplantingsrichting en bijna evenwijdig aan het lagenpakket geïoriënteerd (figuur 3.2). Voor TM-polarisaties is dit het geval voor het magnetisch veld. In de volgende hoofdstukken worden optische componenten besproken waarvoor het verschil in polarisaties een essentiële rol speelt.

Figuur 3.2:
De oriëntatie van het elektrische en magnetische veld voor de TE- en TM-polarisatie.



Het opstellen van numerieke simulatiemethoden voor optische golfgeleiderstructuren behelst de ontwikkeling van een numerieke methode voor het bepalen van de elektrische en magnetische velden die een oplossing zijn van Maxwell's vergelijkingen met bijbehorende randvoorwaarden. De complexiteit van de simulatiemethode wordt hierbij bepaald door drie factoren:

1. Het vectoriële karakter van Maxwell's vergelijkingen vereist het betrekken van drie componenten van het elektrische en drie componenten van het magnetische veld in de berekeningen.

2. De optische golfgeleiderstructuren zijn driedimensionaal. Op ieder scheidingsvlak tussen verschillende media moet aan de randvoorwaarden voldaan worden.

3. Optische golfgeleiderstructuren hebben een 'open' karakter. Dit betekent dat het elektromagnetische veld zich in alle richtingen oneindig ver uitstrekt: in geen enkel punt van de ruimte kan het veld *à priori* gelijk aan nul verondersteld worden. Daar waar de grenzen liggen van de structuur die je in de numerieke berekeningen meeneemt moet vooraf een keuze gedaan worden voor de randvoorwaarde.

De nauwkeurigheid van een simulatiemethode wordt bepaald door de mate waarin aan bovenstaande punten voldaan wordt. Door verwaarlozing of vereenvoudiging van enige van deze punten vermindert de accuratesse van een methode. De benodigde rekentijd kan hiermee echter drastisch gereduceerd worden. Hiermee wordt een afweging mogelijk tussen de gewenste nauwkeurigheid en beschikbare rekentijd.

Twee veel gebruikte numerieke simulatiemethoden worden besproken in de volgende paragrafen: de modale methoden (paragraaf 3.2) en de propagatiemethoden (paragraaf 3.3). Grofweg kan gesteld worden dat modale methoden bruikbaar zijn voor golfgeleiderstructuren opgebouwd uit stuksgewijs rechte en/of circulair gebogen golfgeleiders. De propagatiemethoden worden gekenmerkt door de grote diversiteit aan golfgeleiderstructuren waarop ze toegepast kunnen worden. Dit gaat echter ten koste van hun nauwkeurigheid, terwijl ook de benodigde reketijden voor computersystemen aanzienlijk zijn.

3.2 Modale methoden

In hoofdstuk 2 is reeds genoemd dat in rechte en circulair gebogen golfgeleiders het elektromagnetische veld zich in de vorm van geleide modi voortplant. De intensiteitsverdeling van de geleide modi is bepaald door de structuur van de golfgeleider en de frequentie van het gebruikte optische signaal. Daar veel optische componenten opgebouwd zijn uit een aaneenschakeling van stukken rechte en gebogen golfgeleiders, is het mogelijk om uit de kennis van de intensiteitsverdeling van de geleide modi van ieder van de individuele stukken de werking van de gehele component te evalueren. De numerieke methoden die gebaseerd zijn op het bepalen van de geleide modi worden de modale methoden genoemd. Geleide modi propageren ongedeformeerd door een rechte of gebogen golfgeleider. Het op te lossen probleem is daardoor bij de modale methoden essentieel slechts tweedimensionaal van aard, hetgeen het oplossen sterk vereenvoudigt.

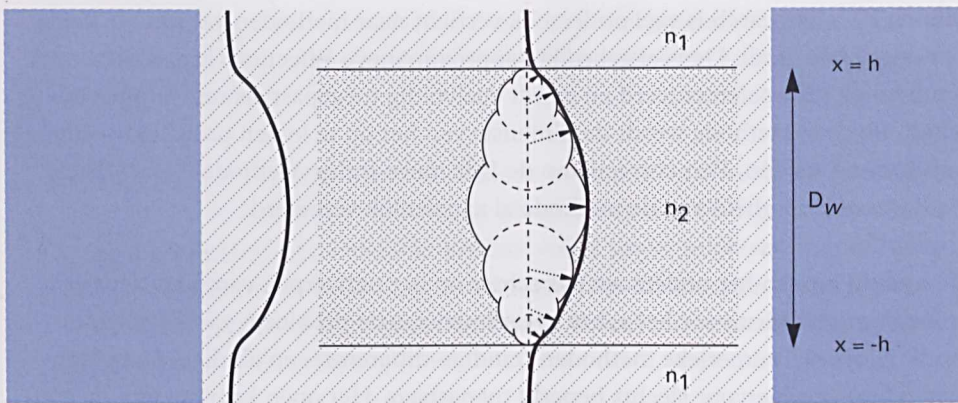
Binnen PTT Research is veel onderzoek verricht naar methoden voor het bepalen van de geleide modi. De veel gebruikte approximatieve Effectieve Index Methode, is numeriek geïmplementeerd en wordt veelvuldig toegepast als ontwerpgereedschap. Bij deze methode wordt de dimensie van het op te lossen probleem verder gereduceerd tot één. Een correctie op de Effectieve Index Methode is ontwikkeld die de nauwkeurigheid van de methode al aanzienlijk verbeterd.

De nadruk binnen het onderzoek ligt echter op het ontwerpen van nauwkeurige oplossingsmethoden voor het echte tweedimensionale probleem van de geleide modi. Klassieke numerieke methoden (eindige-differentie- en eindige-elementen-methoden) zijn hiervoor slechts beperkt toepasbaar. Het open karakter van de golfgeleiderstructuur is daar debet aan (punt 3, paragraaf 3.1). Derhalve is een nieuwe, accurate numerieke methode voor de bepaling van de geleide modi ontwikkeld. De methode heet de domein-integraalvergelijkingen-methode. De methode representeert de mathematische formulering van het principe van Huygens:

Wanneer een golf invalt op een verstrooiend object vormt ieder punt van dit object de bron van een nieuwe secundaire golf.

De superpositie van alle secundaire golven levert de door het object verstrooide golf.

De golfgeleider D_{zw} wordt beschouwd als een verstoring van de verder homogene achtergrond en zal daardoor als verstrooiend voorwerp optreden wanneer een optische golf invalt. Huygens' principe zegt nu dat ieder punt binnen de golfgeleider D_{zw} de bron vormt voor een secundaire golf waarvan de amplitude recht evenredig is met de locale veldamplitude van de invallende golf. De totale verstrooide golf is de omhullende van alle secundaire golven. Daar geleide modi de eigenschap hebben dat ze ongedeformeerd door de golfgeleider lopen, moet echter de verstrooide golf gelijk zijn aan de invallende golf. De invallende modus wekt dus een verstrooid veld op, dat op zijn beurt echter weer gelijk moet zijn aan het invallende veld (figuur 3.3). Deze eigenschap is voldoende om de geleide modi te bepalen. De resulterende numerieke methode is de domein-integraalvergelijkingen-methode. Alle drie de factoren van complexiteit genoemd in paragraaf 3.1 worden hierin op rigouze wijze opgelost. Het open karakter van de golfgeleiders wordt aangepakt door de achtergrondstructuur op analytische wijze in het numerieke proces in rekening te brengen; het gebied waarop de numerieke berekeningen betrekking hebben is daarmee beperkt tot de eindige doorsnede D_{zw} van de golfgeleider zelf.

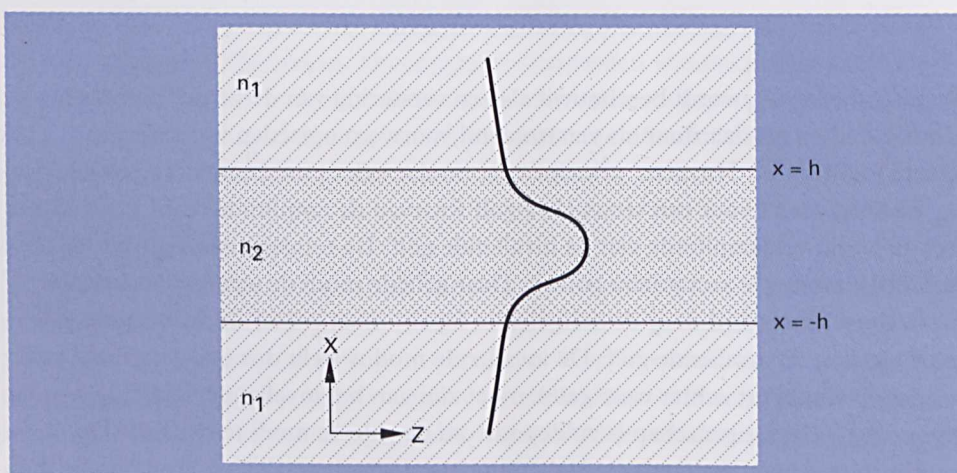


Figuur 3.3:
Het principe van Huygens:
ieder punt binnen de
filmlaag wordt beschouwd
als een nieuwe puntbron.

Een nauwgezette wiskundige afleiding van de domein-integraalvergelijkingen voor rechte en gebogen planaire en kanaalgolfgeleiders valt buiten de reikwijdte van deze monografie. In het kader wordt ter illustratie een mathematische afleiding van de domein-integraalvergelijkingen voor rechte planaire golfgeleiders gegeven.

Domein-integraalvergelijkingen voor planaire golfgeleiders

Gezocht worden de geleide modi van de planaire structuur uit figuur 3.4.



Figuur 3.4:
De symmetrische planaire
golfgeleider.

De geleide modi zijn elektromagnetische velden waarvan zowel het elektrische veld als het magnetische veld tijd-harmonisch en ongedeformeerd in de positieve z -richting propageren ($\frac{\partial}{\partial y} \equiv 0$):

$$\{\underline{E}, \underline{H}\}(x, z, t) = \{\widetilde{\underline{E}}, \widetilde{\underline{H}}\}(x) \cdot \exp[j(\omega t - k_0 N z)]$$

Hierbij is k_0 het golfgetal in vacuüm en N is de effectieve brekingsindex die een maat voor de propagatiesnelheid van de modus is.

Het elektrische en magnetische veld kunnen bepaald worden uit de veldvergelijkingen van Maxwell. Voor planaire golfgeleiders splitsen deze zich in twee groepen van vergelijkingen, voor de TE- en de TM-polarisatie respectievelijk. Voor de TE-polarisatie is alleen de E_y component van het elektrische veld ongelijk aan 0 en voldoet aan de scalaire golfvergelijking

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_0^2 (n^2 - N^2) \right\} \widetilde{E}_y(x) = 0, \quad n = \begin{cases} n_1 & \text{indien } |x| > h, \\ n_2 & \text{indien } |x| < h, \end{cases}$$

ofwel

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_0^2 (n_1^2 - N^2) \right\} \widetilde{E}_y(x) = -k_0^2 (n^2 - n_1^2) \widetilde{E}_y(x) =: -\widetilde{\mathcal{J}}_y^c(x)$$

De contrastbron-term $\widetilde{\mathcal{J}}_y^c(x)$ is alleen ongelijk aan 0 binnen de filmlaag. In overeenstemming met Huygens' principe wordt de contrastbron-term herschreven als superpositie van puntbronnen

$$\widetilde{\mathcal{J}}_y^c(x) = k_0^2 (n_2^2 - n_1^2) \int_{x'=-h}^{x'=h} \widetilde{E}_y(x') \delta(x - x') dx',$$

waarin de Dirac-deltafunctie $\delta(x)$ geïdentificeerd kan worden met een puntbron ter plaats $x = 0$. De Greense functie $\widetilde{G}(x, x')$ is de oplossing van het puntbronprobleem

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_0^2 (n_1^2 - N^2) \right\} \widetilde{G}(x, x') = -\delta(x - x'),$$

met

$$\widetilde{G}(x, x') = \frac{\exp[-k_0 \sqrt{N^2 - n_1^2} |x - x'|]}{2k_0 \sqrt{N^2 - n_1^2}}$$

- Het superpositie-principe levert nu de domein-integraalvergelijking

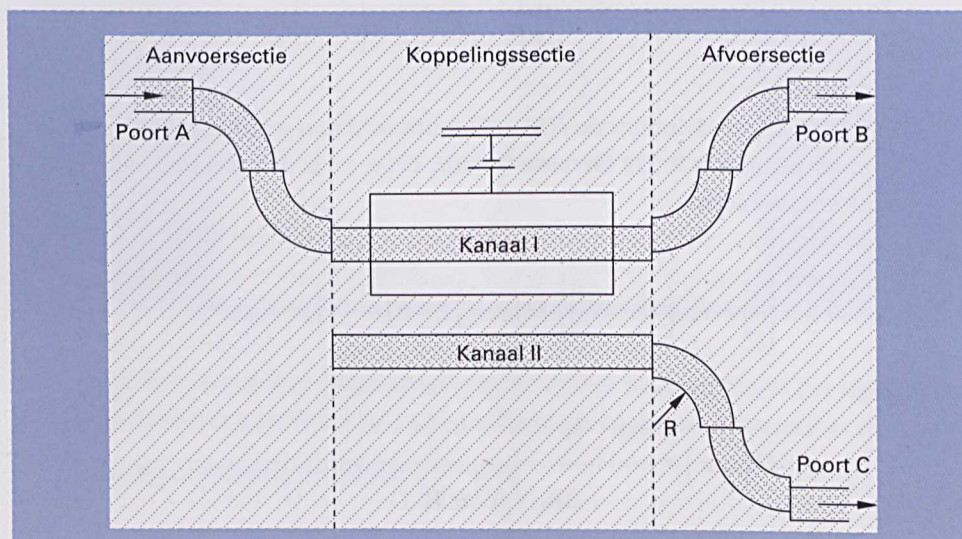
$$\tilde{E}_y(x) = k_0^2 (n_2^2 - n_1^2) \int_{x'=-h}^{x'=h} \tilde{G}(x, x') \tilde{E}_y(x') dx'.$$

- Zowel aan de linker- als aan de rechterzijde van het gelijk teken komt het elektrische veld $\tilde{E}_y(x)$ voor. We hebben hiermee een homogene integraalvergelijking die alleen een niet triviale oplossing heeft voor discrete waarden van de effectieve brekingsindex N . De discrete oplossingen zijn de geleide Transversaal Elektrische modi van de planaire golfgeleiderstructuur. Deze worden numeriek bepaald.

