

Geïntegreerde optica voor de telecommunicatie

ir. C. van Dam, prof. dr. B.H. Verbeek
Technische Universiteit Delft, Faculteit der Elektrotechniek,
Vakgroep Telecommunicatie- en Tele-observatietechnologie

In de afgelopen jaren heeft de koperkabel in het interlokale net plaats gemaakt voor de glasvezel. In de komende jaren zal dat ook gebeuren voor het lokale net, zodat de abonnee met de centrale verbonden is door middel van een glasvezel. De communicatie verloopt niet meer via elektrische pulsjes, maar via lichtpulsjes zodat we kunnen spreken van "optische telecommunicatie". De welhaast oneindige bandbreedte zal dan een einde maken aan de transmissie problemen van bandbreedte-vretende apparatuur zoals HDTV (High-Definition Television: TV met hoge beeldkwaliteit), beeldtelefoon etc., want de snelheid waarmee die lichtpulsjes door de glasvezel gaan is enorm: zo'n half miljard per seconde voor ieder HDTV-kanaal. Deze omwenteling op telecommunicatie gebied zal grote economische en maatschappelijke gevolgen hebben, en zal een enorme markt openen voor opto-elektronische schakelingen, geïntegreerd in een zogenaamde "optische chip". De TU Delft werkt mee aan de realisatie van een dergelijke optische chip.

Een optische communicatieverbinding is erg eenvoudig: aan het begin is er een lichtbron en aan het einde een detector (bij de oude Grieken een vuur respectievelijk een paar ogen). Een impuls voor de hedendaagse optische telecommunicatie was de ontwikkeling van de laser in de zestiger jaren. In eerste instantie werden experimenten uitgevoerd door het laserlicht in de vrije ruimte te laten stralen over korte afstan-

zorgde voor de eliminatie van de afhankelijkheid van weersinvloeden op de communicatieweg. In de eerste vezels kon het licht slechts over enkele tientallen meters propageren, tegenwoordig zijn ze van een dusdanige kwaliteit dat er slechts 1% per kilometer aan vermogen verloren gaat.

De verbinding bestaat dus nu uit een glasvezel met aan de zenzijde een laser, die elektrische pulsjes omzet in lichtpulsjes, welke weer aan de ontvangstzijde door een fotodiode omgezet worden in elektrische pulsjes. Gezien de hoge frequentie waarbij de laser gemoduleerd kan worden, kan er enorm veel informatie verzonden worden. Volgens de huidige standaard zo'n 70 televisie kanalen. Om deze capaciteit ten volle te benutten is het niet aantrekkelijk om de informatie in één signaal te stapelen en optisch te verzenden, zodat voor het (ont)stapelen zeer snelle en dus dure elektronica nodig is. Hiervoor zijn er verschillende transmissie schema's bedacht, waarbij een oplossing is om een aantal kanalen parallel over de glasvezel te verzenden bij verschillende golflengtes (kleuren). Het koppelen en scheiden kan dan plaatsvinden met behulp van een prisma

Heterodyne detectie

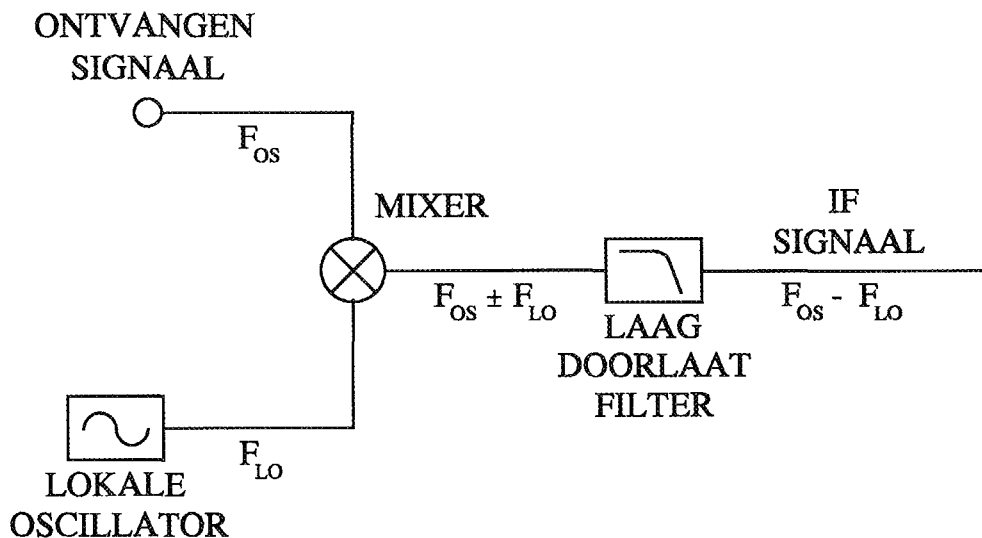
Er zijn verschillende manieren van detectie mogelijk, waarvan directe detectie de eenvoudigste is. Hierbij wordt de intensiteit van een lichtbron (LED of laser) gemodu-

leerd. Bij deze methode wordt echter ook de ruis in het signaal gedetecteerd. Tevens wordt maar een klein deel van de beschikbare bandbreedte gebruikt. Daarom is het aantrekkelijker om coherente detectie toe te passen. Coherente communicatie is een veelbelovende manier om een aantal kanalen parallel over de glasvezel te verzenden. Het principe is identiek aan dat van heterodyne of homodyne radio-ontvangst. Volgens dit principe wordt het ontvangen signaal gemengd met het signaal van een lokale oscillator, waardoor er mengproducten ontstaan op som- en verschilfrequenties van beide signalen, waarbij vooral de laatste van belang is. Dit principe is weergegeven in figuur 1. Door de lokale oscillator te verstemmen kan men het gewenste kanaal selecteren uit het ontvangen signaal. Meestal worden de signalen niet naar basisband geconverteerd ($F_{Lo} = F_{os}$; homodyne detectie), maar naar een middenfrequentie (rond de 70 MHz) waar het signaal makkelijker versterkt kan worden

(heterodyne detectie). Dit principe wordt ook toegepast bij optische coherente communicatie, zij het bij veel hogere frequenties: de frequentie van de draaggolf bedraagt 2 TeraHz (dit is 2 miljoen MHz), en die van de middenfrequentie ligt in het GHz gebied (dit is duizend MHz). Voor de lokale oscillator wordt een zeer stabiele en nauwkeurig verstembare laser gebruikt en het mengen vindt plaats in de fotodiodes.

