

# Coherent optische communicatie systemen

*Ir. A.C. van Bochove, Dr. Neher Laboratorium PTT*

\* Met toestemming overgenomen uit Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radioge-nootschap deel 53 - nr. 3 - 1988

## Inleiding

Wanneer een groot aantal digitale spraakkanalen (elk 64 kbit/s) moeten worden verzonden, is een breedbandig telecommunicatienet vereist. De behoefte hieraan wordt nog sterker als er ook digitale videosignalen moeten worden overgebracht (elk 140 Mbit/s, of in het geval van HDTV zelfs 565 Mbit/s). Met de huidige stand van de techniek zijn operationele systemen van ca. 2 Gbit/s realiseerbaar. Naar verwachting zullen over 5-10 jaar systemen van 10 Gbit/s worden toegepast, en wellicht zal de behoefte aan bandbreedte nog aanzienlijk groeien. Bij dergelijke bandbreedtes zijn symmetrische en coaxiale kabels niet meer bruikbaar, en is de monomodus glasvezel het aangewezen transmissiemedium.

## Optische systemen met directe detectie

### *Basisprincipe directe detectie*

Alle huidige operationele glasvezelsystemen berusten op directe detectie van het verzonden licht (figuur 1). De laser wordt in intensiteit gemoduleerd, en het verzonden licht wordt ontvangen door een fotodiode, waarna het signaal elektronisch wordt versterkt. De gevoeligheid van de ontvanger wordt beperkt door de ruis van de versterker.

Een groot voordeel van een direct detectiesysteem is de eenvoud van het principe, het geringe aantal elektro-optische componenten, en daardoor de relatief lage kostprijs.

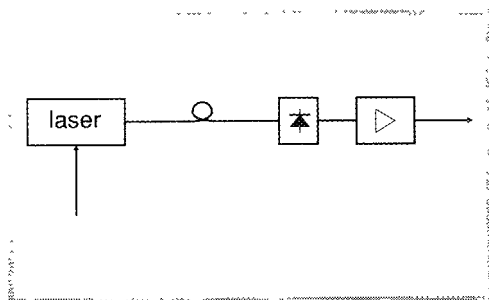
### *Eigenschappen van directe detectie systemen*

#### *Informatiecapaciteit*

De beschikbare capaciteit van een glasvezel voor informatie-overdracht is in theorie buitengewoon hoog. De bandbreedte van het optische venster tussen 1300 en 1600 nm is bijvoorbeeld ca. 3000 GHz. Systemen gebaseerd op directe detectie gebruiken slechts een zeer klein gedeelte van deze beschikbare capaciteit.

De redenen hiervoor zijn:

- De multimode laser heeft een grote spectrale breedte (enkele honderden GHz). Hierdoor wordt de maximale bitsnelheid beperkt onder invloed van de dispersie



Figuur 1  
Glasvezelsysteem met directe detectie

van de glasvezel. Dit is vooral bij 1550 nm het geval, waar de dispersie groot is. Het effect van de dispersie kan op twee manieren worden bestreden:

- Door glasvezels met lage dispersie toe te passen. Een standaard monomodus glasvezel heeft een dispersienulpunt bij 1300 nm maar bij 1550 nm is de demping lager. Er zijn speciale glasvezels in ontwikkeling die bij 1550 nm zowel een lage demping als een lage dispersie vertonen.
- Door bijzondere lasers met een geringe spectrale breedte te gebruiken (zoals DFB-lasers). Bovendien kan het nodig zijn het licht extern te moduleren, omdat het spectrum van de laser verbreedt bij snelle interne modulatie van de laser (chirping); deze verbreding kan enkele nm bedragen.

Het record voor eenkanaals systemen met directe detectie ligt momenteel op 8 Gbit/s over 68 km (laboratoriumexperiment: Gnauck 1987).

- Wanneer meer informatie moet worden verzonden bestaat de mogelijkheid van golflengtestapeling (Wavelength Division Multiplexing, WDM). Hierbij worden meerdere lasersignalen met verschillen-

de golflengten gelijktijdig via een golflengte-multiplexer door een glasvezel verzonden. Een golflengte-demultiplexer aan de ontvangerzijde splitst deze signalen weer uiteen (figuur 2). Het aantal te stapelen kanalen wordt beperkt door:

- De breedte van het optische venster waar de demping laag is.
- De selectiviteit van de golflengte demultiplexer.
- Het verloop van de dispersie als functie van de golflengte.
- De golflengtestabiliteit en de spectrale breedte van de laser.
- Niet-lineaire effecten in de glasvezel (met name Raman verstrooiing).

In de praktijk wordt het aantal kanalen door deze factoren beperkt tot enkele tientallen. Het record voor golflengte-gestapelde systemen is 27 Gbit/s over 58 km; het werd gerealiseerd door 18 signalen van DFB lasers van elk 1.5 Gbit/s te stapelen (Bulley 1987). Het ziet er dus naar uit dat de informatiecapaciteit van directe detectiesystemen beperkt blijft tot enkele tientallen GHz. Dit lijkt veel, maar bij transmissie van een groot aantal digitale videokanalen kan dit een beperking zijn.