De domein-integraalvergelijkingen-methode is toepasbaar voor zowel rechte als gebogen golfgeleiders. In het volgende kader wordt gedemonstreerd hoe het volledige ontwerp van een optische schakelaar op basis van een richtkoppeling gesimuleerd kan worden met behulp van een modale methode, bijvoorbeeld de domein-integraalvergelijkingen-methode.

De richtkoppeling als optische schakelaar

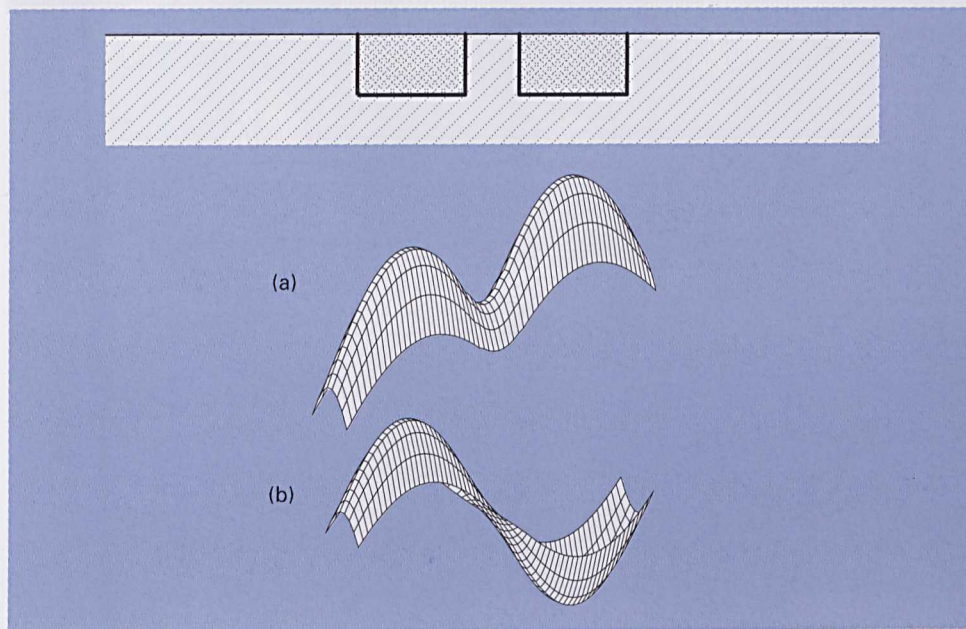
Het routeren van signalen in optische telecommunicatiesystemen vereist optische schakelaars. Hiervoor kunnen optische richtkoppelingen gebruikt worden. In figuur 3.5 is een mogelijke fysieke implementatie hiervan weergegeven. De optische richtkoppeling bestaat uit drie secties: (1) de



Figuur 3.5:
Optische schakelaar op basis van een richtkoppeling.

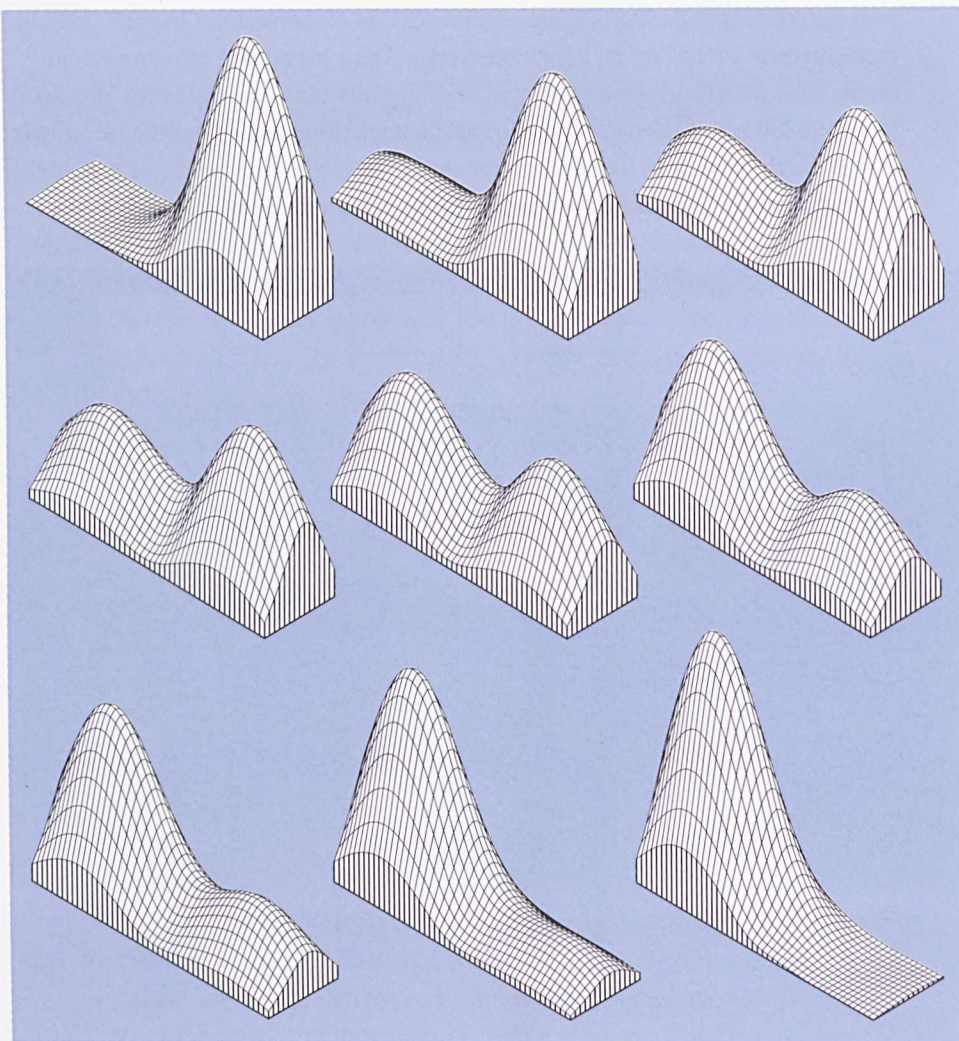
aanvoersectie, (2) de koppelingssectie en (3) de afvoersectie. Om te beginnen concentreren we ons op de koppelingssectie. Deze is zodanig ontworpen dat hierin twee modi kunnen propageren; de fundamentele en eerste orde modus. In figuur 3.6 is een dwarsdoorsnede van de koppelingssectie gegeven, te zamen met de veldverdelingen van de fundamentele en eerste orde modus. De veldverdelingen van deze modi kunnen met een modale methode worden bepaald.

Figuur 3.6:
Dwarsdoorsnede van koppelingssectie van de richtkoppeling. In deze golfgeleider kunnen twee modi propageren: de fundamentele (a) en de 1-e orde modus (b).



Aan het begin van de koppelingssectie is alle licht in kanaal I geconcentreerd. Beide modi worden aangeslagen en zijn hier met elkaar in fase, zodat de bijdragen in kanaal II elkaar opheffen. Beide modi propageren met verschillende voortplantingssnelheid door de koppelingssectie. Na het afleggen van de koppelingsafstand L zijn zij met elkaar in tegenfase en heffen de bijdragen in kanaal I elkaar op: de gehele intensiteit bevindt zich in kanaal II. Dit koppelingsproces is stapsgewijs grafisch weergegeven in figuur 3.7. Vervolgens koppelt het licht weer terug naar kanaal I, waarna het gehele proces zich zal herhalen. De lengte van de koppelingssectie wordt nu zodanig gekozen dat aan het einde de totale lichtintensiteit zich in kanaal I bevindt.

Bij afwezigheid van spanning over de elektrode wordt derhalve het inkomende signaal uit poort A gekoppeld naar poort B. Door echter spanning over de elektrode aan te brengen wordt lokaal ten gevolge van het elektro-optisch



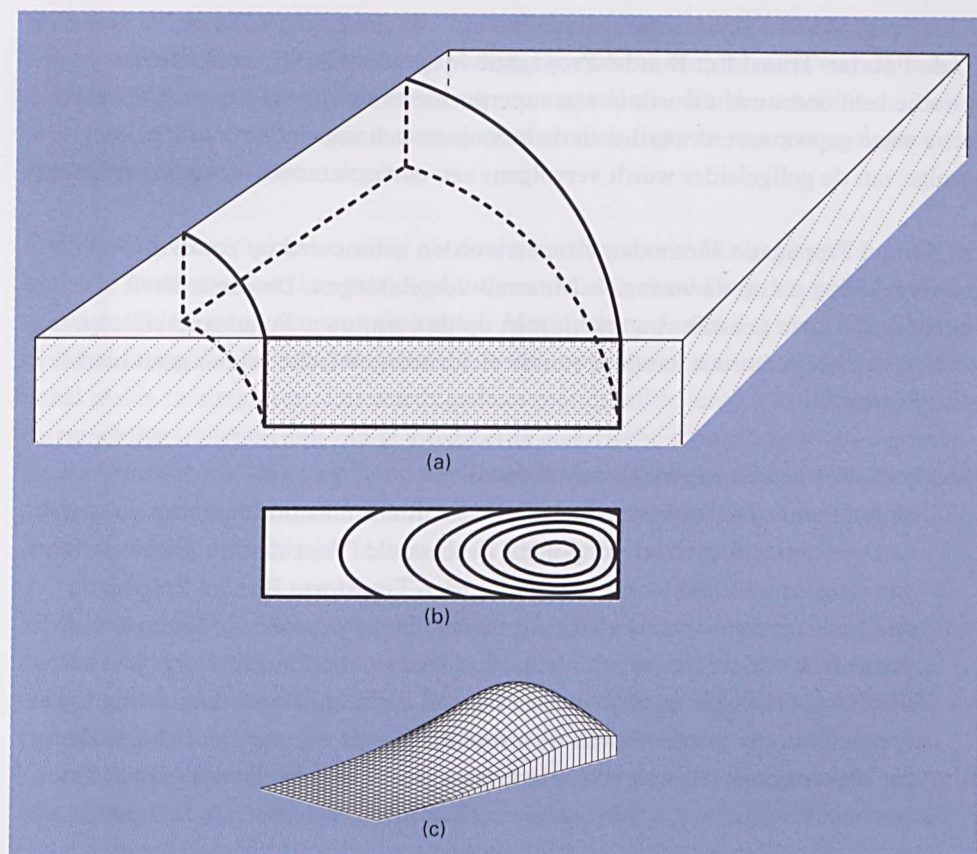
Figuur 3.7:
Overkoppeling van
lichtintensiteit tussen
kanaal I en kanaal II.

effect een brekingsindexverandering geïnduceerd. De koppelingslengte kan hiermee zodanig worden gemoduleerd dat het inkomende signaal ditmaal uitkoppelt in poort C. Hiermede is de gewenste schakelwerking verkregen.

