

Planaire optische versterkers

P.V. Lambeck*, A.J. Faber**, A. Polman***

1. Motivatie

Langs één glasfiber kan in de vorm van optische pulsjes verschrikkelijk veel informatie worden verzonden: de fiber heeft een zeer hoge transmissiecapaciteit. Wanneer echter voor het schakelen van de informatiestroom, of voor het regenereren van de pulsjes, de informatiestroom naar het elektrisch domein omgezet moet worden en v.v., geeft dit een enorme verlaging van deze capaciteit.

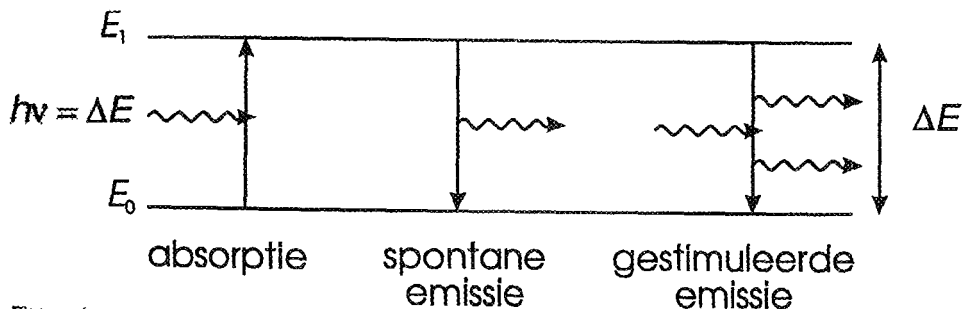
De vraag om de lichtpulsjesstroom zelf te kunnen schakelen is een van de drijvende krachten geweest achter de ontwikkeling van de geïntegreerde optica en resulteerde in de realisatie van electro-optische schakelaars, en uitzicht bestaat zelfs op optisch gestuurde schakelaars. Sinds kort kan regeneratie van de pulsjes met een golflengte rond 1535 nm (door absorptie in de fiber worden de pulsjes verzwakt, door dispersie zakken ze in) ook in het optisch domein plaatsvinden, nu de Er-gedoopte glasfiber-versterkers commercieel geworden zijn

De geïntegreerde optische circuits (optische chips) worden echter steeds com-

plexer, vele schakelaars achter elkaar verzwakken het signaal aanmerkelijk en wanneer ook nog signaalverdelers (Y-juncties) op de chip geplaatst moeten worden, dreigt de uit de chip komende puls-trein in de ruis ten onder te gaan. De noodzaak ontstaat ook op de geïntegreerd optische chips versterkende elementen te introduceren de planaire optische versterker

Door drie Nederlandse groepen, wordt gedeeltelijk onder de paraplu van het innovatieve onderzoekprogramma Electro Optics onderzoek gedaan aan een speciale klasse van planaire versterkers: ni. die waarin de versterking berust op eigenschappen van zeldzame aard ionen zoals het Erbium-ion Er^{3+} . En over dit onderzoek gaat dit artikel

In de paragraaf 2 wordt het principe van de optische versterking (met Er^{3+}) behandeld en worden principiële problemen die zich bij planaire versterkers van dit type voordoen, aangestipt. Daarna komt het onderzoek van de drie groepen, in drie verschillende paragrafen, nader aan de orde.



Figuur 1
Door licht geïnduceerde overgangen tussen twee energie-nivo's

* MESA-Research Instituut, Universiteit Twente

** TNO-TPD, Eindhoven

*** FOM-AMOLF, Amsterdam

2. Optische versterking

Optische versterking berust op door licht gestimuleerde emissie van "aangeslagen" deeltjes.

Verkeert een deeltje in een aangeslagen toestand, dan kan het door spontane emissie van een lichtkwant, met een corresponderende golflengte, $\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$ terugvallen naar de grondtoestand.

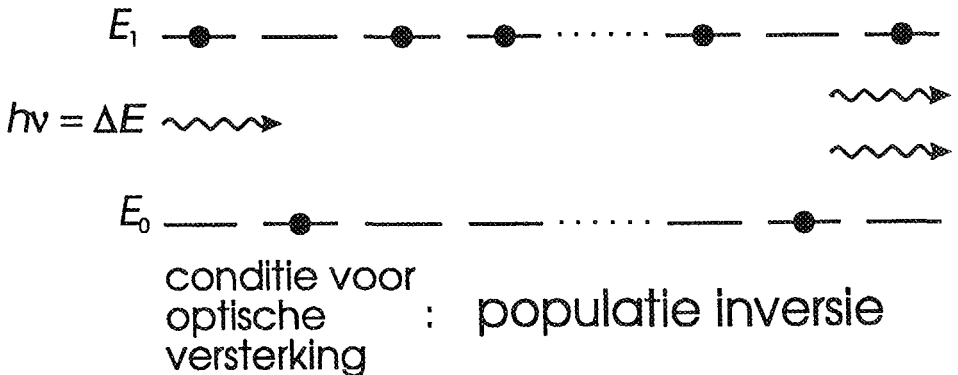
Valt er een lichtbundel met juist deze golflengte op dat deeltje, dan kan deze de terugval extra stimuleren, gestimuleerde emissie. Kan bij spontane emissie het lichtkwant elke willekeurige richting opgaan, bij gestimuleerde emissie voegt hij zich kwa richting en kwa fase bij de stimulerende bundel: deze wordt versterkt. De kans op gestimuleerde emissie wordt groter, naarmate de intensiteit van de stimulerende bundel groter wordt, in praktische situaties is de spontane emissie dan vrijwel verwaarloosbaar.