Optische ontvangerchip

Zoals uit hetgeen hierboven beschreven is te verwachten valt, is een fotodiode alleen niet voldoende als optische ontvanger. In figuur 2 is een optische ontvangerchip weergegeven, zoals die gebruikt zou kunnen worden. De chip is 1,5 bij 3 mm en werkt als volgt. De signalen van de lokale oscillator en de vezel worden gemengd in de fotodiodes en versterkt met behulp van veldeffect transistoren. Hierbij moet wel de polarisatie-richting van beide signalen gelijk zijn. Als ze namelijk loodrecht op elkaar



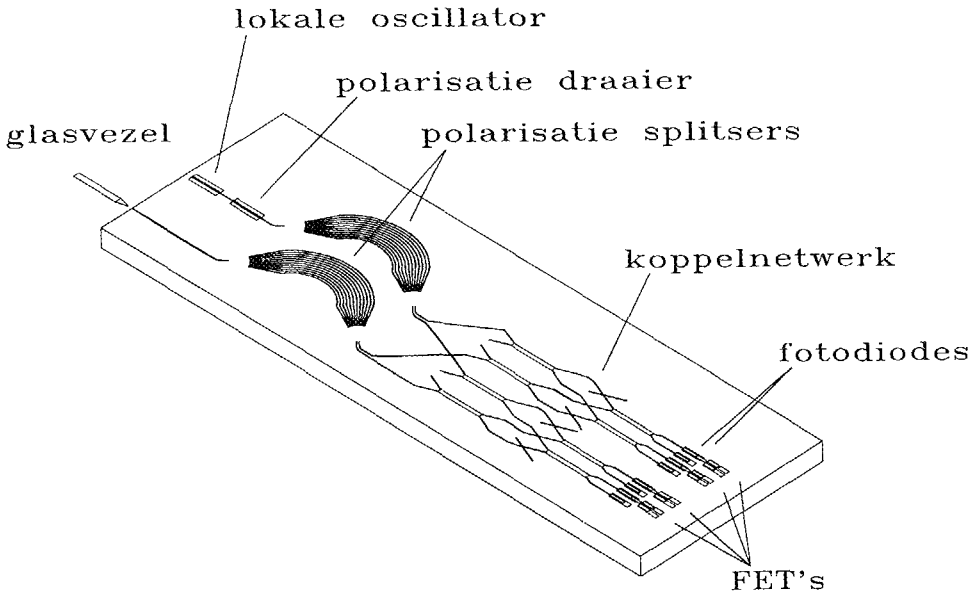
Figuur 1
Schema van het heterodyne detectie principe

staan, valt het signaal aan de uitgang weg. De polarisatierichting van het licht uit de lokale oscillator ligt vast, terwijl die van het licht uit de vezel onbekend is, en kan variëren. Daarom wordt de polarisatierichting van beide signalen opgesplitst in twee onderling loodrechte richtingen, waarna beide richtingen afzonderlijk verwerkt worden. Hiertoe dient wel eerst de polarisatierichting van de lokale oscillator 45° gedraaid te worden met behulp van de polarisatiedraaier, zodat het de twee richtingen bevat. Door de uitgangssignalen van beide polarisatierichtingen op te tellen wordt het uiteindelijke signaal ongevoelig voor fluctuaties in de polarisatierichting van het ontvangen signaal (ook wel "polarisation diversity" genoemd). Een tweede complicatie treedt op bij homodyne detectie en heeft betrekking op de fase van het ontvangen signaal. Indien het in tegenfase is met het lokale oscillator signaal, doven beide signalen elkaar uit en valt het uitgangssignaal weg.

Om dit te ondervangen wordt gebruik gemaakt van een koppelnetwerk. Hierbij worden beide signalen zodanig bewerkt dat het somsignaal van de vier uitgangssignalen een constant niveau heeft, onafhankelijk van het faseverschil tussen lokale oscillator en ontvangen signaal (ook wel "phase diversity" genoemd).

Silicium niet bruikbaar

Omdat bij golflengtes van 1,3 en 1,55 μm de glasvezeleigenschappen optimaal zijn, worden deze gebruikt voor telecommunicatietoepassingen. Silicium is niet geschikt voor het opwekken en detecteren van licht van deze golflengtes, waardoor er geen gebruik gemaakt kan worden van de ver ontwikkelde silicium technologie voor het vervaardigen van de optische ontvangerchip. Materialen die wel geschikt zijn, zijn de zogenaamde III-V en II-VI halfgeleiders. Deze halfgeleiders lijken qua structuur veel op silicium, en worden zo genoemd omdat



Figuur 2
Optische chip voor coherente heterodyne detectie

het kristalrooster is opgebouwd uit III- en V-waardige, respectievelijk II- en VI-waardige elementen. De laatste groep valt af omdat de golflengte van het licht dat gegenereerd en gedetecteerd kan worden in een gebied ligt dat niet interessant is voor huidige telecommunicatietoepassingen. De III-V materialen zijn hiervoor beter geschikt, waarvan GaAs (Gallium-Arsenide) en InGaAsP (Indium-Gallium-Arsenide-Fosfide) de meest bekende zijn. Vooral met de laatste kan, afhankelijk van de samenstelling, licht opgewekt worden met een golflengte variërend van 0,9 tot 1,65 μm .