De aan- en afvoersectie bestaan uit een aaneenschakeling van rechte en gebogen golfgeleiders. Bij de overgangen treedt verstrooiing van het optische signaal op. Om deze te minimaliseren moeten de veldprofielen van de rechte en gebogen golfgeleiders zo goed mogelijk met elkaar overeenkomen. In de gebogen golfgeleiders verschuift het veldprofiel naar de buitenzijde (figuur 3.8). Door het gebruik van verschuivingen bij de overgangen van verschillen

4. Indiumfosfide: de ultieme integratie?

Figuur 3.8:
De fundamentele modus in
een gebogen golfgeleider.
Duidelijk zichtbaar is de
verschuiving van het veld
naar de buiten zijde van de
bocht
(a) configuratie
(b) contourplaatje intensiteit
(c) hoogte plaatje intensiteit



de secties worden de veldprofielen van de modi aan beide zijden zo nauwkeurig mogelijk aan elkaar gekoppeld. De grootte van de verschuiving wordt daarbij mede bepaald door de waarde van de kromtestraal R van de gebogen golfgeleiders.

3.3 Propagatiemethoden

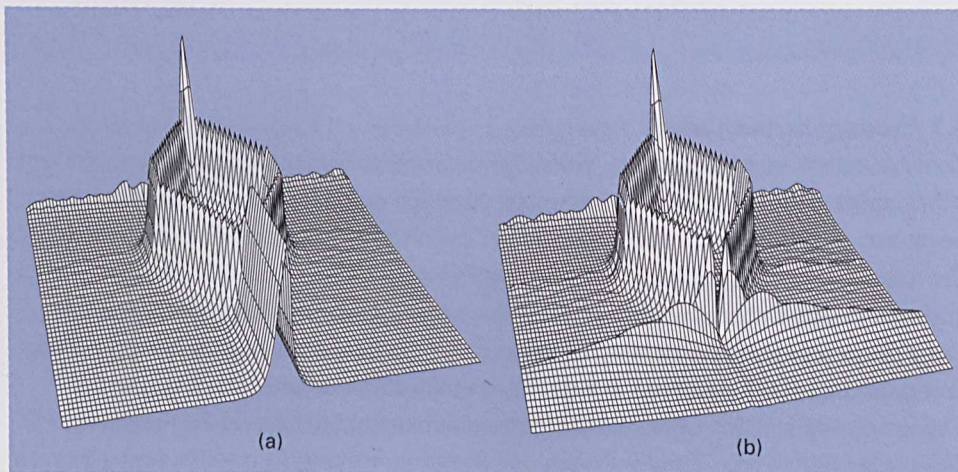
Zoals de naam reeds suggereert, wordt bij de propagatiemethoden bekeken hoe een willekeurige optische golf zich voortplant door een golfgeleiderstructuur. Aan het begin van de golfgeleider wordt hiertoe het invallende veld bekend verondersteld. Vervolgens is het mogelijk om met Maxwell's vergelijkingen het veld een stap verder in de propagatierichting te bepalen, met toepassing van enige vereenvoudigingen. Door dit proces te herhalen wordt stapsgewijs de gehele structuur doorlopen. Deze numerieke methode wordt de Bundel Propagatie Methode genoemd.

Tegenwoordig worden twee Bundel Propagatie Methoden veelvuldig toegepast: (1) de Eindige Differentie Bundel Propagatie Methode waarbij Maxwell's vergelijkingen

- rechtstreeks worden gediscretiseerd met behulp van een eindig differentieschema, en (2) de Fourier-Transform Bundel Propagatie Methode waarbij het invallende
- optische veld ontbonden wordt in een superpositie van vlakke golven, die op analytische wijze gepropageerd worden in de homogene achtergrondstructuur. Ten
- gevolge van de golfgeleider wordt vervolgens een correctieterm in rekening gebracht.
- De Bundel Propagatie Methodes kunnen worden gebaseerd op zowel de scalaire golfvergelijking als op de vectoriële Maxwell-vergelijkingen. De eerste heeft als
- voordeel een klein gebruik van rekentijden op de computer. Polarisatie-effecten ten
- gevolge van het vectoriële karakter van de elektromagnetische velden gaan hierbij echter verloren.

De Mach-Zehnder intensiteitsmodulator

In hoofdstuk 2 is reeds de Mach-Zehnder intensiteitsmodulator als voorbeeld van een actieve optische component beschouwd. Voor de numerieke simulatie van deze component wordt hier de Fourier-Transform Bundel Propagatie Methode op basis van de scalaire golfvergelijking gebruikt. In figuur 3.9 is de propagatie van de fundamentele modus door de modulator weergegeven. In 3.9a is de elektrode op de bovenste tak van de modulator onbekrachtigd. Ten gevolge van de symmetrie van de structuur zijn de signalen uit beide takken bij het terugmengen met elkaar in fase en treedt er geen modulatie op. Door het aanbrengen van de juiste spanning kan juist tegenfase van de signalen bij opmenging bewerkstelligd worden, waardoor uitdoving van het signaal optreedt (3.9b). Amplitudemodulatie van het inkomende signaal is hiermee bereikt.



Figuur 3.9:
Simulatie van een
Mach-Zehnder
intensiteitsmodulator met
behulp van de bundel-
propagatie-methode:
zonder bekrachtiging van
de elektrode (a)
en met bekrachtiging van
de elektrode (b).

4. Indiumfosfide: de ultieme integratie?

Stelt u zich voor dat er een glasvezel naar uw huis is doorgetrokken. Nieuwe diensten worden u bij de vleet aangeboden. De enorme bandbreedte van de vezel geeft een nieuwe dimensie aan het begrip communicatie. En het mooie is dat de prijs van het minuscule kastje waarin de glasvezel eindigt, en waaraan u al uw apparaten kunt aansluiten, erg laag is.

Dit lijkt een verre toekomst, maar als de doelstellingen van het geïntegreerd-optische onderzoek aan het materiaal indiumfosfide gehaald worden, komt de verwerkelijking ervan een stuk dichterbij. Met dit materiaal is het namelijk in principe mogelijk alle componenten die in een optische ontvanger nodig zijn op een enkel plakje te integreren. Dit wordt gedaan met dezelfde technieken die tot een stormachtige ontwikkeling van geïntegreerde elektrische schakelingen, en daarmee tot de opkomst van de computers, hebben geleid. Een soortgelijke revolutie op het gebied van (tele)communicatie wordt mogelijk door ontwikkeling van de mogelijkheden van indiumfosfide (of InP, zoals de chemische formule luidt).

PTT Research doet vanaf 1990 onderzoek aan geïntegreerd-optische componenten op basis van het halfgeleidermateriaal indiumfosfide. In dit hoofdstuk worden de onderzoeksinspanningen van PTT Research op het gebied van de indiumfosfide-technologie beschreven. Paragraaf 4.1 beschrijft de specifieke eigenschappen van het materiaal indiumfosfide en het belang ervan voor de toekomstige telecommunicatienetwerken. PTT Research neemt deel aan het onderzoek in het kader van een groot nationaal onderzoeksprogramma, een IOP-project, beschreven in paragraaf 4.2. De componenten die onderzocht worden, zijn beschreven in paragraaf 4.3. De laatste paragraaf is gewijd aan de technologie die nodig is voor de realisatie van deze componenten.

4.1 Waarom indiumfosfide?

Om te begrijpen waarom indiumfosfide zo interessant is, is het nodig te kijken naar de verschillende typen componenten die met dit materiaal te realiseren zijn.

Allereerst zijn dat de passieve, volledig optische componenten. Het materiaal InP is transparant voor licht met golflengten groter dan $0,92 \mu\text{m}$. Dit maakt het geschikt voor de golflengten die in de optische telecommunicatie nu vrijwel uitsluitend gebruikt worden: $1,3$ en $1,5 \mu\text{m}$. Bovendien zijn op een plakje InP lagen te groeien van het vier-componenten mengsel indium-gallium-arsen-fosfor, in het vervolg aan te duiden met zijn chemische formule InGaAsP of met de term 'quaternair materiaal'. Deze lagen hebben een variabele samenstelling, aangegeven met $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$. De fracties "x" en "y" geven hierin aan hoeveel gallium en

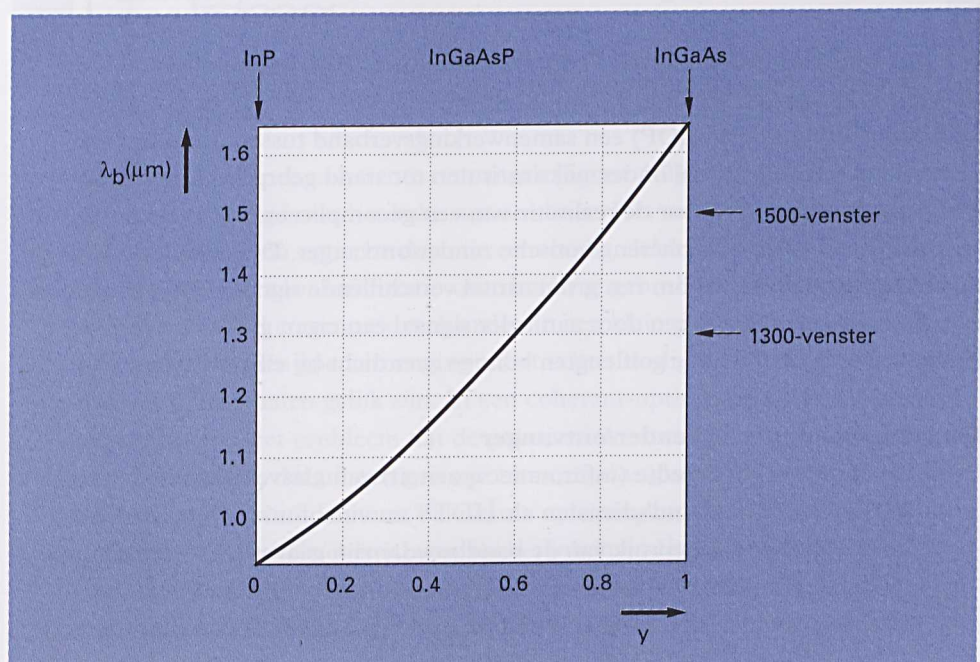
- arseen er in het mengsel aanwezig zijn. Deze fracties zijn echter niet geheel vrij te kiezen; om een laag van goede kwaliteit op een InP-plakje te kunnen groeien is het
- nodig dat de roosterconstante van het mengsel gelijk is aan die van het InP. Dit wordt bereikt door een experimenteel bepaalde relatie tussen "x" en "y" aan te
- houden. Het quaternaire materiaal kan dus met een van deze twee parameters gekarakteriseerd worden. De brekingsindex van de quaternaire materialen neemt
- toe met "x" en "y", zodat een planaire golfgeleider ontstaat door het groeien van een laag op InP (waarvoor immers $x = y = 0!$). In deze planaire golfgeleider kan
- vervolgens een kanaalgolfgeleider gemaakt worden door er een dijk in te etsen. Hoe dat in z'n werk gaat wordt in paragraaf 4.4 uitgelegd. Met deze passieve, volledig optische, componenten zijn al een aantal belangrijke functies op de geïntegreerde optische chip te realiseren. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk lichtsignalen te transporteren, te mengen, te splitsen en de polarisatie ervan te bewerken. Al deze functies kunnen nodig zijn in een optische ontvanger die een optimaal gebruik van de bandbreedte van een glasvezel maakt.

Het tweede type componenten dat met behulp van InP gemaakt kan worden zijn de actieve, 'elektro-optische', componenten. Dit zijn de golfgeleider-componenten waarin de lichtgolven gestuurd worden met elektrische stromen en spanningen via elektro-optische effecten. Evenals voor andere materialen is hiervoor een breed scala aan natuurkundige effecten beschikbaar, waaronder het Pockels- (zie paragraaf 5.2) en het Kerr-effect. De sterkste elektro-optische effecten echter zijn gebaseerd op de injectie van elektronen (en gaten) in de golfgeleider. Dit proces is specifiek voor halfgeleidermaterialen. Hiermee is het mogelijk zeer efficiënte schakelaars te maken, met afmetingen die veel kleiner zijn dan een millimeter. Deze schakelaars kunnen gebruikt worden om lichtsignalen langs gewenste routes te sturen, of juist om delen van een schakeling of netwerk te isoleren.