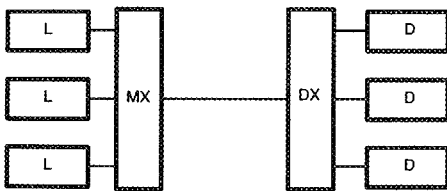
### Gevoeligheid

De maximale afstand tussen een optische zender en een optische ontvanger wordt ondermeer bepaald door de vezel- en lasdemping en de ontvangergevoeligheid. Voor dit laatste speelt de eigen ruis van de versterker de hoofdrol. Bij distributieve toepassingen in het locale net zal het van de gevoeligheid afhangen hoeveel abonnees via glasvezel op een enkele laser kunnen worden aangesloten.

### Optische systemen met coherente detectie

#### Basisprincipe coherente detectie

Zowel de transmissiecapaciteit als de gevoeligheid van een optisch communicatiesysteem kunnen aanzienlijk worden vergroot door optimaal gebruik te maken van het golfkarakter van het licht. We spreken



Figuur 2. Glasvezelsysteem met directe detectie en golflengtestapeling

dan van coherente detectie (Hodgkinson 1985; Salz 1985; Salz 1986). In feite is dit de optische implementatie van principes die ook in de radiotechniek worden toegepast. Figuur 3 geeft een algemeen blok-schema van een coherent optisch communicatie systeem. Het (meestal extern) gemoduleerde laserlicht wordt na verzending gemengd met het licht van een tweede laser (de lokale oscillator), en het verschil-spectrum wordt door de fotodiode gedetecteerd. Het is hierbij noodzakelijk dat de polarisatietoestand van de beide lichtwegen gelijk is.

In een coherent systeem moeten de zend-laser en de lokale oscillator een voldoende smalle spectrale lijnbreedte hebben. De elektrische veldsterkte van het elektromagnetische veld van de zendlaser wordt dan ter plaatse van de optische ontvanger gegeven door:

$$E_1(t) = \Sigma_1 \cdot \cos(w_1 \cdot t + \varphi)$$

Het licht functioneert als optische draag-golf, en de informatie kan gemoduleerd worden op de amplitude ( $\Sigma_1$ ), op de frequentie ( $\omega_1$ ) of op de fase ( $\varphi$ ) van het licht (figuur 4).

In het geval van een digitaal modulaat spreken we van ASK (Amplitude Shift Keying), FSK (Frequentie Shift Keying) of PSK (Phase Shift Keying). Het ontvangen signaal wordt dan op de detector gemengd met een lokale laseroscillator, waarvan het veld gegeven wordt door:

$$E_2(t) = \Sigma_2 \cdot \cos(\omega_2 \cdot t)$$

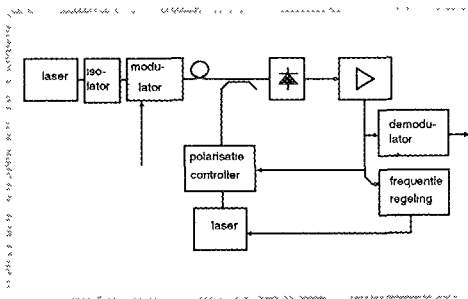
De stroom uit de fotodiode wordt gegeven door:

$$i(t) = C (E_1(t) + E_2(t))^2$$

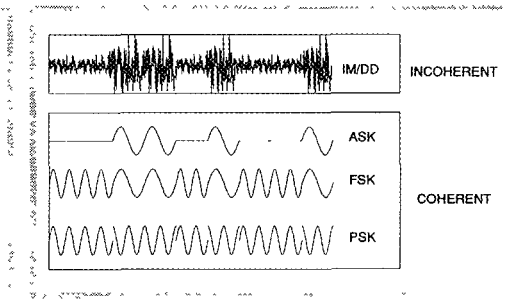
De stroom bevat een signaalterm die evenredig is met:

$$\Sigma_1 \cdot \Sigma_2 \cos[\omega_1 - \omega_2)t + \varphi]$$

Als  $\omega_1 = \omega_2$  spreekt men van homodyne detectie. Wanneer de beide frequenties verschillen vindt heterodyne detectie plaats en ontstaat er een middenfrequent signaal rond de frequentie  $\omega_1 - \omega_2$ . De mengterm bevat de volledige amplitude-, frequentie-, en fasemodulatie van het optische signaal. Zowel bij homodyne als bij heterodyne detectie komt het er op neer dat het gemodu-



Figuur 3  
Glasvezelsysteem met coherente detectie.



Figuur 4  
Modulatievormen in een coherent optisch communicatiesysteem.

leerde signaal van optische frequenties ( $2 \cdot 10^{14}$  Hz) wordt getransformeerd naar elektronische frequenties (nul tot enkele GHz, afhankelijk van de bandbreedte van het over te zenden signaal).

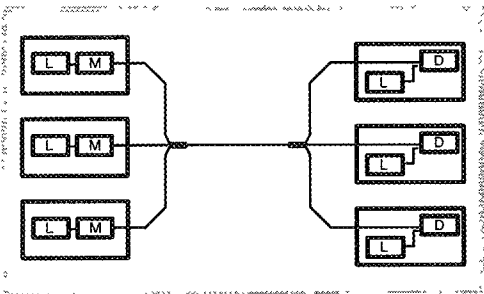
In bovenstaande formule zien we dat de signaalstroom evenredig is met  $\Sigma_2$ . Door een voldoende hoog lokaal oscillatorvermogen toe te voeren is het dus mogelijk de signaalsterkte te verhogen. Bij een juiste dimensionering betekent dit dat de ruis van de versterker geen rol meer speelt voor de uiteindelijke signaal-ruis verhouding. De ruis wordt dan voornamelijk bepaald door statistische fluctuaties in het fotodiodesignaal (zgn. hagelruis of quantumruis). In de praktijk betekent dit een gevoeligheids-winst van 10-20 dB ten opzichte van een directe detectie systeem. Dat wil zeggen dat met een coherent systeem 20-40 km grotere afstanden te overbruggen zijn, of dat in het locale net 10-100 maal zoveel abonnees op een enkele zendlaser kunnen worden aangesloten.