Samenwerking in Nederland

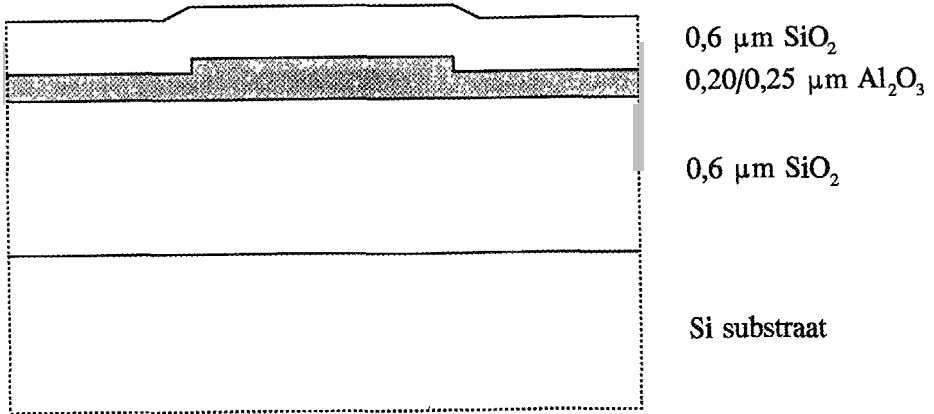
De ontwikkeling van de hierboven beschreven chip is een omvangrijk project. Het onderzoek op dit gebied vindt dan ook plaats in een samenwerkingsverband van de technische universiteiten van Delft, van Eindhoven en van Twente, en de industrie (PTT, Philips, AT&T) binnen het deelprogramma "Electro-Optics" van het Innovatieve Onderzoeks Programma (IOP) "IC-Technologie". Het ministerie van Economische Zaken subsidieert dit programma om de samenwerking tussen universiteiten en bedrijven te stimuleren.

De chip zal worden gefabriceerd bij de TU Delft, waar de faculteiten der Elektrotechniek (ET) en Technische Natuurkunde (TN) sinds 1983 samenwerken op het gebied van geïntegreerde optische circuits, in een eigen stofarm laboratorium. Het onderzoek naar de polarisatiedraaier en de fiber-chip koppelingen gebeurt aan de TU Delft (TN). De ontwikkeling van de polarisatiesplitser vindt plaats een TU Delft (ET) in samenwerking met het Research Neher Laboratorium van de PTT. Tevens wordt aan de TU Delft (ET) onderzoek verricht naar het koppelwerk en de integratie van het totale circuit met de fotodiodes en FET's.

Geschiedenis van de vakgroep

De vakgroep Telecommunicatie- en Teleobservatietechnologie (TTT), toen nog Microgolfttechniek geheten, van de faculteit

der Elektrotechniek van de TU Delft begon met onderzoek op het gebied van optische telecommunicatie in 1981. In dat jaar werd prof. dr. G.A. Acket benoemd als hoogleeraar in de techniek van de glasvezelcommunicatie. Gezien de reeds vergaande ontwikkeling van de glasvezel werd gekozen voor een onderzoeksgebied dat toen nog in de kinderschoenen stond: "Integrated Optics", het vervaardigen van planaire optische componenten en optische chips. In 1982 werd een stofarm laboratorium ingericht met apparatuur voor vervaardiging van planaire optische componenten op silicium substraat, met als golfgeleidend materiaal aluminiumoxide. Het idee hierachter was ervaring te krijgen met het vervaardigen van planaire optische componenten, om later over te schakelen naar III-V halfgeleidermaterialen. Het kostte een aantal jaren om het vak in de vingers te krijgen, maar in 1986 verscheen dan de eerste publicatie over aluminiumoxide films voor integrated optics. Er zouden hierna nog vele volgen, waarover later meer. Tevens werd in 1986 een epitaxiereactor (LPE; Liquid Phase Epitaxy) opgebouwd voor het groeien van de lagenstructuren. Dit werd gesteund door het ministerie van Economische Zaken, Philips en PTT Research. Na het ontwikkelen van structuren en etsprocessen verschenen ook over III-V materiaalstructuren publicaties, vanaf 1989. Vanaf dat jaar werkt de groep Integrated Optics in het kader van het reeds eerder genoemde deelprogramma "Electro-Optics" van het IOP aan de realisatie van een coherente optische ontvanger. Reeds in 1988 wordt prof. Acket opgevolgd als deeltijdhoogleraar door prof. dr. B.H. Verbeek, afkomstig van het Philips Optoelectronics Centre. In september 1990 wordt prof. dr. R.F.G. Baets, afkomstig van de Rijksuniversiteit van Gent (België) als tweede deeltijdhoogleraar aangesteld, zij het op het gebied van opto-elektronische integratie.



Figuur 3
 Doorsnede van een planaire "ridge" golfgeleiderstructuur

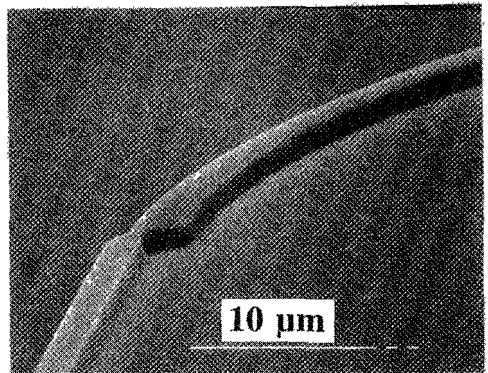
Golfgeleiderstructuur

Zoals hierboven vermeld, werd begonnen met silicium als substraatmateriaal. De aanwezigheid van het IC-atelier (thans Delft Institute of Microelectronics and Submicron Technology, kortweg DIMES) was hierbij een voordeel, omdat er veel gebruik gemaakt kon worden van de daar aanwezige faciliteiten voor IC-fabricage. De golfgeleiderstructuur zoals die gebruikt wordt, is weergegeven in figuur 3. Het is een zogenaamde "ridge" golfgeleiderstructuur: een filmlaag waarvan gedeeltes zijn weggeëetst, die opgesloten is tussen twee lagen met een lagere brekingsindex. Door het wegeten van een gedeelte van de filmlaag ontstaan er op de plak baantjes waarvan de filmlaag lokaal dikker is dan op de rest van de plak. Deze baantjes worden golfgeleiders genoemd, en het licht blijft hierin opgesloten, ook als er bochten in zijn aangebracht.