De volgende groep componenten die op basis van InP gerealiseerd kan worden zijn de opto-elektronische componenten, die de omzettingen van elektrische signalen in lichtsignalen en vice versa verrichten. Het gaat hierbij om detectoren, in de vorm van fotodiodes, en bronnen, waarvoor voornamelijk lasers gebruikt worden. Deze componenten zijn essentieel voor elk optisch communicatiesysteem, aangezien de te transporteren informatie door elektronische apparatuur gegenereerd en geaccepteerd wordt. Dat deze componenten op InP te realiseren zijn, heeft te maken met een andere materiaaleigenschap van de hierboven geïntroduceerde quaternaire mengsels. De golfengte waarboven deze mengsels transparant worden neemt namelijk, evenals de brekingsindex, toe met de fractie "y" (en "x"). Dit komt tot uitdrukking in de 'bandafstand', die de energie aangeeft die nodig is om in de

halfgeleider een elektron vanuit een lage energietoestand (de valentieband) naar een hoger energieniveau (de geleidingsband) te brengen. Als deze energie geleverd kan worden door een foton met een bepaalde golflengte is het materiaal absorberend, in het andere geval transparant. In figuur 4.1 is aangegeven hoe deze energie, omgezet in een golflengte, afhangt van de parameter "y". Te zien is dat deze quaternaire materialen transparant of absorberend gemaakt kunnen worden voor licht met 1,3 en/of 1,5 μm golflengte. Voor voldoende grote "y"-waarden zullen binnenkomende fotonen de elektronen naar de geleidingsband over doen gaan. Daardoor ontstaat een stroom die vervolgens gemeten kan worden en op die manier de detectie van de lichtsignalen mogelijk maakt. Iets gecompliceerder is het beeld bij de lasers. In dat geval worden elektronen (en hun halfgeleider-broertjes, de 'gaten') in het quaternaire materiaal gebracht. Deze elektronen vallen vanuit de geleidingsband terug naar de valentieband en staan daarbij hun energie af in de vorm van een foton, die dan ook een golflengte heeft die overeenkomt met de bandafstand. Door nu reflecterende elementen in de golfgeleider aan te brengen ontstaat een trilholve waarin gestimuleerde emissie van deze fotonen kan plaatsvinden. Daarmee is de gewenste laser een feit. De lasers die in de optische telecommunicatie gebruikt worden zijn gebaseerd op InP/InGaAsP. Dit betekent dat er onafhankelijk van de verdere ontwikkeling van de geïntegreerde optica al een industriële basis voor het realiseren van componenten op InP opgebouwd wordt.

Figuur 4.1:
De met de bandafstand
overeenkomende golflengte
als functie van de
materiaalparameter "y"
voor $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$.



- Tenslotte kunnen elektronische componenten, zoals transistors, geleiders en weerstanden op basis van InP gerealiseerd worden. Hierbij heeft InP, evenals andere III-V halfgeleidermaterialen zoals bijvoorbeeld galliumarsenide (GaAs), een fundamenteel voordeel ten opzichte van het standaardmateriaal silicium. De elektronenmobilititeit is meer dan 5 keer zo hoog in InP en GaAs, zodat transistors, de basiselementen van elke geïntegreerd-elektrische schakeling, vele malen sneller zijn dan die op silicium. Deze eigenschap heeft ertoe geleid dat in sommige supercomputers geen silicium-chips meer worden gebruikt, maar chips op basis van III-V halfgeleiders (i.c. GaAs). Ook hiervoor is een belangrijke industriële activiteit in de wereld aanwezig.

Samenvattend ontstaat bij InP/InGaAsP een beeld van een materiaalsysteem waarmee alle benodigde componenten in een optische ontvanger (en zender) te realiseren zijn. Voor een aantal toepassingen (snelle elektronica, lasers, en de hier niet behandelde zonnecellen) is de ontwikkeling ver gevorderd, zelf zodanig dat commerciële producten gemaakt worden. Dit geeft aan dat er reeds een industriële en technologische basis bestaat voor de realisatie van verschillende soorten componenten op een plak. De integratie staat echter nog in de kinderschoenen. Op veel plaatsen in de wereld wordt onderzoek gedaan naar de mogelijkheden ervan. Ook in Nederland is hiervoor een belangrijke activiteit opgestart. In de vorm van een "Innovatief Onderzoek Programma" is ook PTT Research hierbij betrokken.

4.2 Het Innovatief Onderzoek Programma binnen PTT Research

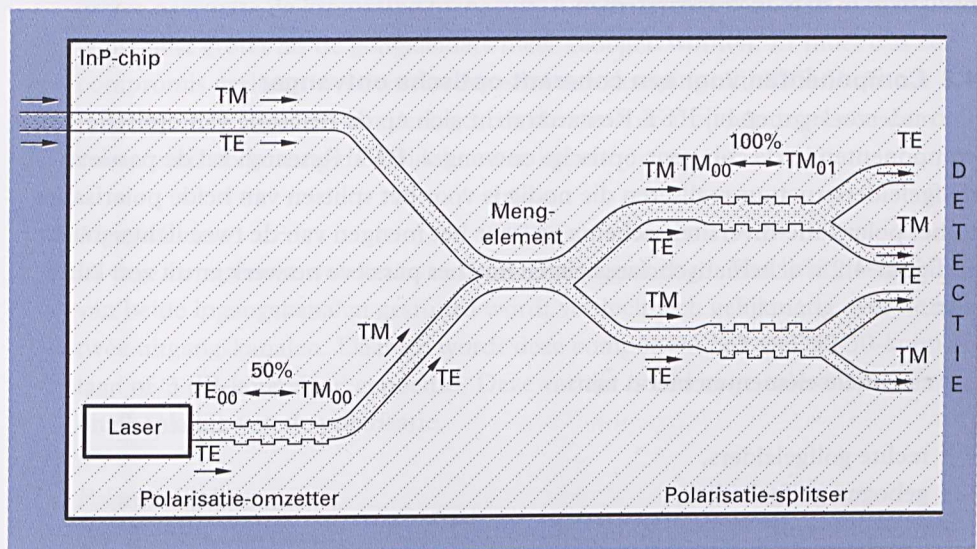
Via het ministerie van Economische Zaken is door middel van een "Innovatief Onderzoek Programma" (IOP) een samenwerkingsverband tussen de technische universiteiten en een aantal onderzoeksinstituten tot stand gebracht. Het samenwerkingsverband streeft naar de realisatie van een gecompliceerde chip op basis van InP, die functioneert als coherent-optische zender/ontvanger. Deze zender/ontvanger moet het mogelijk maken om een groot aantal verschillende signalen gelijktijdig over een glasvezel te transporteren door aan ieder signaal een eigen golflengte toe te kennen. Deze verschillende golflengten kunnen zeer dicht bij elkaar liggen.

De coherent-optische zender/ontvanger

De enorme bandbreedte (informatiecapaciteit) van glasvezels geeft de mogelijkheid om 'breedband'-diensten als HDTV en videofonie aan te bieden. Voor het optimaal gebruik van de bandbreedte zijn geavanceerde communicatiesystemen vereist. Met name de coherent-optische technieken komen hierbij in aanmerking. Derhalve zijn deze technieken bij PTT Research reeds in het project COSNET uitvoerig bestudeerd.

Coherente systemen vereisen gecompliceerde zenders en ontvangers, die bij de abonnee in huis geplaatst moeten worden. Het opbouwen van deze zenders en ontvangers met behulp van losse standaardcomponenten ('bulk'-componenten) leidt tot omvangrijke en dure apparaten met twijfelachtige betrouwbaarheid. Om de mogelijkheden van geavanceerde communicatiesystemen economisch realiseerbaar te maken moet gezocht worden naar geïntegreerde componenten. Het meest optimaal daarvoor is een geïntegreerde zender/-ontvanger.

Figuur 4.2:
Het "Polarisatie-Diversiteit"-netwerk dat in een geïntegreerde coherent-optische ontvanger aanwezig is.



Bij de te ontwerpen coherente ontvanger (figuur 4.2) wordt het licht uit een glasvezel gemengd met het licht van een laser. Het mengsignaal bevat lage frequenties, die na optische detectie eenvoudig elektrisch te filteren zijn. Door dit mengsignaal voor informatie-overdracht te gebruiken is het mogelijk een zeer groot aantal communicatiekanalen in een klein golflengtegebied te plaatsen. Voor een goede menging is het echter nodig dat de polarisaties van de twee lichtsignalen gelijk zijn. In een coherent-optisch detectiesysteem stuit men echter op het probleem dat de polarisatietoestand van het informatie bevattende licht, dat uit een gewone monomodus glasvezel komt, kan fluctueren. Een van de meest belovende oplossingen voor dit probleem is het polarisatie-diversiteitschema, waarbij het inkomende lichtsignaal gesplitst wordt in twee bijdragen met onderling loodrechte polarisaties. Deze bijdragen worden vervolgens apart gedetecteerd en verwerkt.

- PTT Research neemt aan het IOP deel om dit onderzoek mede te sturen en te stimuleren. Door zelf componenten te ontwerpen en te maken geeft PTT Research
- mede vorm aan de ontwikkelingen op het gebied van geïntegreerde optische componenten voor de telecommunicatie in Nederland. De hierbij opgedane kennis
- is van belang voor toepassingen van geïntegreerd-optische componenten in het toekomstige glasvezel-netwerk, met name in het aansluitnet. Daarenboven kunnen
- de door PTT verworven octrooien op het gebied van indiumfosfide-componenten en hun fabricagetechnieken zich in onderhandelingen met leveranciers in belangrijke economische voordelen vertalen. Tot slot zijn de gemaakte componenten
- bruikbaar in demonstratiesystemen.

4.3 Componenten voor een coherent-optische ontvanger

De onderzoeksgroep bij PTT Research richt zich op de realisatie van optische componenten in de coherent-optische ontvanger. PTT Research zal de passieve golfgeleiderstructuur realiseren die nodig is voor het splitsen van beide polarisaties in het polarisatie-diversiteitsschema en voor het mengen van de twee lichtsignalen. In figuur 4.2 is schematisch aangegeven hoe het passieve netwerk er uit zou kunnen zien.

De essentiële elementen hierin zijn:

- rechte golfgeleiders,
- gebogen golfgeleiders,
- meng-element,
- polarisatie-splitser,
- polarisatie-omzetter.

Bij de door PTT gekozen concepten wordt gestreefd naar een realisatie op basis van een relatief eenvoudige en niet-kritische technologie. Dat betekent bijvoorbeeld dat gestreefd wordt naar fabricage-tolerante oplossingen.

Componenten in de coherent optische zender/ontvanger

Rechte golfgeleiders

Voor de golfgeleiders is een eenvoudig type gekozen: de dijkgolfgeleider. Deze is met een relatief simpele technologie te realiseren. Het allereenvoudigst zou een direct in de quaternaire laag gemaakte dijk zijn. Het blijkt echter dat de kwaliteit van dergelijke golfgeleiders niet voldoende is: de bewerking van de plak veroorzaakt lokale defecten, ruwheden in de wanden van de dijk etcetera. Deze storingen leiden tot hoge dempingen wanneer zij zich dicht bij de kern

van de golfgeleider (dus bij de quaternaire laag) bevinden. Daarom is gekozen voor een dijk gemaakt in deklaag van InP op de quaternaire laag. Met dit type golfgeleider zijn dempingen van minder dan 1 dB/cm mogelijk.

Gebogen golfgeleiders

De verschillende componenten op een plakje worden met elkaar verbonden door golfgeleiders. Om een goed gebruik van de aanwezige ruimte te maken is het vaak nodig deze golfgeleiders gekromd te maken. De kromming geeft echter een verstoring van de lichtgolf, en leidt tot dempingen. Deze wordt groter naarmate de kromming toeneemt. Aan de andere kant is de ruimte-winst juist groter als de golfgeleiders meer gebogen worden. Er moet dus een compromis gesloten worden tussen ruimte en demping. Bij PTT Research probeert men de vorm van deze gekromde structuren zo aan te passen dat dit compromis zo gunstig mogelijk komt te liggen.