Als we optische communicatiesystemen zouden vergelijken met radiotransmissie-systemen, dan bevinden we ons met directe detectiesystemen in het stadium van de vonkzenders uit het begin van deze eeuw: een ruisachtig signaal wordt verzonden en wordt opgevangen door een niet-selectieve detector (figuur 4, bovenaan). Coherent optische systemen zijn te vergelijken met moderne radio transmissie, waarbij met name AM en FM worden toegepast. De zeer hoge selectiviteit van coherente detectie maakt het in principe mogelijk om duizenden kanalen in golflengte te stapelen, zodat de beschikbare bandbreedte van de glasvezel zeer doelmatig kan worden benut.

### *Eigenschappen van coherente detectie systemen*

#### Informatiecapaciteit

De bruikbare informatiecapaciteit van een coherent systeem is zeer hoog, door het grote aantal te stapelen kanalen. Men spreekt dan van coherent optische frequentiestapeling (Frequency Division Mul-



Figuur 5. Glasvezelsysteem met coherente detectie en frequentiestapeling (FDM).

tiplexing, FDM). In wezen is dit een vorm van golflengtestapeling (zoals die ook in directe detectie systemen gebruikt wordt), maar er zijn een aantal verschillen tussen incoherente WDM en coherent FDM (zie figuur 5):

- Bij WDM is een optische golflengte multiplexer en demultiplexer (of optisch filter) nodig, bij FDM kunnen de optische kanalen aselectief worden gecombineerd en gesplitst.
- Bij FDM met aselectieve optische componenten treden extra fundamentele optische verliezen op, zowel bij het combineren als bij het splitsen van de kanalen. Slechts een gedeelte van het licht komt op de corresponderende ontvanger terecht. Dit wordt gecompenseerd door de hogere gevoeligheid van het coherente systeem en eventueel door het toepassen van optische versterkers. Bij WDM kunnen de spectrale eigenschappen van de golflengte (de)multiplexer worden gebruikt om het licht van de laser uitsluitend naar de corresponderende ontvanger te geleiden.
- Bij WDM is de keuze van de golflengte van de lasers opgelegd door de kanaallegging van de golflengte (de)multiplexer.

plexer. Bij FDM is de ligging flexibel te kiezen

- Het afstemmen bij FDM gebeurt eenvoudig door de locale laser te verstemmen (bijvoorbeeld met de laserstroom). Bij WDM is meestal de kanaalligging vast, tenzij een afstembare golflengte demultiplexer wordt gebruikt.
- De kanaalscheiding bij WDM wordt bepaald door overspraak in de optische demultiplexer en door niet-lineaire optische effecten (vooral Raman verstrooiing). Bij FDM wordt de kanaalscheiding bepaald door de selectiviteit van de elektronische middenfrequent schakeling en eveneens door niet-lineair optische effecten (voornamelijk vier-foton-interactie). Een realistische kanaalscheiding is 1-10 nm (130-1300 GHz) voor WDM en 0.007 nm (1 GHz) voor FDM bij 140 Mbit/s per kanaal. Bij FDM is dus een 100-1000 maal dichtere stapeling bereikbaar.
- Het totaal aantal over te brengen kanalen wordt zowel bij FDM als bij WDM mede beperkt door niet-lineair optische effecten. Er is nog veel onderzoek nodig om de kwantitatieve implicaties hiervan vast te stellen.

### Gevoeligheid

In een ideaal coherent systeem wordt de ontvangergevoeligheid bepaald door de hagelruis van het locale oscillatorsignaal. De locale oscillator moet dan voldoende sterk zijn, en dat kan praktische problemen geven.

Een goed werkend coherent systeem vereist spectraal zuivere lasers. Verbreding van de spectrale laserlijn ontstaat door het optreden van faseruis. Deze faseruis is vooral schadelijk in een systeem dat van fasemodulatie (PSK) of frequentiemodulatie (FSK) gebruik maakt, omdat de faseruis na demodulatie in de signaalband terecht kan komen. Ook synchroon gedetecteerde ASK systemen zijn gevoelig voor faseruis

Voor niet-synchroon detectieschema's is het effect van faseruis aanzienlijk minder. De eisen voor de spectrale laserlijnbreedte zijn voor enkele modulatieschema's gegeven in tabel 1.