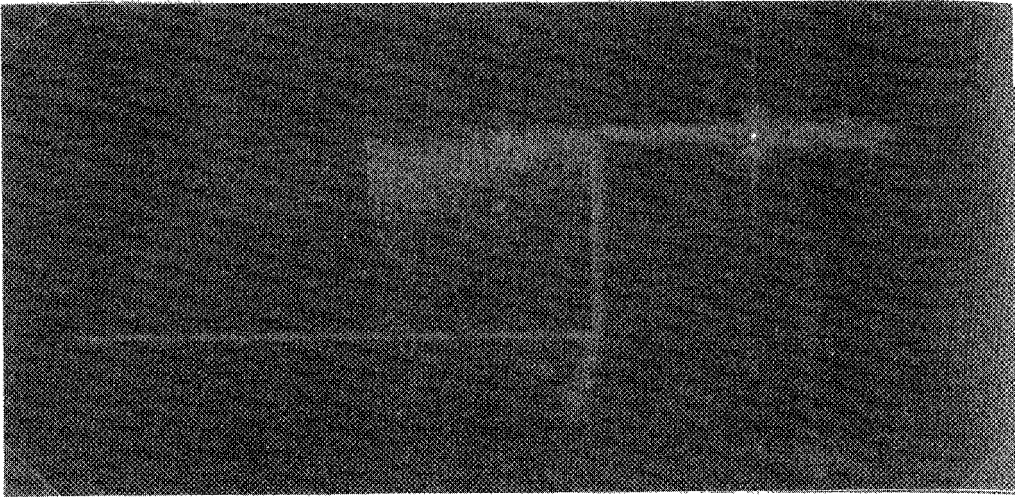
Wereldrecord

Een groot deel van de componenten van de optische ontvangerchip wordt ontwikkeld aan de TU Delft. In het vervolg van dit

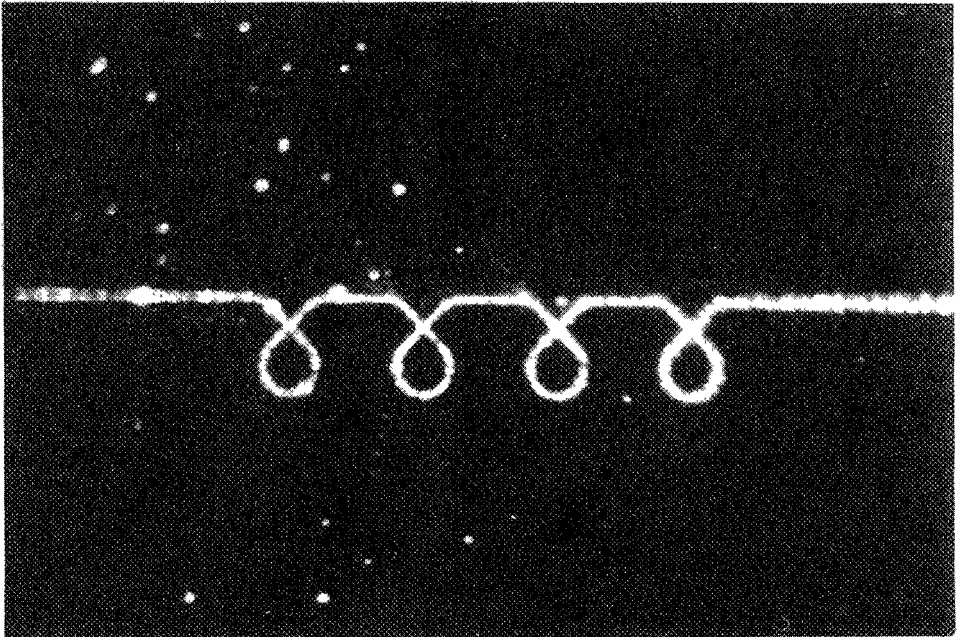
artikel beperken we ons dan ook tot de activiteiten van de vakgroep TTT van faculteit der Elektrotechniek van de TU Delft. Het allereerste begin van de activiteiten bestond uit onderzoek naar eenvoudige optische componenten in aluminiumoxide: rechte en gebogen golfgeleiders. Om de



Figuur 4.
 Scanning Electron Microscope (SEM) opname van een overgang van een rechte golfgeleider naar een gebogen



Figuur 5
Afstralingsverliezen bij slecht ontworpen bochten



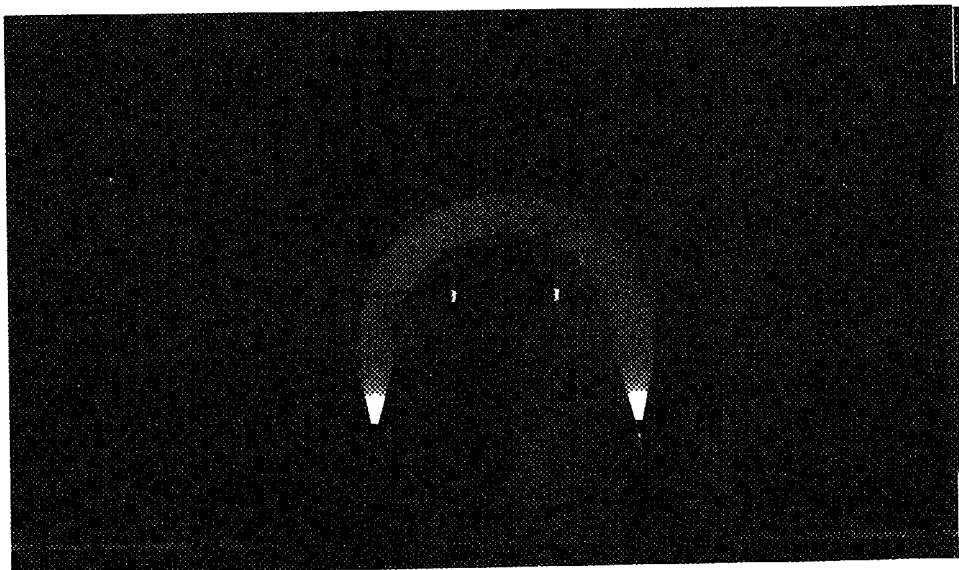
Figuur 6.
Mogelijkheden met goed ontworpen bochten. een viertal lussen met een bochtstraal van $150\ \mu\text{m}$