Meng-element

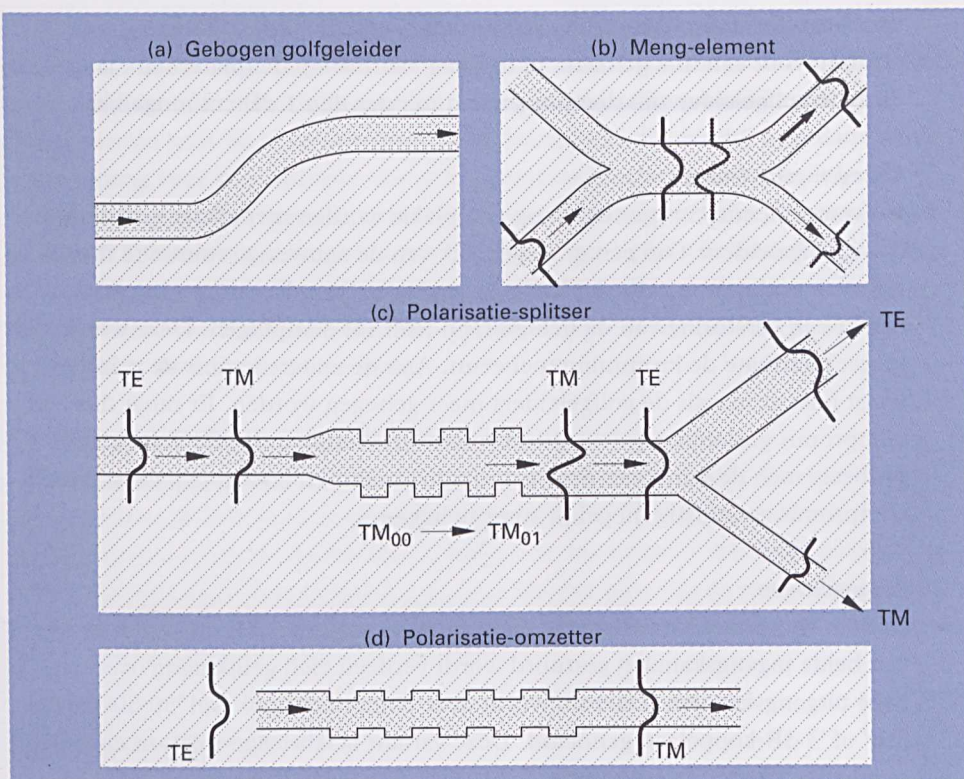
In deze component worden twee lichtsignalen gemengd. Het licht dat in één van beide ingangskanalen gestuurd wordt verdeelt zich gelijkmatig over de twee uitgangskanalen. Daarom wordt deze component ook wel '50/50-koppelaar' of '3 dB-koppelaar' genoemd. Deze variant is fabricage-tolerant en werkt onafhankelijk van de polarisatie.

Polarisatiesplitser

Om de twee polarisaties, TE en TM, onafhankelijk te detecteren is het nodig ze te scheiden, dit gebeurt m.b.v. een polarisatiesplitser. Hierin bevindt zich een periodieke blokkenstructuur, waarin het licht dat zich in de nulde orde modus van de TM-polarisatie bevindt, omgezet wordt naar een eerste orde modus. Met behulp van een Y-splitser met ongelijke takken, die werkt als modus-splitser, wordt deze eerste orde modus vervolgens afgesplitst als nulde orde modus van een uitgangskanaal.

Polarisatie-omzetter

De laser, die uiteindelijk ook op de plak geïntegreerd wordt, zendt licht uit in de TE-polarisatie. Om ook een mengsignaal voor de via de glasvezel binnenkomende TM-polarisatie te krijgen is het nodig dat een deel van het laserlicht naar TM wordt omgezet. Daartoe wordt een polarisatie-omzetter ontwikkeld. Deze bevat evenals de polarisatie-splitser een periodieke blokkenstructuur, die er echter nu op gericht is de lichtgolf zodanig te verstoren dat 50% van het licht naar de andere polarisatie overgekoppeld wordt.

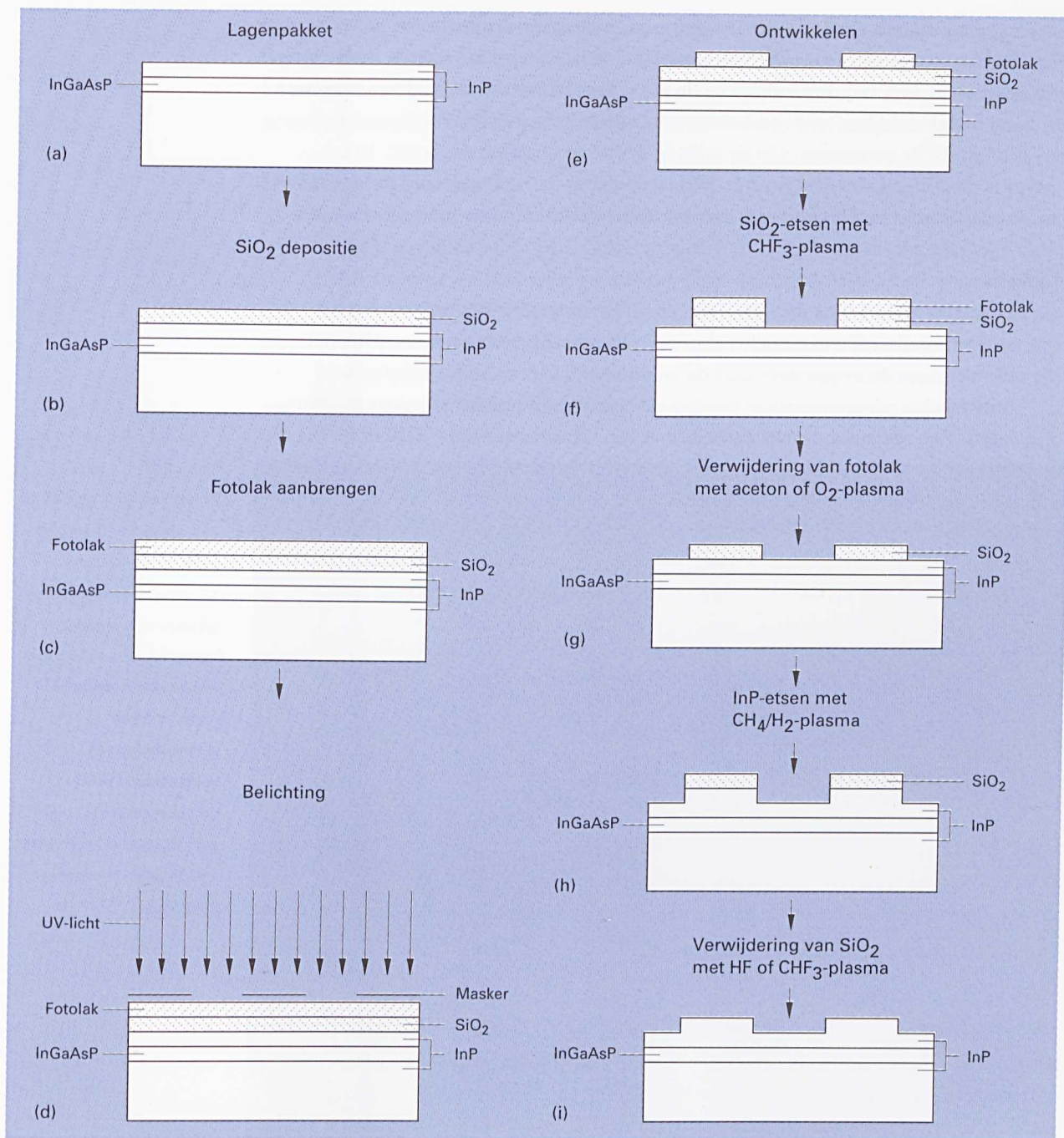


In de volgende paragraaf wordt besproken hoe de verschillende golfgeleiders en componenten op basis van InP gerealiseerd kunnen worden.

4.4 Realisatie van golfgeleiders en componenten

De realisatie (figuur 4.3) van een golfgeleidercomponent op InP begint met het specificeren en laten maken van een lagenpakket. Zo'n pakket bestaat uit een InP-plak waarop met geavanceerde groeitechnieken een quaternaire laag (dikte ongeveer $0,5 \mu\text{m}$) en een deklaag van InP (eveneens ongeveer $0,5 \mu\text{m}$ dik) gemaakt worden. De groeitechnieken, met afkortingen als MOVPE, MBE, CBE etc., zijn de laatste jaren ontwikkeld en maken het mogelijk lagen met een goede optische kwaliteit te maken (d.w.z. met lage propagatiedemping voor de lichtgolven). Deze lagenpakketten worden vervaardigd door andere instituten (o.a. RU Gent, TU Eindhoven) of door gespecialiseerde bedrijven.

Op het lagenpakket wordt een kwartslaag (SiO_2) van ongeveer 70 nanometer dikte aangebracht. Dit gebeurt bij de TU Delft met een sputtertechniek. Op de kwartslaag wordt vervolgens een lichtgevoelige lak aangebracht. Hiertoe wordt het plakje



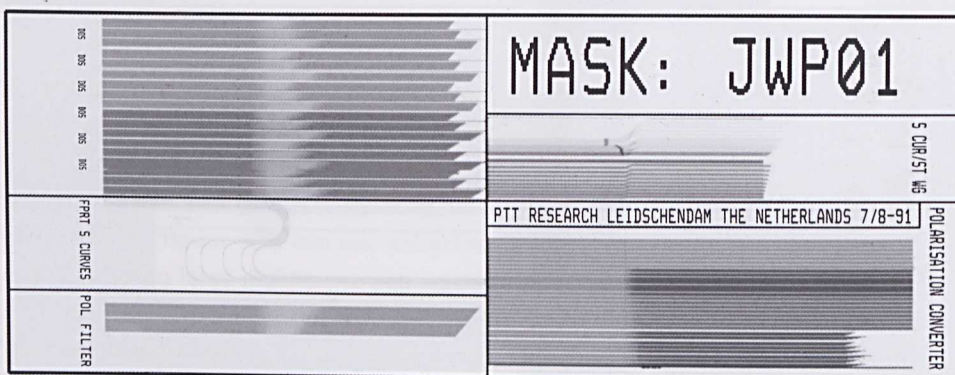
Figuur 4.3

Overzicht van de volledige procesgang voor de realisatie van dijkgolfsgeleiders.

- op een soort draaimolen geplaatst (de 'spinner') met enige druppels van deze lak erop. Door vervolgens een snelle draaiing plaats te laten vinden verdeelt de lak zich vrijwel uniform over het oppervlak van de plak. De laklaag die zo ontstaat heeft ook een goed bepaalde dikte, wat van belang is voor de hierop volgende zogenaamde
- foto-lithografische processen. Op de laklaag wordt een masker geplaatst. In het masker is de golfgeleiderstructuur gedefinieerd die in het InP gemaakt moet worden. De realisatie van dit masker is een onmisbare schakel in de hele procesketen.

- **Maskers**

De maskers die bij de fabricage van de golfgeleider-componenten gebruikt worden, spelen een essentiële rol in de realisatie. Zij verbinden namelijk het ontwerp van de component met de technologie. Met behulp van speciaal ontwikkelde programmatuur worden de componenten ontworpen en gesimuleerd. Een afgerond ontwerp wordt met een tekenprogramma 'SIEGRAPH', dat op een werkstation draait, omgezet in een databestand. Een dergelijk bestand kan door een maskermachine gelezen worden, waarna het patroon met een elektronenbundel in een lak geschreven wordt. Dit patroon wordt daarna in een onderliggende chroomlaag geëtsd. De fabricage van de maskers wordt bij DIMES in Delft verzorgd. Op de foto zijn een aantal maskerpatronen te zien.



Figuur 4.4
Voorbeeld van een masker zoals dat bij de vervaardiging van golfgeleiderstructuren gebruikt wordt. In werkelijkheid is het formaat van dit patroon ongeveer 6 x 2,5 cm.

Door het masker wordt de lichtgevoelige laklaag belicht met een UV-lamp. De belichte en de onbelichte delen hebben een verschillende oplosbaarheid in een geschikt oplosmiddel: de ontwikkelaar. Door onderdomping in de ontwikkelaar wordt dus het patroon van het masker overgebracht in de laklaag. Vervolgens wordt het plakje met het lakpatroon in een etsapparaat gebracht; de Reactieve Ionen Etser (RIE). Met de RIE wordt de kwartslaag weggeëtsd op de plaatsen waar zich geen lak bevindt. Het in de lak aanwezige patroon is nu overgebracht op de kwartslaag. De

5. Polymeren

lichtgevoelige lak wordt verwijderd, waarna dijken in de InP-deklaag van het lagenpakket gemaakt worden met de RIE, door het materiaal dat niet door het kwartspatruon bedekt is weg te etsen tot een van te voren gespecificeerde diepte. De gewenste kanaalgolfgeleider-structuur is daarmee aangebracht op het InP.