Wanneer we er van uit gaan dat de hagelruis limiet wordt bereikt en de faseruis verwaarloosbaar klein is hangt de ontvangergevoeligheid af van het gebruikte detectieschema. Homodyne PSK systemen vertonen de hoogste gevoeligheid (ca. 20 dB gevoeliger dan directe detectie systemen). Bij andere modulatieschema's ligt de gevoeligheid lager.

| detectieschema | degradatie dB tov PSK homodyne (piekvermogen) | max spectrale laserlijnbreedte (percentage van de bitsnelheid) |
|----------------|---|--|
| PSK homodyne   | 0 dB  | 0.03%  |
| ASK homodyne   | 6 dB  | 0.03%  |
| PSK heterodyne | 3 dB  | 0.2%   |
| FSK heterodyne | 6 dB  | 0.2% (synchroon)<br>0.5% (niet synchroon)                      |
| ASK heterodyne | 9 dB  | 10% (niet synchroon)   |

Tabel 1

Gevoeligheid en maximale laserlijnbreedte voor diverse coherente systemen

Een extra mogelijkheid bij coherente systemen is het gebruik van optische versterkers (bijvoorbeeld een halfgeleider laser met een antireflectiecoating op beide facetten of een optisch gepompte glasvezel met speciale dotering). De spontane lichtemissie maakt dergelijke componenten onbruikbaar voor directe detectie systemen, maar de selectiviteit van heterodyne optische ontvangers ondervangt dit probleem gedeeltelijk. Er is nog veel onderzoek op dit gebied nodig.

## Complexiteit

Een bezwaar van coherente detectie is de complexiteit van het systeem. Er zal nog veel onderzoek nodig zijn voordat coherente systemen praktisch kunnen worden toegepast:

- Er moeten betrouwbare lasers met een voldoende smal spectrum worden ontwikkeld. Van de locale oscillator moet bovendien de optische frequentie regelbaar zijn, en veel aspecten van het regelcircuit moeten nog worden onderzocht. In het geval van homodyne systemen moet ook de fase van de locale oscillator geregeld worden (optische phase-locked-loop).
- Er is een actieve polarisatieregeling nodig, of er moeten polarisatiebehoudende glasvezels worden toegepast, hoewel er in sommige gevallen ook polarisatie-onafhankelijke detectieschema's mogelijk zijn.
- Er zijn breedbandige optische ontvangers nodig met een voldoende lage ruis, zodat de hagelruislimiet gehaald kan worden.
- Om de systemen goedkoop en compact te maken zullen veel van de componenten in geïntegreerd-optische vorm moeten worden uitgevoerd (Booth 1985).

Breedbandige geïntegreerd optische fase- en amplitudemodulatoren zijn inmiddels commercieel verkrijgbaar.

Het zal naar verwachting nog 5 tot 10 jaar duren voordat coherente systemen operationeel zullen worden. De potentiële voordelen zijn echter zo groot dat het onderzoek overal ter wereld voortvarend wordt aangepakt. Zo wordt bijvoorbeeld bij het dr. Neher Laboratorium van de Nederlandse PTT het COCOS project uitgevoerd (Coherent Optische Communicatie Systemen) (Bekooij 1987). Er wordt een coherent systeem ontwikkeld waarmee het volledige kabeltelevisiesignaal over een enkele glasvezel kan worden verzonden. Ook bij het Philips Nat. Lab en bij de TU Eindhoven vindt onderzoek aan coherente systemen plaats.

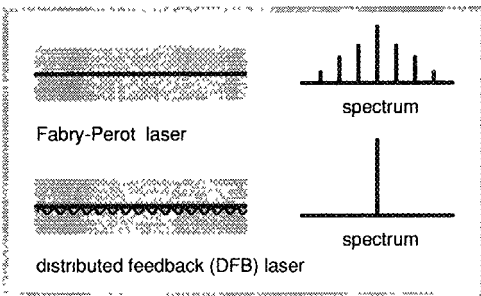
### Realisatie van coherente systemen

De opbouw van een coherent optisch communicatie systeem hangt sterk af van het gekozen modulatie/demodulatie schema. Een algemeen blokschema is gegeven in figuur 3.

Laser (zender en locale oscillator).

Zoals uit tabel 1 blijkt worden er in een coherent systeem hoge eisen gesteld aan de spectrale zuiverheid van de laser. De eerste experimentele coherente systemen werden daarom uitgevoerd met HeNe gaslasers. Voor operationele coherente systemen wordt echter gedacht aan (veel compactere) halfgeleiderlasers, temeer omdat HeNe lasers slechts over enkele honderden MHz afstembaar zijn.

Standaard (Fabry-Perot) halfgeleiderlasers bij 1300 of 1550 nm hebben in het algemeen een multimodus karakter. Dat wil zeggen dat het optische spectrum meerdere spectrale componenten bevat. De totale spectrale breedte is daardoor enkele nm (enkele honderden GHz). Dergelijke lasers zijn voor een coherent systeem onbruikbaar, en er zullen dan ook andere laserconfiguraties nodig zijn (Ebeling 1984). Hier volgen enkele mogelijkheden:



Figuur 6.  
Fabry-Perot laser en DFB laser.