verschillende componenten op een chip met elkaar te verbinden volstaan alleen rechte golfgeleiders niet, er zullen ook bochten gebruikt moeten worden. Tevens kunnen bochten gebruikt worden voor het opbouwen van lange componenten. De TU Delft heeft met dit onderzoek naar bochten een internationaal vooraanstaande positie opgebouwd. Het onderzoek van dr. ir. E.C.M. Pennings, die op dit gebied in 1990 promoveerde, resulteerde in een wereldrecord voor bochten met de kleinste bochtstraal en de minste verliezen: 0,6 dB/90° voor een bocht met een straal van slechts 50 μm. Een probleem bij scherpe bochten is dat het licht enigszins naar buiten gedruwd wordt (het vindt als het ware een centrifugale kracht). Na de bocht past de bundel dus niet meer zo goed in de rechte golfgeleider. Daardoor ontstaan er bij de

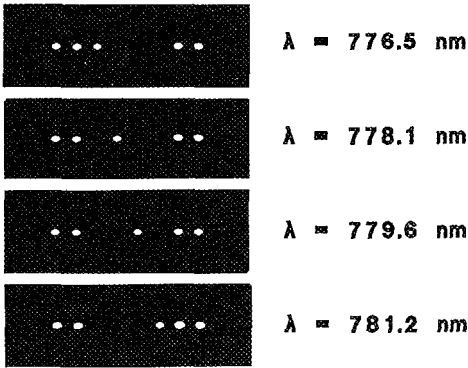
overgang verliezen, die flink kunnen oplopen. De oplossing om dit te ondervangen is eenvoudig: de rechte golfgeleider smaller maken en verschuiven. De bundel is dan al wat smaller en wordt in de buitenbocht gelanceerd. Deze verschuiving wordt ook wel "offset" genoemd, en is duidelijk te zien in figuur 4. In figuur 5 is te zien wat er gebeurt bij een niet aangepaste bocht (zonder offset), en figuur 6 geeft weer wat er mogelijk is met een goede aanpassing.

Optische Phased Array

Voor een golflengte demultiplexer kan een prisma worden gebruikt. Omdat het echter niet mogelijk is om deze te integreren in een chip, is er aan de TU Delft een nieuw principe ontwikkeld door dr. ir. M.K. Smit, die mede op dit onderwerp in 1991 promoveerde. Dit principe wordt een "optische

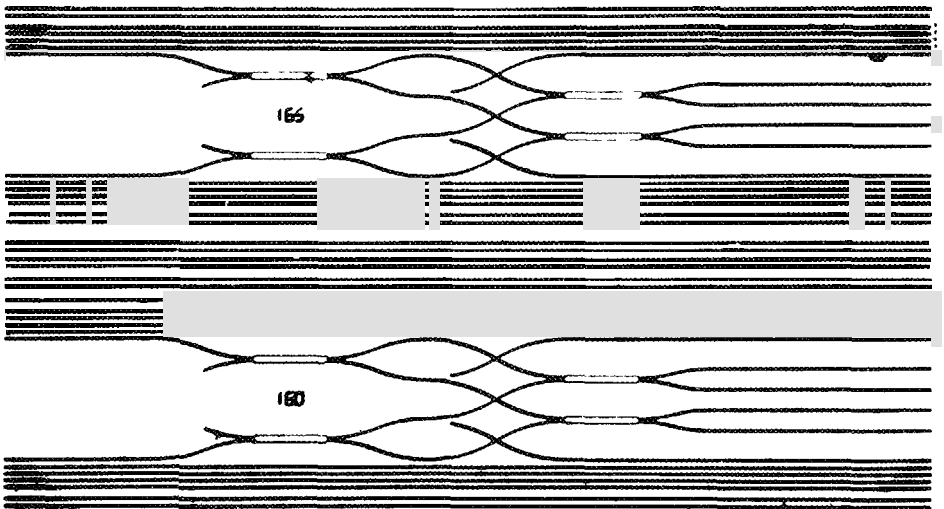


Figuur 7
Microscopieopname van een gerealiseerde golflengtedemultiplexer op basis van het phased array principe



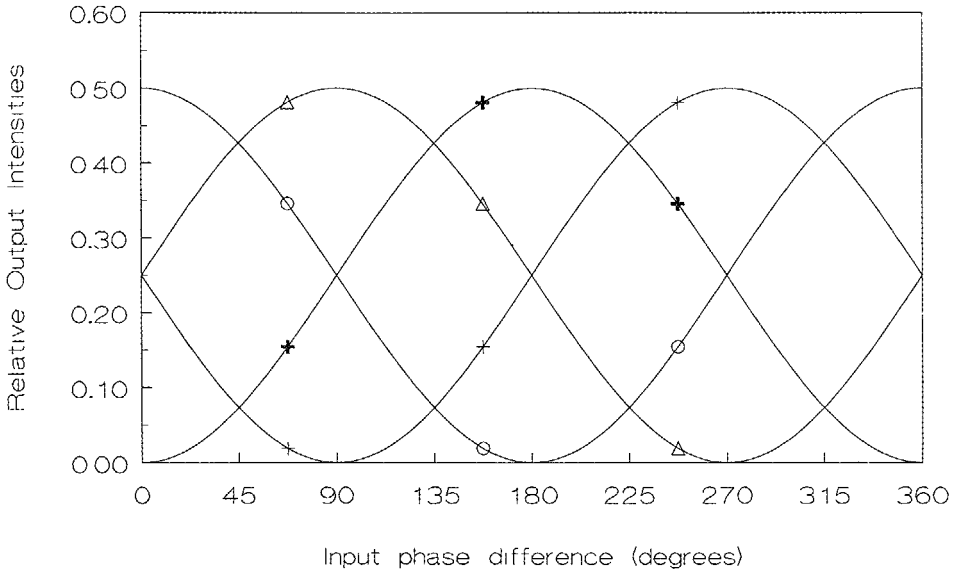
Figuur 8
Lichtverdeling gemeten op het kliefvlak, voor verschillende golflengtes. Aan de linker- en rechterkant liggen twee referentiekkanalen