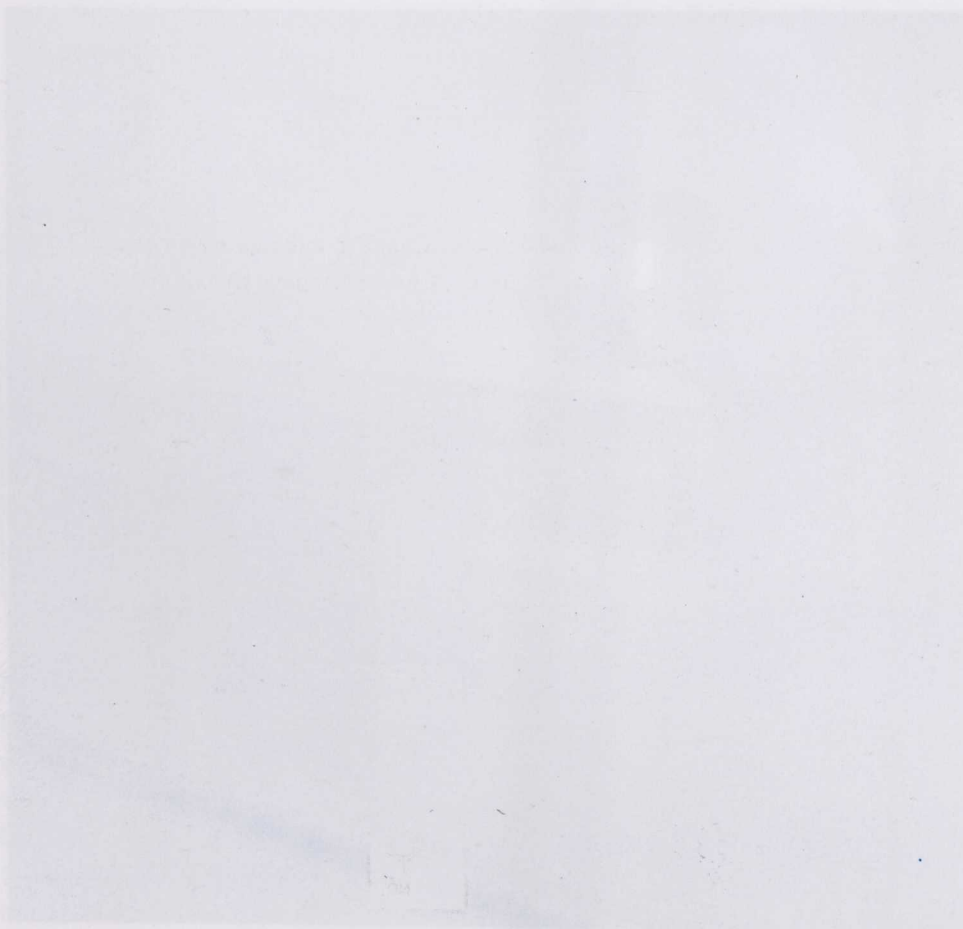
De reactieve ionen-etser

De ideale vorm van de dijken wordt bereikt met rechte wanden. Als zij scheef staan is namelijk hun oppervlakte groter, wat leidt tot extra verstrooiing van het licht in de golfgeleider, en dus tot extra demping. Een ideale vorm is te krijgen met een Reactieve Ionen Etser (RIE, figuur 4.5). Hierin worden in een sterk elektrisch veld gasmoleculen in ionen opgebroken (hierdoor ontstaat een plasma). De ionen worden door het veld in de richting van het plakje versneld en reageren chemisch met het oppervlak.

Figuur 4.5
De Reactieve Ionen Etser in de Stofarme Ruimte. Een substraat wordt in de etskamer geplaatst. Dit apparaat kan volledig automatisch een serie etsstappen uitvoeren.



- Door de aanwezigheid van het veld is de richting van de ets loodrecht op de plak, zodat er rechte wanden ontstaan. Doordat het een chemisch etsproces is, kunnen materialen selectief verwijderd worden, terwijl andere materialen aanwezig blijven. Zo worden in de bij PTT Research aanwezige RIE, van het Franse bedrijf NEXTRAL, InP-plakken geëtsd met een methaan/waterstofmengsel. De patronen op de plak, die in kwarts of fotolak gemaakt zijn, blijven daarbij onaangetast.
- Met een freon kan echter juist kwarts geëtsd worden, terwijl fotolak en InP onaangetast blijven. Tenslotte kan met zuurstof ook fotolak selectief verwijderd worden.



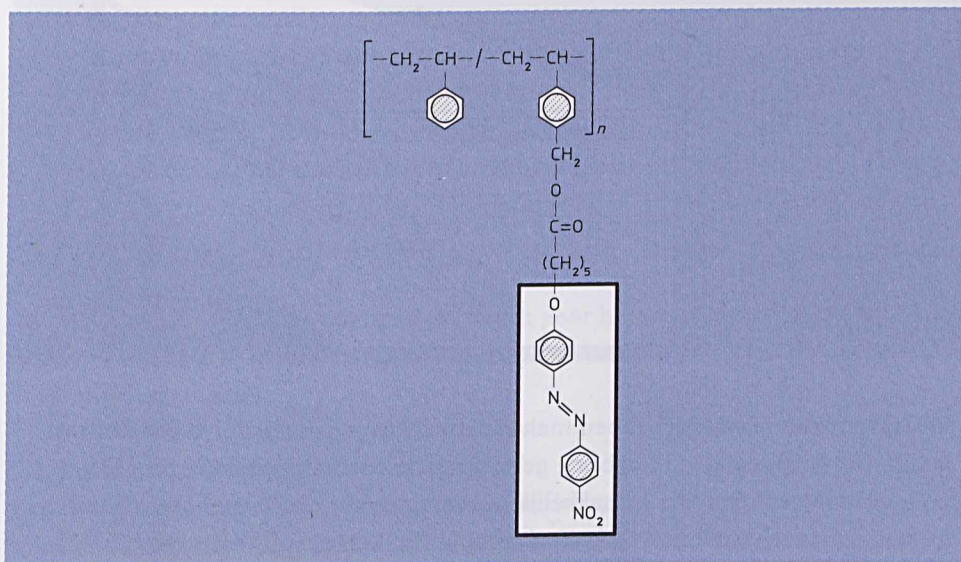
5. Polymeren

In geïntegreerde optische schakelaars en modulatoren wordt meestal het lineaire elektro-optische effect (Pockels-effect) gebruikt om een brekingsindexverandering op te wekken. Dit komt omdat het effect zeer snel en gemakkelijk toepasbaar is. Het benodigde elektrische veld in de optische golfgeleiders wordt gegenereerd met opgedampte elektrodeparen aan weerszijden van die golfgeleiders. Tot nu toe wordt nagenoeg uitsluitend het materiaal lithiumniobaat toegepast, omdat dit materiaal een relatief sterk elektro-optisch effect heeft. Eenvoudige lithiumniobaat-schakelaars en -modulatoren zijn reeds commercieel verkrijgbaar. Sinds een aantal jaren staan echter ook elektro-optische polymeren sterk in de belangstelling voor toepassingen in geïntegreerde optische componenten vanwege een aantal veelbelovende eigenschappen. Dit was voor de EG de reden om in 1986 in het kader van RACE (Research in Advanced Communications technologies in Europe) het project 1019 'Polymeric Optical Switches' te steunen. In dit project maakte het Nederlandse chemieconcern AKZO de polymeren, terwijl, naast PTT Research, ook instituten en bedrijven in Engeland, Frankrijk en België de vervaardiging van componenten uit dat polymeer op zich hadden genomen. Sinds het begin van 1993 werkt PTT Research met de Franse polymeerfabrikant Flamel Technologies en het research-laboratorium van de Britse PTT samen in een Eureka-project.

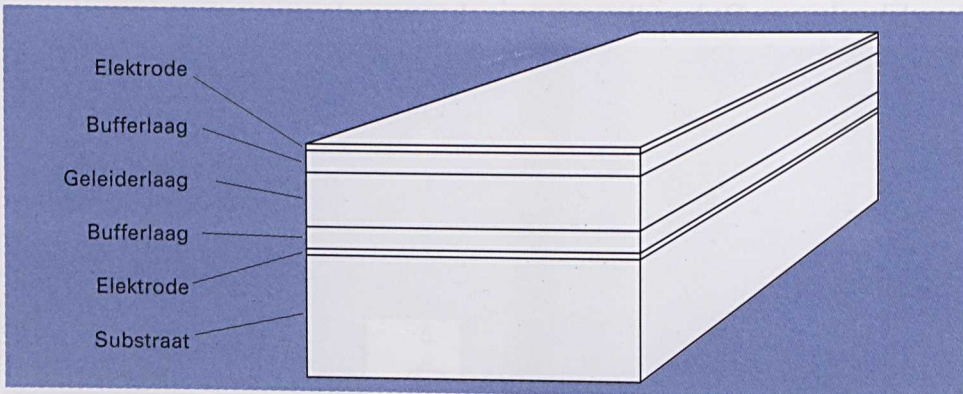
5.1 Waarom polymeren?

De meest veelbelovende elektro-optische polymeren zijn zijketen-polymeren. Deze bestaan uit een passieve polymeer hoofdketen, waaraan actieve moleculen als zijketens zijn vastgemaakt. Figuur 5.1 toont het basiselement uit de keten van een dergelijk polymeer. De hoofdketen is een polystyreen; de actieve groep (met de

Figuur 5.1
Zijketen-polymeer op basis
van polystyreen
(hoofdketen) met een azo
kleurstof in de zijketen.



- dubbele benzeenringen) is hier een zogenaamde azo kleurstof. De aantrekkelijkheid van polymeren wordt in de volgende punten besproken.
-
- De polymeren komen als poeder uit de synthese. Ze zijn in bepaalde organische vloeistoffen op te lossen en kunnen dan gefiltreerd worden. Lichtgeleidende lagen met een dikte van enkele microns kunnen dan met eenvoudige spin- of dip technieken op bijna elk gewenst substraat aangebracht worden. Daarbij is er geen principiële beperking aan de grootte van het te bedekken substraat. De polymeertechnologie is hierdoor veel eenvoudiger dan de technologie voor InP. Door beperkingen in de complexe kristalgroeitechnieken kunnen slechts plakjes met beperkte afmetingen (tot 3 inch) gerealiseerd worden. Voor het realiseren van componenten met een lage kostprijs is de polymeertechnologie dus bij uitstek geschikt.
- De organische synthese maakt het mogelijk om allerlei variaties in de polymeren aan te brengen (molecular engineering). Een belangrijke variant is een iets in brekingindex verlaagd polymeer. Een meerlagenpakket, bestaande uit een lichtgeleidende elektro-optische polymeerlaag tussen lagen van een dergelijke variant, kan op substraten met een opgedampte metaallaag worden aangebracht en een tweede metaallaag kan op dit pakket worden opgedampt. De lage-indexlagen fungeren als optische bufferlagen voor de lichtgeleidende laag (figuur 5.2). In de lichtgeleidende laag kan transmissie plaatsvinden zonder absorptie in het metaal.



Figuur 5.2
Opbouw lagenpakket met elektro-optisch polymeer.

- De bovenstaande eigenschappen maken een elektro-optische polymeer aantrekkelijk voor toepassingen in hybride geïntegreerde optische schakelingen. De polymeerlaag kan immers gemakkelijk gecombineerd worden met optische of elektronische schakelingen op halfgeleidende (Si, GaAs, InP) substraten.

- De verwachting was dat er polymeren gesynthetiseerd zouden kunnen worden, die veel grotere elektro-optische effecten zouden hebben dan lithiumniobaat. In de beginperiode (tijdens het RACE-project) van het onderzoek aan elektro-optische polymeren voor toepassingen in glasvezelcommunicatiesystemen werd dan ook gedacht dat deze polymeren vooral toegepast zouden worden in planaire elektro-optische schakelaars, die gebruik maken van de grote elektro-optische effecten. Dit zou leiden tot de realisatie van componenten met aantrekkelijke eigenschappen. In een relatief korte tijd werd er in het RACE-project veel vooruitgang geboekt. PTT Research kon als eerste ter wereld een rij van fasemodulatoren maken met een elektro-optische activiteit die even groot was als in lithiumniobaat. Dit was de hoogste activiteit ooit gemeten in polymeren. Het bleek echter dat dit resultaat niet gemakkelijk te verbeteren was. Tot op heden hebben de beste polymeer componenten elektro-optische coëfficiënten die nauwelijks uitstijgen boven de coëfficiënt in lithiumniobaat. Een verbetering is alleen te verwachten als er polymeren gesynthetiseerd kunnen worden met moleculen die een hogere activiteit hebben dan die van de huidige generatie actieve moleculen.

- Desondanks blijven elektro-optische polymeren attractief voor toepassingen in glasvezelsystemen. Dit komt omdat hun diëlektrische eigenschappen weinig veranderen in het domein van microgolven tot optische golven. Dit komt omdat deze eigenschappen hoofdzakelijk door (snelle) elektronen bepaald worden. Een elektrisch signaal loopt daardoor met dezelfde snelheid over een elektrode op een polymeerlaag als een optische signaal door de lichtgeleiders in het polymeer. Hierdoor kunnen in een elektro-optische polymeercomponent snelle elektrische stuursignalen, die in de vorm van microgolven door een (stripline) elektrode-structuur getransporteerd worden, steeds in fase blijven lopen met de optische signalen in de lichtgeleiders. De bandbreedte (snelheid) van de component wordt daardoor zeer groot (vele tientallen GHz). Dit effect is niet aanwezig in lithiumniobaat als gevolg van een sterke ionische bijdrage aan de diëlektrische eigenschappen bij microgolffrequenties. Dit beperkt de bandbreedte in lithiumniobaat-componenten tot ongeveer 10 GHz.