- DFB (distributed feedback) lasers (figuur 6) (Acket 1987). Bij deze lasers is op de laserchip een periodieke verstoring (tralie) in de voortplantingsrichting van het licht aangebracht, in het gebied waar de laserwerking plaatsvindt. Hierdoor wordt één van de spectrale modi bevoorreed waardoor de laser, zelfs onder modulatie, single-mode werking zal vertonen. De breedte van het resulterende spectrum bedraagt onder normale condities ca. 10-50 MHz. Uit tabel 1 is te zien dat de toepassing beperkt blijft tot niet-synchrone detectieschema's DFB lasers zijn inmiddels commercieel verkrijgbaar.
- DBR (distributed bragg reflector) lasers. Ook hierbij is een tralie op de laserchip aangebracht, echter buiten het actieve lasergebied. De spectrale eigenschappen zijn wat beter dan van DFB-lasers, maar de drempelstroom is hoger en de efficiëncy is lager. Bovendien zijn DBR lasers moeilijker te produceren. Overigens gelden dezelfde overwegingen als bij DFB lasers. DBR-lasers zijn nog niet commercieel verkrijgbaar.
- C3 (cleaved coupled cavity) lasers. Single-mode laserwerking wordt verkregen door twee lasers zodanig te koppelen dat van de beide trilholten één mode samenvalt. De geometrie van deze lasers is zeer kritisch en de fabricage is daardoor erg moeilijk. In feite wordt er nauwelijks meer onderzoek aan dergelijke lasers gedaan.

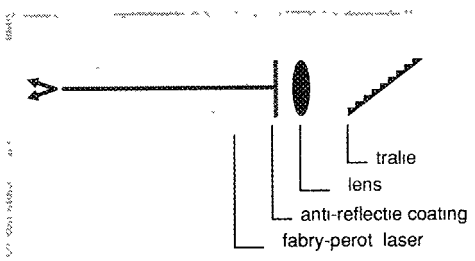
len dat van de beide trilholten één mode samenvalt. De geometrie van deze lasers is zeer kritisch en de fabricage is daardoor erg moeilijk. In feite wordt er nauwelijks meer onderzoek aan dergelijke lasers gedaan.

- Lasers met een extreme trilholte. Voor de meest gevoelige detectieschema's is de spectrale lijnbreedte van Fabry-Perot- of DFB halfgeleiderlasers te groot (tabel 1). Versmalling van de lijnbreedte is mogelijk door de trilholte te verlengen. Volgens de theorie van halfgeleiderlasers is de lijnbreedte namelijk omgekeerd evenredig met het kwadraat van de lengte van de trilholte (Henry 1986). Met een 10 cm lange trilholte is een spectrale lijnbreedte van minder dan 10 kHz gerealiseerd (Wyatt 1985).

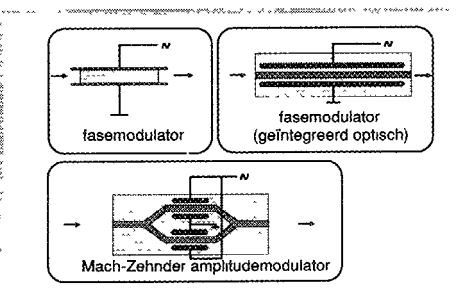
Enkele criteria voor externe trilholte lasers zijn:

- single-mode werking
- voldoende smalle lijnbreedte (dit bepaalt de lengte van de trilholte)
- stabiliteit
- continue afstembaarheid (alleen voor lokale oscillator)

Verschillende configuraties zijn mogelijk. Enkele voorbeelden:



Figuur 7. Halfgeleiderlaser met externe trilholte

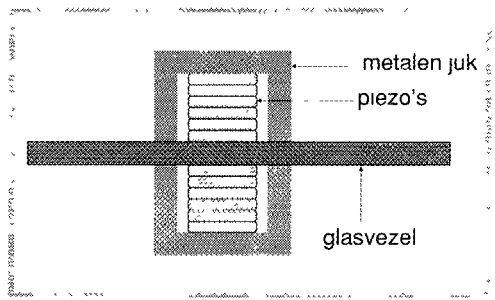


Figuur 8. Optische modulators

- Fabry-Perot laser met externe spiegel. Single-mode werking vindt plaats door de gezamenlijke werking van de interne en de externe trilholtte. Continue afstemming is erg moeilijk. Stabiliteit is voor korte trilholtten realiseerbaar.
- Fabry-Perot laser met antireflectiecoating op één zijde, met externe tralie (figuur 7). De spectrale selectiviteit van de tralie veroorzaakt single mode werking. Mogelijkheden zijn: een lens met een vlakke gekantelde tralie, of een glasvezel met een geëtste tralie. De eerstgenoemde oplossing is continu afstembaar door draaiing van het rooster met gelijktijdige verandering van de trilholtte lengte. De stabiliteit is een probleem.
- DFB laser met externe spiegel (Liou 1987) De DFB laser is van nature single-mode. Continue afstemming is moeilijk maar niet onmogelijk.
- Monolithische externe trilholtte lasers (Kobayashi 1987). Monolithische integratie van de trilholtte heeft grote voordelen voor de stabiliteit en de produktiekosten. De drie bovengenoemde configuraties zijn allen monolithisch gerealiseerd. Door de beperkte lengte is de minimale lijnbreedte ca. 1 MHz, maar in zeer veel gevallen is dit voldoende. Continue afstemming is realiseerbaar door de verschillende secties van aparte elektroden te voorzien. Dit zijn de meest veelbelovende bronnen voor coherente systemen.