phased array” genoemd, en kan ook worden toegepast voor polarisatiesplitters. Zo’n optische phased array, waarvan de werking hieronder beschreven wordt, is weergegeven in figuur 7. Het licht dat meerdere golflengtes (of beide polarisaties) bevat, komt aan het einde van de golfgeleider waarna het gaat divergeren. Hierbij blijft het licht echter wel opgesloten in de aluminiumoxidelaag. Deze divergerende bundel wordt ingekoppeld in een reeks naast elkaar gelegen golfgeleiders. Het veld zal aan de uitgang gereconstrueerd worden met een uniforme faseverdeling, indien de lengte van al deze golfgeleiders een geheel aantal malen de golflengte bedraagt, en zal focuseren in het brandvlak. Als de golflengte nu enigszins wijzigt ten opzichte van de ontwerp golflengte zal de fase voor de buitenste golfgeleiders meer veranderen dan voor de binnenste, de binnenste golfgeleiders zijn immers korter. Door ervoor te zorgen dat de lengtetoeename van binnen naar buiten lineair verloopt, zal ook de faseverdeling lineair verlopen.



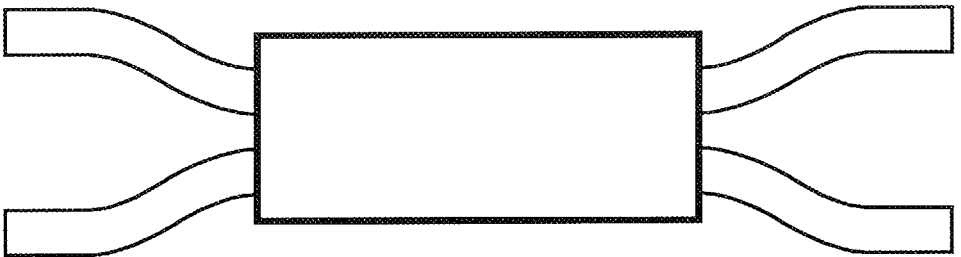
Figuur 9.
Microscopfoto van een gerealiseerde phase diversity netwerk

+ Out1 Δ Out2 \circ Out3 + Out4



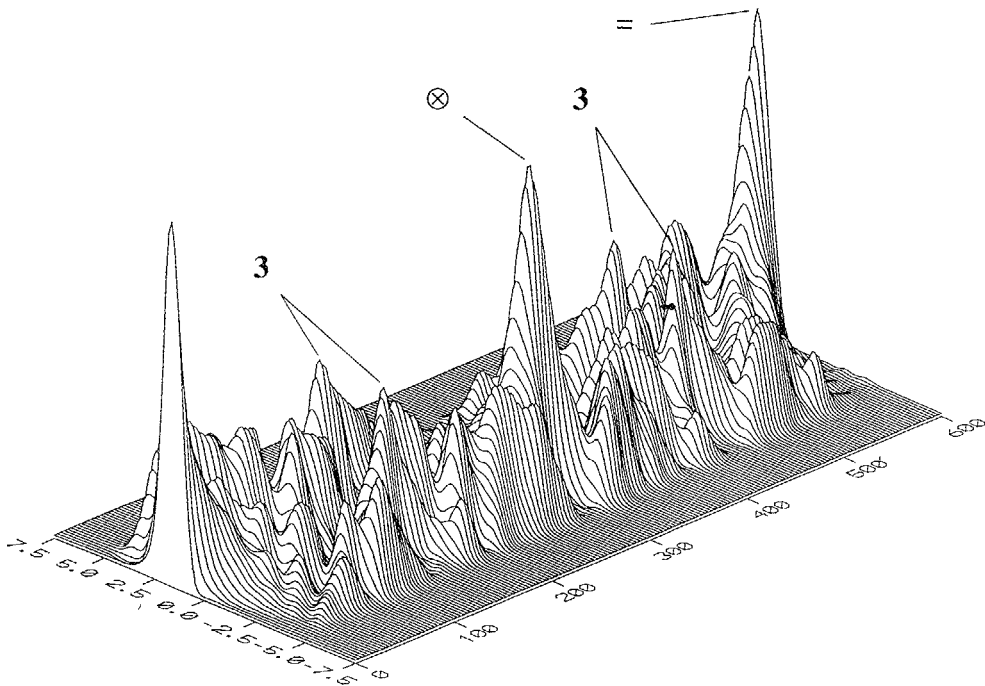
Figuur 10

Intensiteit van de vier uitgangen van een phase diversity netwerk als functie van het faseverschil van de twee ingangssignalen.



Figuur 11.

Weergave van een MMI-koppelaar met twee ingangs- en twee uitgangsgolfgeleiders.