Het technologische proces dat gebruikt wordt voor het vervaardigen van van kanaal-golfgeleider-structuren in de polymeer lagenpakketten wordt toegelicht in de volgende paragraaf.

5.2 Polymeertechnologie

Een polymeer lagenpakket zoals beschreven in de vorige paragraaf wordt met een spin- of diptechniek vanuit de gefiltreerde oplossingen op de substraten aange-

- bracht. Het polymeer vertoont dan nog geen (macroscopisch) elektro-optisch effect. Door de willekeurige oriëntatie die de actieve moleculen hebben, worden alle
- bijdragen van moleculen aan een brekingsindexverandering precies gecompenseerd door de bijdragen van tegengesteld gerichte moleculen. Hierin kan verandering
- gebracht worden door de willekeurig georiënteerde actieve moleculen in een min of meer gelijke oriëntatie gebracht te worden: het zogenaamde polen.

Polen

- Het polen wordt gedaan door het polymeer te verhitten om van zijn glasfase in zijn rubberfase (bij 100 - 200°C) te komen. In die toestand kunnen de actieve moleculen, via hun dipoolmoment, in een elektrisch veld (met de opgedampde elektroden) gericht worden. Door af te koelen in dit veld wordt de gerichte structuur 'ingevroren'. De mate waarin de actieve moleculen gericht zijn, bepaalt de sterkte van het elektro-optisch effect in de laag. Daarom gebruiken we veldsterktes tot wel 200 V per micron. Deze waarden liggen dicht bij die waarbij doorslag in het materiaal optreedt. Als er zich onzuiverheden, bijvoorbeeld stofdeeltjes, in de lagen bevinden zal dit al bij veel lagere veldsterktes optreden. Daarom dient de verwerking van het polymeer in een stofarme ruimte te geschieden en de oplossing met het polymeer dient met submicronfilters gezuiverd te worden.

Met behulp van fotolithografische technieken kunnen kanaalgolfgeleiders in de polymeerlagen geëst worden. Dit gaat op dezelfde manier waarop kanaalgolfgeleiders in InP gemaakt worden (zie figuur 4.3). Een veel toegepaste structuur is de zogenaamde 'ridge'- golfgeleider. Daarbij is aan weerszijden van het kanaal materiaal weggeëst en vervangen door een materiaal met een lagere brekingsindex. In het RACE-project is echter een gepatenteerde alternatieve methode ontwikkeld, die het voordeel heeft dat hij veel eenvoudiger is. De methode berust op het fotochemisch modificeren van het polymeer, waarbij de kleur van het materiaal verdwijnt. Het proces wordt daarom veelal "bleken" genoemd.

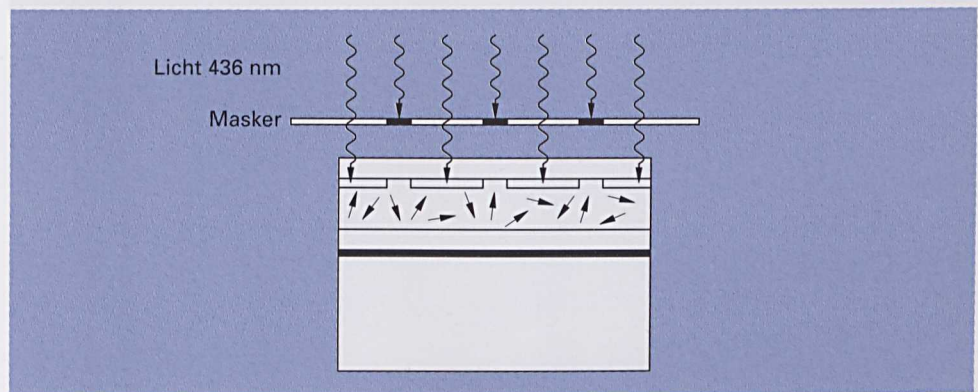
Bleken

Het is gebleken dat de actieve groepen in elektro-optische polymeren onder invloed van licht van een kwiklamp (ultra-violet en zichtbaar licht) veranderingen ondergaan, waarbij de brekingsindex van het polymeer wordt verlaagd. Bestraling van een actieve polymeerlaag met het licht van een kwiklamp via een masker met een golfgeleiderpatroon levert dan direct een kanaalgolfgeleider op met een 'ridge'-hoogte die afhankelijk is van de intensiteit en de duur van de bestraling. De apparatuur die hierbij gebruikt wordt kan dezelfde

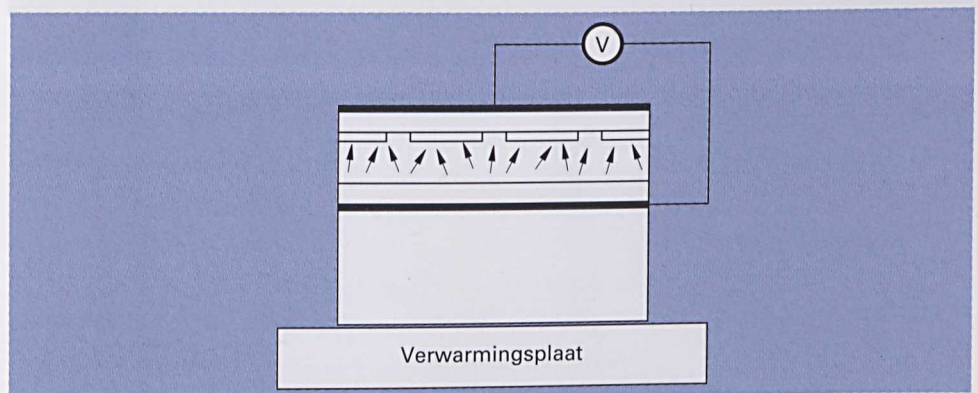
zijn als die voor de belichting van fotolaklagen voor fotolithografie. De demping in de kanalen blijkt bij 1300 nm minder dan 1 dB/cm te kunnen zijn.

In de praktijk worden passieve bufferlagen gebruikt. Zij zijn transparant voor het licht uit de kwiklamp. De kanalen kunnen dan in een compleet meerlagenpakket gerealiseerd worden (figuur 5.3). De elektrode die daarna op de bovenste bufferlaag wordt opgedampt, wordt, samen met de elektrode die direct op het substraat ligt,

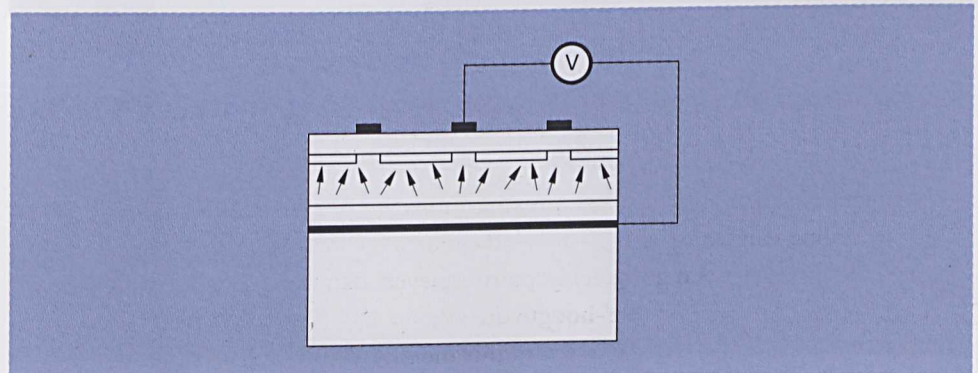
Figuur 5.3
Realisatie van kanalen in een meerlagenpakket door middel van bleken.

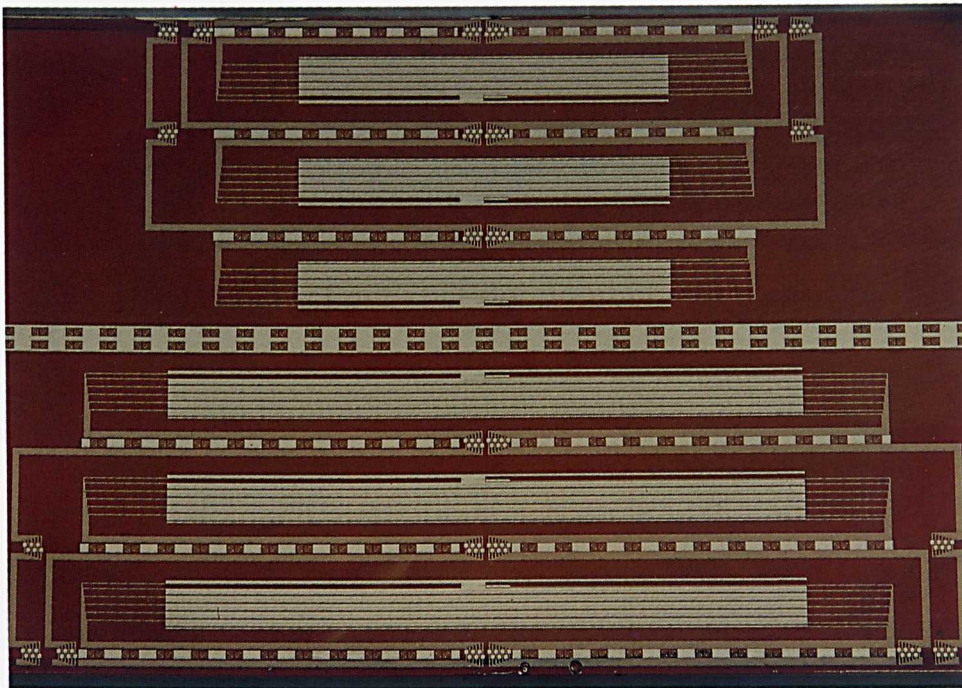


Figuur 5.4
Generatie van een polingsveld met behulp van elektroden.

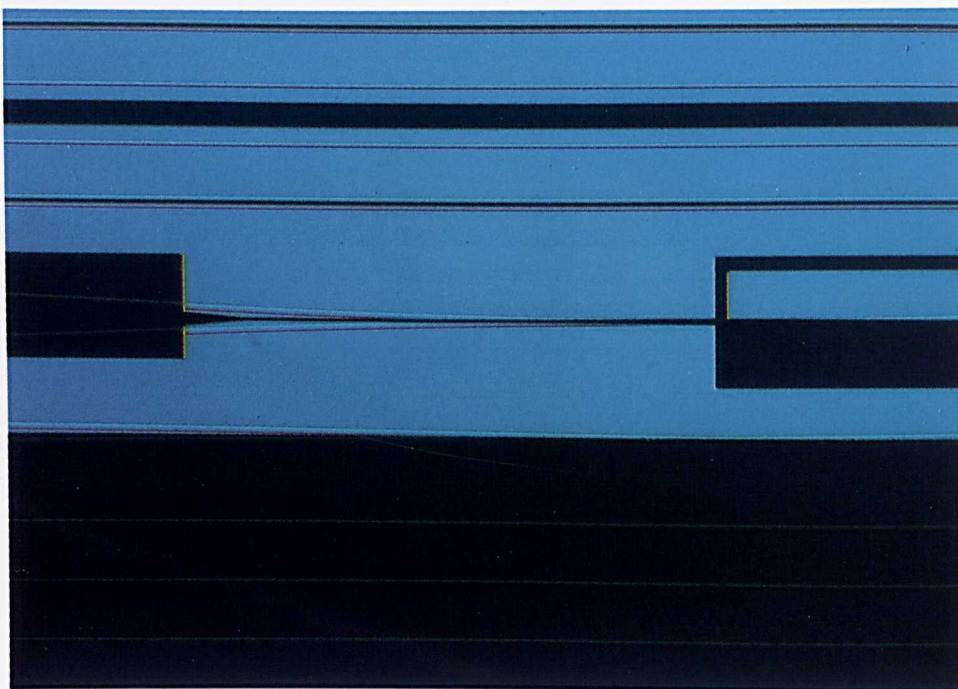


Figuur 5.5
Component in werking.





Figuur 5.6
Component met
intensiteitsmodulatoren en
schakelaars.



Figuur 5.7
Microscopopname van
kanaalgolfgeleiders met
elektroden.

Figuur 5.8
Diverse componenten op
basis van glas en Si.



gebruikt om het polingsveld in het lagenpakket te genereren (figuur 5.4). Na het polen wordt de bovenste elektrode met fotolithografische technieken veelal in de vorm van stroken boven de te activeren delen in de golfgeleiders gebracht. De elektrode op het substraat kan dan als gemeenschappelijke aardelektrode voor alle componenten op de chip dienen (figuur 5.5). Figuur 5.6 toont een elektrodepatroon van een plak met een groot aantal verschillende componenten, zoals schakelaars en modulatoren. Een opname onder een microscoop laat naast de lichtgekleurde elektroden ook de smalle (enkele microns) kanaalgolfgeleiders zien (figuur 5.7). Figuur 5.8 toont enige plakken met polymeercomponenten op basis van glas en Si-substraten.