### Optische isolator

DFB lasers en lasers met een uitwendige trilholtte zijn bijzonder gevoelig voor terugreflecties in de laser. Er kunnen hierdoor frequentiesprongen en spectrale lijnbreedteveranderingen optreden. Om deze reflecties tegen te gaan wordt gebruik gemaakt van een optische isolator. De werking berust op het Faraday effect, waardoor in bepaalde materialen de polarisatie-richting van het licht draait onder invloed van een uitwendig magnetisch veld. Als materiaal wordt



Figuur 9

Polarisatiebeïnvloeding in een glasvezel door middel van een vezelkneller.

vaak YIG (yttrium ijzergraanaat) gebruikt. Het laserlicht gaat via een polarisator naar het YIG kristal, en het permanente magnetisch veld wordt zo ingesteld dat de polarisatie-richting van het laserlicht in het YIG kristal  $45^\circ$  draait. Eventuele reflecties draaien opnieuw  $45^\circ$  in polarisatie, zodat terugkomend licht loodrecht ten opzichte van het oorspronkelijke laserlicht gepolariseerd is en door de polarisator geblokkeerd wordt.

### Modulator

Bij een aantal coherente FSK systemen is interne modulatie van de laser mogelijk, maar in de meeste gevallen zal het licht extern gemoduleerd moeten worden vanwege de lijnbreedte-eisen voor de laser. Externe modulators maken veelal gebruik van het lineaire electro-optische effect (Pockels-effect). Dit effect, dat optreedt in transparante twee-assige kristallen, houdt in dat de brekingsindex afhangt van een uitwendig elektrisch veld. Hierdoor kan de looptijd van de lichtgolf in het materiaal, en dus de fase van het licht gemoduleerd worden (figuur 8).

Bulk-optische fasemodulators worden vervaardigd door een kristal (1 à 2 mm dik)



van elektroden te voorzien; er zijn vrij hoge spanningen (ca. 100 V) nodig. Eleganter zijn de geïntegreerd optische fasemodulatoren. Deze worden vervaardigd van lithium niobaat, met een golfgeleider van ingediffundeerd titanium. De golfgeleiding vindt plaats door de verhoogde brekingsindex in de (enkele  $\mu$  dikke) golfgeleider. De benodigde spanning is gering (minder dan 10 volt) en de component kan zonder optiek aan glasvezels worden gekoppeld. Deze componenten zijn sinds kort commercieel verkrijgbaar (bandbreedte: 5 GHz, demping ca. 5 dB, voorzien van polarisatiebehoudende glasvezel-pigtail).

Ook geïntegreerd optische amplitudemodulatoren zijn commercieel verkrijgbaar.

Dit zijn in feite twee fasemodulatoren in een mach-zehnder configuratie (figuur 8); het licht wordt gesplitst en met een faseverschil weer gecombineerd; er ontstaat gedeeltelijke uitdoving door interferentie, waarbij de mate van uitdoving door het spanningsgestuurde faseverschil te beïnvloeden is.

Externe frequentiemodulatie is moeilijker te realiseren. Voor een modulaat tot enkele MHz kunnen akoesto-optische modulatoren worden gebruikt, waarbij de lichtgolf in frequentie verschoven wordt door een akoestische golf in een kristal; deze frequentieverschuiving wordt gemoduleerd door de akoestische frequentie te variëren. Voor hogere frequenties kan een combinatie van fasemodulatoren worden gebruikt die met een zwaaiende frequentie worden aangestuurd. De combinatie is zodanig dat door interferentie van het licht uitsluitend één van de (in frequentie zwaaiende zijbanden) overblijft. In bepaalde gevallen is frequentiemodulatie te realiseren door een fasemodulator te gebruiken in combinatie met een integrator (Bekooij 1987)

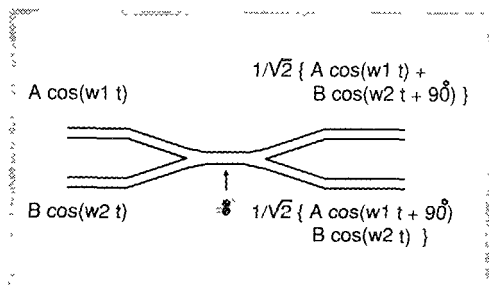
### Polarisatieregeling

Het mengen van het ontvangen licht met het locale oscillator licht werkt alleen goed als de polarisatietoestand van de beide lichtbijdragen overeenkomt. In normale

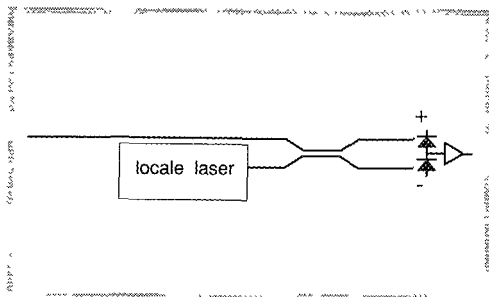
glasvezels blijken grote polarisatie-fluctuaties op te treden, veroorzaakt door trillingen en temperatoureffecten. Er bestaan polarisatiebehoudende vezels met een elliptische kern, of een kern die in één richting onder mechanische spanning staat. Deze vezels zijn nog duur, vertonen vrij veel verliezen, en de polarisatie-eigenschappen zijn nog lang niet ideaal.