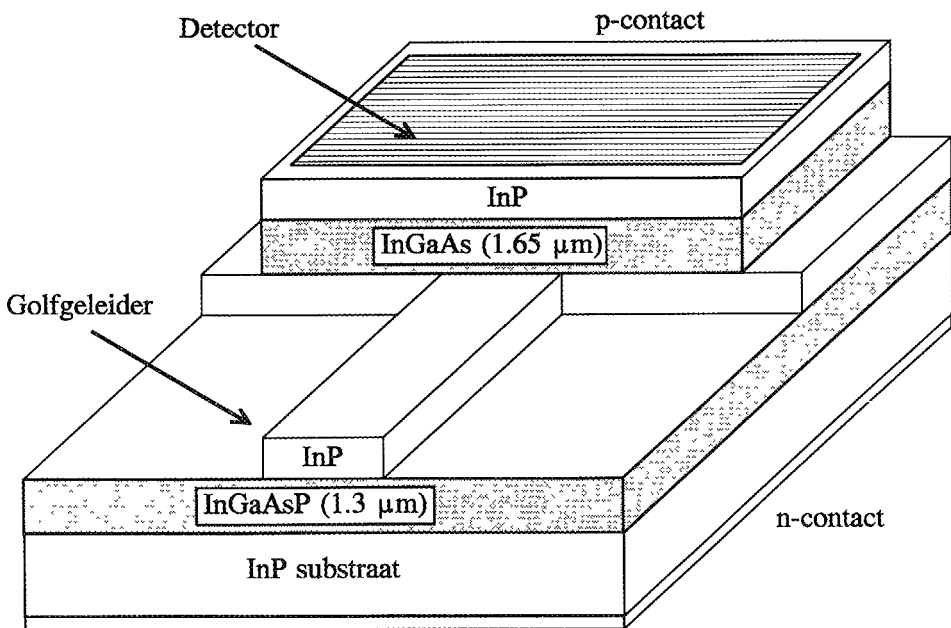
Figuur 12:

De intensiteitsverdeling als functie van de lengte. De labels "3", "=" en "⊗" geven respectievelijk de 3-dB state, de bar state en de cross state weer.

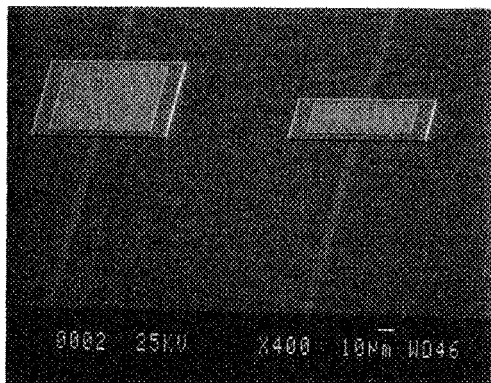
Hierdoor zal de bundel kantelen en in een ander punt focussen. De werking van een dergelijke golflengtemultiplexer is te zien in figuur 8. Hiervoor is de plak gekleefd en wordt de lichtverdeling op het klieflvlak bekeken voor verschillende golflengtes. De prestaties van deze demultiplexer zijn vergelijkbaar met de beste tot nu toe gepubliceerd, alleen met aanzienlijk kleinere afmetingen (3×5 mm; $2,5 \times 0,6$ mm voor een polarisatiesplitser). Dat dit principe ook voor polarisatiesplitters werkt, komt doordat de golflengte van het licht in een optische chip enigszins afhankelijk is van de polarisatie.

Phase Diversity Network

Bij gebruik van homodyne detectie wordt het optische spectrum naar de basisband geconverteerd, waardoor er strenge eisen gesteld worden aan de lokale oscillatorlaser. Nu is het niet noodzakelijk om de lokale oscillator te "phase locken" indien gebruik gemaakt wordt van een "phase diversity network". Een foto van een dergelijk network is te zien in figuur 9. Dit network bestaat uit een reeks 3-dB koppelaars die het signaal in twee gelijke delen splitsen, waarbij tevens het ene uitgangssignaal negentig graden uit fase is met het andere. Door deze combinatie van signalen is het mogelijk vier uitgangssignalen te verkrijgen, waarvan de som constant is en onaf-



Figuur 13:
Schematische weergave van een golfgeleider geïntegreerd met een detector



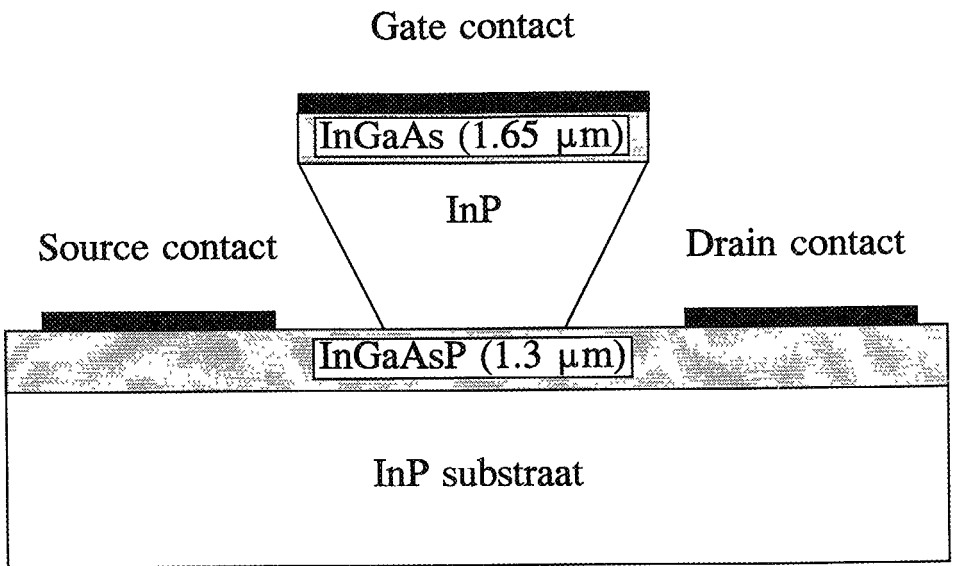
Figuur 14
SEM-opname van een gerealiseerde fotodiode, nog niet voorzien van metaalcontacten.

hankelijk van het faseverschil tussen het signaal van de lokale oscillator en het ontvangen signaal. Dit is te zien in figuur 10