5.3 Het Eureka-project "PEOCOC"; elektro-optische modulatoren

Elektro-optische polymeren zijn bij uitstek geschikt voor het vervaardigen van hoge snelheids optische componenten. Het samenwerkingsproject van PTT Research met Flamel Technologies en British Telecom Research Labs heeft als doel de realisatie van een Mach-Zehnder modulator met een bandbreedte tot 20 GHz (in paragraaf 2.3 is de werking van deze component al uitgelegd). Dit onderzoek wordt uitgevoerd in het kader van het Eureka-project 'PEOCOC' (Polymeric Elektro-

- Optic Components for Optical Communications). In dit project maakt Flamel de polymeren, PTT Research verwerkt deze tot modulatoren en British Telecom
- Research Labs zorgt voor de elektrostructuren, de behuizing en de aankoppeling van glasvezels. De elektro-optische coëfficiënten in componenten, die op basis van
- gepoolde, thermoplastische polymeerlagen gemaakt zijn, kunnen door thermische relaxatie (ontpolen) afnemen. De snelheid waarmee dit gebeurt is sterk afhankelijk
- van het verschil in de glasovergangstemperatuur van het polymeer en de omgevings-temperatuur. Dit heeft ertoe geleid dat er nu polymeren gesynthetiseerd worden
- met hoge glasovergangstemperaturen (boven 160°C). Deze polymeren kunnen langdurig op 80°C gehouden worden zonder dat er ontpoling optreedt. Bij een andere methode van aanpak worden de actieve groepen in een vernette matrix verankerd. Het gelijktijdig polen en vernetten van het polymeer blijkt niet eenvoudig te zijn; er wordt in de literatuur vooralsnog geen melding gemaakt van vernette polymeerlagen met hoge elektro-optische coëfficiënten. In het Eureka project worden beide methoden van aanpak bestudeerd om tot de meest optimale combinatie van stabiliteit en elektro-optische coëfficiënt te komen.

5.4 Componenten

Naast de reeds beschouwde voordelen van elektro-optische polymeren, blijken zij nog andere aantrekkelijke eigenschappen te bezitten die toegepast kunnen worden in optische componenten. Zo is het mogelijk gebruik te maken van thermo-optische effecten indien slechts lage-snelheidsmodulatie vereist is. Daarnaast kan de mogelijkheid om dubbelbrekendheid te induceren gebruikt worden bij de realisatie van bijvoorbeeld een polarisatiesplitser. In de volgende kaders worden respectievelijk een thermo-optische schakelaar en een polarisatiesplitser op basis van polymeren beschouwd.

De thermo-optische schakelaar

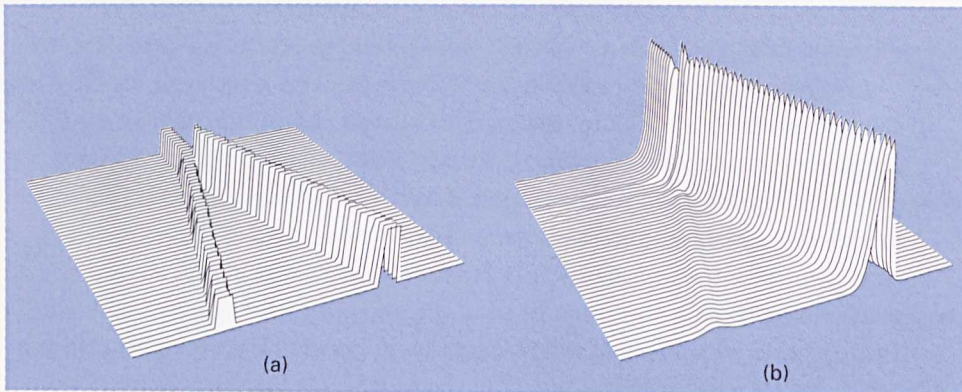
De bijzondere thermische eigenschappen van polymere materialen, te weten een grote uitzettingscoëfficiënt en de slechte warmtegeleiding, maken ze bijzonder geschikt voor toepassingen in thermo-optische componenten. De eerste eigenschap resulteert in een grote verandering van de brekingsindex bij temperatuurverandering: de (negatieve) thermo-optische coëfficiënt is tien maal groter dan in kwartsglas. De tweede eigenschap zorgt voor scherpe temperatuurgradiënten en lage schakelvermogens. Een stroomvoerende elektrode op een polymeerlaag met lichtgeleiders kan een zeer hoge temperatuur krijgen en daardoor heel lokaal grote brekingsindexverlagingen induceren. Hiermee kan licht heel effectief geschakeld worden. Het schakelvermogen kan beperkt blijven tot enkele mW's. De tijdsduur, waarin een polymeerlaag van enkele

microns in voldoende mate opgewarmd is, bedraagt een paar milliseconden. Hoewel het thermo-optische effect dus niet zo snel is als het elektro-optische effect in polymeren, zijn er toch een aantal toepassingen, waarbij het gebruik van thermo-optische schakelaars voordelig is. De polarisatie-ongevoeligheid van het thermo-optische effect draagt hieraan bij. Deze toepassingen liggen op het gebied van het overbruggen van stations in LAN's met een ringstructuur of het op afstand reconfigureren of testen van glasvezelnetwerken. PTT Research heeft 2 x 2 thermo-optische schakelaars gemaakt, die schakelen bij een vermogen van enkele tientallen mW's met een overspraak van 20 dB. Deze schakelaars zijn in hoge mate golflengte- en polarisatie ongevoelig. Het polymeer dat voor deze toepassing werd gebruikt, was een elektro-optisch polymeer dat ongepoold werd gelaten. De lichtgeleidende kanalen werden met de foto-chemische methode gemaakt.

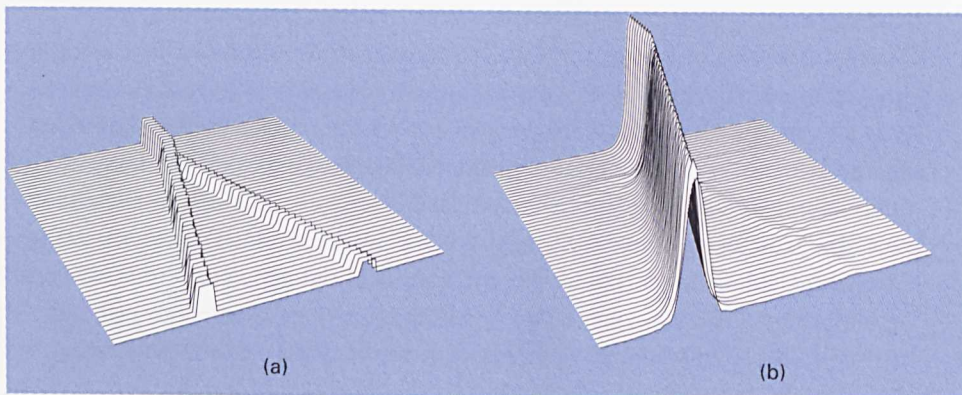
De polarisatiesplitser

Een unieke eigenschap van elektro-optische polymeren is de mogelijkheid om een laag te polen met gestructureerde elektroden. De meeste actieve moleculen hebben een staafvormige elektronenstructuur, waardoor een brekingsindextoename langs de veldlijnen van het elektrische veld ontstaat. Deze toename is twee keer zo groot is als een afname in de richtingen loodrecht op de veldlijnen: dit verschijnsel van richtingsafhankelijkheid heet anisotropie. Als gevolg van de geïnduceerde anisotropie door het polen kunnen gebieden gecreëerd worden, die een richtingsafhankelijke brekingindex vertonen: dubbelbrekendheid. De dubbelbrekendheid kan zeer groot zijn: waarden tot 0,1 zijn gemeten. Strookvormige gepoolde gebieden kunnen daardoor werken als lichtgeleiders, maar dan uitsluitend voor licht dat gepolariseerd is langs de poolrichting. Gebruikmakend van dit effect kunnen componenten gemaakt worden, die de willekeurige polarisatietoestand van licht in een glasvezel scheiden in twee orthogonale toestanden. Zoals gezien in hoofdstuk 4, is deze functie vereist in glasvezelsystemen die werken met coherente ontvangst. In het polarisatie-diversiteitsschema hiervan worden de twee gesplitste signalen elk apart gemengd met licht van de zelfde polarisatie afkomstig van een lokale laser. Een Y-splitser met een gepoolde en een ongepoolde tak kan deze functie uitvoeren. Lichtsignalen zullen immers de tak met de hoogste brekingsindex volgen en die is voor de twee polarisatietoestanden (de TE- en TM-polarisatie) verschillend. Een computersimulatie (BPM) van de werking van deze component wordt getoond in figuren 5.9 en 5.10. In de gepoolde tak is de brekingsindex verhoogd voor licht gepolariseerd langs de poolveldrichting (figuur 5.9a). Hierdoor zal dit licht in de gepoolde tak geleid worden

- (figuur 5.9b). Voor de andere polarisatie is de gepoolde tak in index verlaagd (figuur 5.10a), waardoor het licht juist door de ongepoolde tak geleid zal worden (figuur 5.10b). De overspraak in het ongewenste kanaal met meer dan 25 dB onderdrukt worden. Op deze component heeft KPN een octrooi verworven.



Figuur 5.9
BPM-simulatie van polarisatiesplitser, TM-polarisatie.



Figuur 5.10
BPM-simulatie van polarisatiesplitser, TE-polarisatie.

Tot slot

Sinds de oprichting van het werkveld Geïntegreerde optica binnen PTT Research in 1980 is door de medewerkers met veel enthousiasme en grote inzet gewerkt aan de diverse onderzoeksprojecten. Dit heeft geleid tot talrijke octrooien en publikaties. Daarmee heeft het werkveld een nationale en internationale status verworven.

De auteurs willen alle medewerkers van werkgroep Geïntegreerde optica bedanken voor de prettige samenwerking en de inspirerende discussies gedurende al die jaren. Daarnaast wordt eenieder bedankt die een positieve bijdrage aan het werk geleverd heeft, zowel mensen van binnen als van buiten PTT Research. Derhalve sluiten wij deze monografie af met de toepasselijke Latijnse spreuk:

Et quamcumque viam dederit fortuna sequamur

Virgilius

- [Faint text]
- [Faint text]
- [Faint text]
- [Faint text]
- [Faint text]

De auteurs

Harrie J.M. Bastiaansen behaalde in 1988 zijn ingenieurstitel, cum laude, aan de faculteit der Wiskunde en Informatica van de Technische Universiteit Eindhoven. Sinds 1989 werkt hij bij PTT Research in het kader van een promotiestudie aan simulatiemethoden voor geïntegreerd-optische schakelingen. Daarnaast vertegenwoordigt hij momenteel PTT Research in het EURESCOM-project Overall Strategic Studies.

Jos J.G.M. van der Tol heeft Wis- en Natuurkunde gestudeerd aan de Rijksuniversiteit Leiden. Na zijn afstuderen (1979) is hij in 1985 gepromoveerd op een onderwerp uit de molecuulfysica. Daarna is hij in dienst getreden bij PTT Research, waar hij zich heeft beziggehouden met onder andere theoretische aspecten van de geïntegreerde optica, en ontwerp en realisatie van componenten op lithiumniobaat. Sinds 1990 is hij betrokken bij het onderzoek naar componenten op basis van het halfgeleidermateriaal indiumfosfide.

Mart B.J. Diemeer studeerde werktuigbouwkunde aan de Hogere Technische School te Amsterdam (1974) en Experimentele Natuurkunde aan de Universiteit van Amsterdam (1980). In 1980 startte hij bij PTT Research het onderzoek op het gebied van geïntegreerde optica. Vanaf 1986 is hij actief op het gebied van niet-lineaire optische polymeren; tot 1990 in het RACE 1019-project samen met AKZO en vanaf 1992 in een EUREKA-project samen met het Franse bedrijf Flamel. Dit leidde in 1988 tot de demonstratie van de eerste polymeermodulator ter wereld door PTT Research.

De auteurs hebben een bijdrage geleverd aan talrijke wetenschappelijke publikaties en octrooien.

PTT Research

St. Paulusstraat 4,
2264 XZ Leidschendam
Telephone +31 70 332 56 02
Telefax +31 70 332 64 77
Telex 31236 rnl nl

Address for correspondence:

PTT Research
P.O. Box 421
2260 AK Leidschendam
The Netherlands

Monograph 9301
ISBN 90-72125-38-X bound

Text production, photography and graphic design:
PTT Research, General Affairs