Een andere oplossing is het automatisch bijregelen van één van beide polarisatietoestanden (Okoshi 1985; Walker 1987). Dit heeft als voordeel dat het systeem gebruik kan maken van reeds geïnstalleerde normale monomodus glasvezels. Een manier om de polarisatietoestand te beïnvloeden is door gebruik te maken van piëzo-elektrische vezelknellers (figuur 9). Door een elektrische spanning op de piëzo-elementen te zetten wordt de vezel iets ingedrukt, en wordt daardoor dubbelbrekend. Dat wil zeggen dat de brekingsindex voor twee onderling loodrechte polarisatietoestanden verschilt, en hierdoor kan polarisatiedraaiing optreden. Het regelsignaal voor de polarisatieregeling kan worden afgeleid uit de amplitude van het gedetecteerde mengsignaal.

Polarisatiebeïnvloeding met vezelknellers wordt niet gezien als de uiteindelijke oplossing van het polarisatieprobleem. Veel eleganter zou het zijn als de polarisatiebeïnvloeding met een geïntegreerd optisch circuit zou worden gerealiseerd, eventueel in



Figuur 10  
Aaneengesmolten vezelkoppelaar



Figuur 11.  
Compensatie van intensiteitsruis door een gebalanceerde optische ontvanger.

combinatie met de locale laser, de koppelaar, en de optische ontvanger. Aan een dergelijke geïntegreerde coherente ontvanger wordt in diverse laboratoria voorbereidend onderzoek gedaan.

In sommige gevallen is het mogelijk om met polarisatie-optiek en meerdere detectoren een polarisatie ongevoelige coherente ontvanger te realiseren (Glance 1987). Dit vereist een complete signaalverwerking, en er treedt enige systeemdegradatie op.

#### Aaneengesmolten vezelkoppelaar

Bij het combineren van de lichtbijdragen van de zendlaser en de locale oscillator moeten de optische velden op de fotodetector goed samenvallen. Een ideale oplossing vormt de monomodus vezelkoppelaar. Deze wordt vervaardigd door twee glasvezels (zonder coating) onder verhitting te versmelten en enigszins uit te rekken. Hierdoor kernen, waardoor vermogen van de ene in de andere kern wordt gekoppeld (figuur 10).

De koppelverhouding kan door de parameters van het productieproces willekeurig worden ingesteld. Een eigenschap van een

dergelijke koppelaar is dat het relatieve faseverschil van de gecombineerde bijdragen in de ene uitgangstak  $180^\circ$  verschilt met de andere uitgangstak. In de volgende paragraaf wordt een toepassing van deze eigenschap behandeld.

#### Optische ontvanger

De optische ontvanger (Smith 1980) moet zeer breedbandig zijn. Vooral bij FSK en PSK is de bandbreedte van het middenfrequent signaal 2-6 maal hoger dan de bandbreedte van het over te brengen signaal. In theorie zou de ruis van de versterker geen rol spelen, als het vermogen van de locale laser onbeperkt hoog gemaakt kan worden. Dit vermogen is in praktische gevallen echter beperkt, zodat toch naar een ruisarm versterkerconcept moet worden gezocht. Integratie van fotodiode en ingangstrap op één substraat levert de beste resultaten voor ruisarme breedbandige versterkers. Hoewel in principe een zelfde ontvanger als in een directe detectie systeem te gebruiken is, zijn er enkele nieuwe concepten die voordelen bieden.

Enkel voorbeelden:

- Gebalanceerde optische ontvanger. Om de hagelruislimiet te bereiken moet de locale oscillator voldoende sterk zijn. Bij hoge laser vermogens doet zich echter een ander probleem voor: de intensiteitsruis van de laser neemt toe. Het effect hiervan is te reduceren met het in figuur 11 aangegeven principe. De signalen van de twee fotodiodes worden afgetrokken. Door de eigenschappen van de vezelkoppelaar wordt het mengproduct in beide takken opgeteld, terwijl de intensiteitsruis door aftrekking gecompenseerd wordt.
- Afgestemde optische ontvanger (tuned frontend). In een heterodyne systeem ligt het signaalspectrum gecentreerd rond de middenfrequentie. Een optische ontvanger die door middel van een resonantiekring is afgestemd op deze mid-

denfrequentie kan soms voordelen bieden, omdat de versterking tussen DC en de laagste signaalfrequenties wordt onderdrukt, zodat er minder ruis binnenkomt.

**Frequentieregeling van de lokale oscillator**  
Het gedetecteerde mengsignaal bevindt zich rond de verschilfrequentie van de zendlaser en de lokale oscillator laser. Aangezien de frequentie van de zendlaser moeilijk exact constant te houden is, is een automatische frequentieregeling nodig. De frequentie van de lokale oscillator wordt bijgesteld door de laserstroom te variëren. Eventueel moet ook de temperatuur van de laser of de lengte van de uitwendige trillolte worden bijgesteld. Het regelsignaal wordt afgeleid uit het middenfrequent signaal, bijvoorbeeld met een frequentie-discriminator. Deze geeft een uitgangssignaal dat afhangt van de centrale frequentie van het ingangssignaal.

Voor een homodyne systeem is het niet voldoende als de frequentie van de zendlaser en de lokale oscillator gelijk zijn; de beide lasers moeten ook in fase aan elkaar gelockt worden. We spreken dan van een optische phase-locked-loop. Deze is zeer moeilijk te realiseren, en daardoor zal voorlopig de praktische toepasbaarheid van homodyne systemen beperkt blijven.