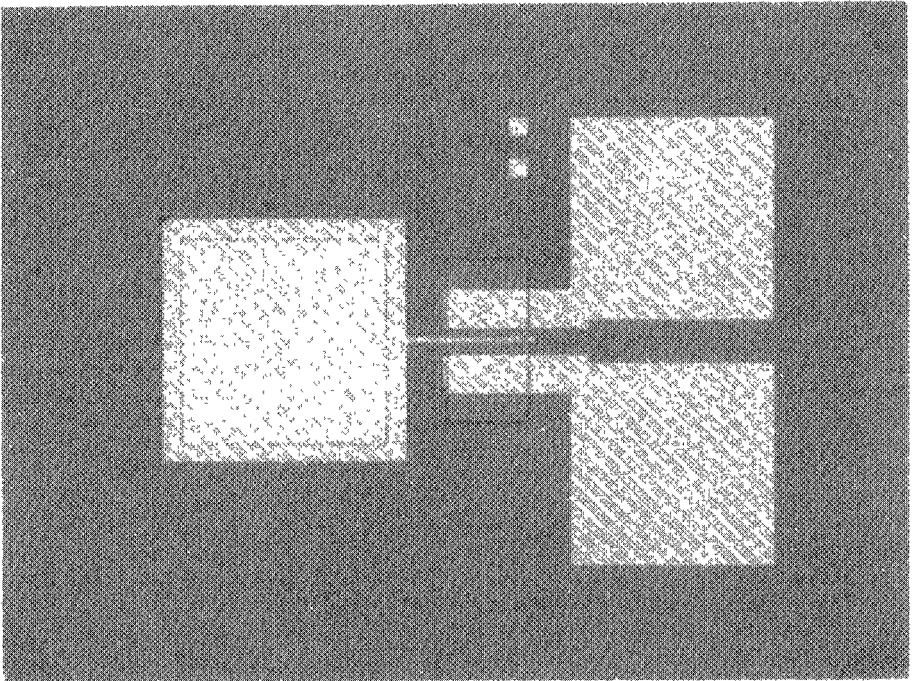
De faseafwijking van het netwerk ligt beneden de 20° , en het totale verlies is minder dan 3 dB. De dimensies van het netwerk zijn $270 \times 1200 \mu\text{m}$. Dit zijn, voor zover we weten, de kleinste afmetingen en de laagste verliezen die tot nu toe gerapporteerd zijn.

Tolerante koppelaars

De werking van de koppelaars, zoals gebruikt in het phase diversity netwerk, is gebaseerd op een bepaalde eigenschap die het licht heeft. Indien namelijk twee golfgeleiders dicht naast elkaar liggen, heeft het licht de neiging om van de ene volledig



Figuur 15.
Schematische doorsnede van een FET



Figuur 16
Microscopieopname van een gerealiseerde FET. Op de foto zijn de gate- (links) en de source- en drain-contacten (rechts) duidelijk te zien.

over te steken naar de andere, en weer terug. Hoe kleiner de tussenafstand, hoe sneller dit gaat, en hoe korter de totale lengte wordt. Door de lengte waarover de golfgeleiders dicht bij elkaar liggen handig te kiezen, kan een gewenste verdeling van het licht aan de uitgang bereikt worden (volledig oversteken (cross state), totaal niet oversteken (bar state), gelijke verdeling (3 dB), etc.) In plaats van twee golfgeleiders kan ook een hele brede genomen worden waarmee hetzelfde effect bereikt wordt. Een dergelijke koppelaar heet een MMI-koppelaar (Multi Mode Interference) en is te zien in figuur 11. De werking van de koppelaar is goed te zien in figuur 12, waarin de intensiteitsverdeling van het licht weergegeven is als functie van de lengte. Een bijkomend voordeel is dat de koppelaar minder gevoelig wordt voor variaties in het fabricageproces, de toleranties worden groter.

Opto-elektronische componenten

Voor de realisatie van opto-elektronische componenten, zoals fotodiodes en FET's, volstaat de aluminiumoxide golfgeleiderstructuur niet, maar moet er gebruik gemaakt worden van het eerder genoemde III-V halfgeleidermateriaal InGaAsP op InP substraat. Een geschikte lagenstructuur voor de integratie van passieve componenten (golfgeleiders, koppelaars, polarisatiesplitters, golfengtedemultiplexers) en actieve componenten (fotodiodes, FET's) is weergegeven in figuur 13. De vijflagenstructuur vormt twee verticaal gekoppelde golfgeleiders en wordt "twinguide" genoemd. De dikte van de lagen ligt in de orde grootte van enkele tienden micrometers. De onderste golfgeleider is transparant, de bovenste is absorberend. Door de bovenste twee lagen weg te etsen, ontstaat

een drielagenstructuur waarin passieve componenten gemaakt kunnen worden. Hiervoor moet een ridge geëtsd worden in de middelste InP-laag zodat een laterale opsluiting van het licht bereikt wordt. De vijflagenstructuur is geschikt voor het fabriceren van actieve componenten. Het licht dat in de transparante golfgeleider loopt, wordt bij de overgang van de drielagenstructuur naar de vijflagenstructuur in de absorberende filmlaag erboven opgenomen. De fotonen genereren in deze laag elektron-gatparen, die een elektrische stroom veroorzaken in een extern circuit via elektroden die aan de boven- en onderkant van de structuur zijn aangebracht. Hiermee is dan een fotodiode gerealiseerd, zoals te zien is in figuur 14.

De aldus gegenereerde fotostroom zal in het algemeen vrij klein zijn. Om deze fotostroom te versterken zal in dezelfde lagenstructuur een voorversterker worden geïntegreerd. De basiselementen van deze voorversterker zijn veldeffect transistoren (FET: Field Effect Transistor). Figuur 15 toont schematisch een dwarsdoorsnede van een dergelijke FET. De stroom die van source naar drain loopt, wordt beïnvloed door een spanning op de gate. Deze spanning introduceert een elektrisch veld waardoor ladingsdragers uit de kanaallaag gedrukt worden (veldeffect) en de kanaalstroom veranderd. Figuur 16 toont een microscoopopname van een in Delft gerealiseerde FET in InGaAsP.

De auteurs bedanken ir M.R. Amersfoort, dr Y.S. Oei en Ir. L.B. Soldano voor hun bijdrage aan dit artikel.