#### Demodulator

Voor het demoduleren van het door de optische ontvanger geleverde middenfrequentiesignaal gelden dezelfde basisprincipes als voor een demodulator in de radiotechniek. We onderscheiden synchrone en niet-synchrone demodulatie (Garret 1987). Bij synchrone demodulatie (ASK, FSK, PSK) wordt de fase-informatie van het signaal gebruikt; in de coherente ontvanger is een optische (homodyne) of een elektrische (heterodyne) phase-locked-loop nodig. Ook zijn er concepten waarbij meerdere fotodioden gebruikt worden (multiport-detectie of phase-diversity-receivers) (Kazovsky 1987). Bij niet-synchrone demodulatie (ASK, FSK)

wordt een omhullende-detector (ASK) of een frequentiediscriminator (FSK) gebruikt. Een bijzondere klasse vormen de DPSK (differential phase shift keying) systemen, hierbij wordt het signaal overgebracht in de vorm van een faseverschil tussen opeenvolgende symbolen; demodulatie vindt plaats door het signaal te vermenigvuldigen met het over één symboolperiode vertraagde signaal.

#### Conclusie

Monomodus glasvezelkabels bieden de beste mogelijkheden voor breedbandige telecommunicatiesystemen. Er is een afweging gemaakt tussen directe en coherente detectie. Op korte en middellange termijn zullen voorlopig alleen directe detectiesystemen worden toegepast, omdat coherente systemen nog niet voldoende zijn uitontwikkeld.

Directe detectie biedt mogelijkheden om met een relatief eenvoudig systeem vele Gbit/s te transporteren over tientallen kilometers. We moeten ons echter realiseren dat bij een groeiende behoefte aan bandbreedte in de toekomst coherente systemen een belangrijke rol zullen gaan spelen. Ook voor toepassingen in het locale net waarbij de selectiviteit van de detectiemethode en de flexibiliteit van de frequentiestapelning van belang is, zullen coherent optische communicatie systemen naar verwachting een breed toepassingsgebied vinden.

#### Referenties

G.A. Acket en W. Nijman, Recente ontwikkelingen op het gebied van halfgeleiderlasers. Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde A53 (1987) no.1 pp. 22-24.

J.P. Bekooij, E.B. Richard, and A.C. van Bochove, System design aspects of phase modulated optical fibre transmission of analogue CATV signals with non-synchronous heterodyne detection, Proceedings of the 13th ECOC, 1987.

R.C. Booth, Integrated optic devices for coherent transmission. Proceedings of the 11th ECOC, 1985.

R.M. Bulley, M.S. Goodman, H. Kobrinski, C.N. Lo, M.P. Vecchi and C.A. Brackett, Experimental demonstration of LAMBDA-NET. A multiwavelength optical network. Proceedings of the 13th ECOC, 1987.

K.J. Ebeling, Abstimmbare, monomode emittierende Halbleiterlaser. Laser und Optoelektronik 1984 no.3 pp. 176-186.

I. Garret and G. Jacobsen, The effect of laser linewidth on coherent optical receivers with non-synchronous demodulation. Journal of Lightwave Technology LT-5 (1987), no.4 pp. 551-560.

B. Glance, Polarization independent coherent optical receiver. Journal of Lightwave Technology LT-5 (1987) no.2 pp. 274-276.

A.H. Gnauck et al., Information-bandwidth limited transmission at 8 Gb/s over 68.3 km of single-mode optical fiber. OFC 1986, post-deadline paper PDP9.

C.H. Henry, Phase noise in semiconductor lasers. Journal of Lightwave Technology LT-4 (1986) no.3 pp. 298-315.

T.G. Hodgkinson, D.W. Smith, R. Wyatt and D.J. Malyon, Coherent optical fibre transmission systems. Br. Telecom Technol. J. 3 (1985) no.3 pp. 5-18.

K.-Y. Liou, R.T. Ku, T.M. Shen and P.J. Anthony, Oscillation frequency tuning characteristics of fiber-extended-cavity distributed-feedback lasers. Appl. Phys. Lett. 50 (1987) no.7 pp. 380-382.

L. Kazovsky, Recent progress in phase and polarization diversity coherent optical techniques. Proceedings of the 13th ECOC, 1987.

K. Kobayashi, I. Mito, Progress in narrow-linewidth tunable laser sources. Technical Digest OFC/IOOC '87, paper WC1.

T. Okoshi e.a., Polarisation state control schemes of heterodyne or homodyne optical fiber communications. J. Lightwave Technol. LT-3 (1985) p. 1232.

J. Salz, Coherent lightwave communications, Bell Systems Technol. J. 64 (1985) pp. 2153-2209.

J. Salz, Modulation and detection for coherent lightwave communications, IEEE Communications Magazine, 24 (1986) p. 38-49.

R.G. Smith and S.D. Personick, Receiver design for optical fiber communication systems. In: semiconductor devices for optical communications, H. Kressel (ed.), Springer Verlag (1980).

N.G. Walker and G.R. Walker, Polarization control for coherent optical fibre systems. Br. Telecom. Technol. J. 5 (1987) 2 pp 63-76.

R. Wyatt, Spectral linewidth of external cavity semiconductor lasers with strong, frequency-selective feedback. Electronics Letters 21 (1985) no.15 pp. 658-659.

Voordracht gehouden tijdens de 357e werkvergadering.