Zo'n aangeslagen deeltje kan bijdragen aan de versterking, maar een deeltje in de grondtoestand kan zo'n lichtkwant weer absorberen. Om netto een versterking te hebben, moeten er van deze deeltjes meer in de aangeslagen toestand zitten dan in de grondtoestand: de zgn. *populatie-inversie*

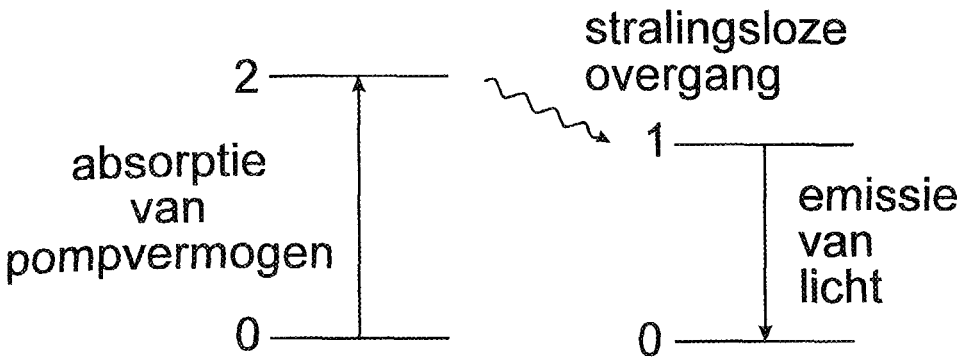
De vraag is nu hoe zo'n populatie-inversie te bereiken? Hierop zijn verschillende antwoorden mogelijk: elektrisch pompen of optisch pompen

Bij elektrisch pompen stuurt men zo een stroom door een p-n overgang, dat daar effectief een populatie-inversie ontstaat in de elektronenbezetting van valentie-band en geleidings-band. De daarop volgende versterking kan niet met Si, maar wel met de zgn III-V halfgeleiders, zoals GaAs, GaAlAs, InP enz., waarbij de precieze chemische samenstelling de versterkbare golflengte of golflengtegebiedje bepaalt. Dit werkt door in de laserwerking van deze materialen. O.a. bij Philips wordt veel onderzoek aan dit type versterkers gedaan.

Bij optisch pompen wordt uiteindelijk zo'n populatie-inversie verkregen door absorptie van het pomplicht. Hiervoor is pomplicht nodig, dat het systeem naar een hogere aangeslagen toestand brengt. In het zgn 3-nivo systeem (fig. 3) worden door absorptie van licht de deeltjes van de grondtoestand naar nivo 2 gebracht; vandaar kunnen ze spontaan of gestimuleerd natuurlijk weer naar nivo 0 teruggaan. De truc is nu zo'n deeltje te vinden, dat het ook en wel bij voorkeur vervalt naar nivo 1 (vaak stralingsloos, de energie wordt dan aan het rooster afgegeven) en daar een tijdje blijft



Figuur 2
Populatie-inversie en optische versterking



Figuur 3
3-nivosysteem, voor optische versterking; 0 → grondtoestand, 1 → (metastabiele) aangeslagen toestand

zitten, d.w.z. de spontane emissie van 1 naar 0 moet traag verlopen, m.a.w. de levensduur τ van toestand 1 moet lang zijn. Bij gegeven pompbundel-intensiteit zal een stationaire toestand ontstaan, waarbij er per tijdseenheid evenveel deeltjes in nivo 1 gepompt worden als er door spontane emissie uitgaan

Het is goed "aanvoelbaar", dat er meer deeltjes in nivo 1 zitten, naarmate de toestroom groter is (pompintensiteit hoger of absorptiecoëfficiënt voor het pomplicht hoger!) en de uitstroom lager (levensduur τ groter). Bij gegeven τ is een drempel pompintensiteit uit te rekenen waarbij evenveel deeltjes in nivo 0 als in nivo 1 zitten: bij iets hogere intensiteit ontstaat de gewenste populatieinversie!

Sturen we nu een lichtpulsje met een golflengte, $\frac{hc}{V_{em}}$ door het materiaal, dan

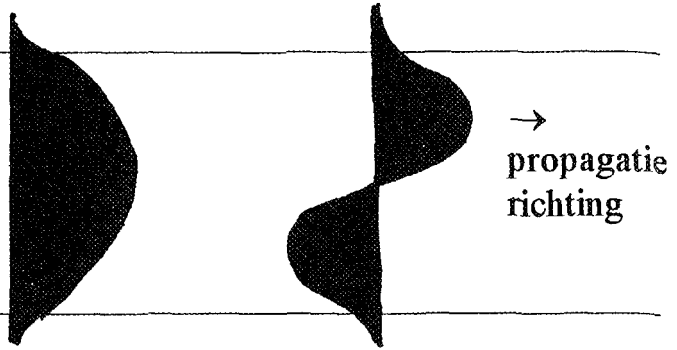
"regenen", gestimuleerd door de intensiteit van het pulsje, een aantal aangeslagen systemen uit en wordt het pulsje versterkt. Het Er^{3+} -ion is een representant van zo'n 3-nivo systeem. Het Er^{3+} -ion is een zgn. zeldzame aard ion met een onvolledig gevulde 4f-electronenschil. De relevante optische overgangen vinden plaats binnen de 4f-schil. Omdat de 4f-electronen van de omgeving afgeschermd worden door 5s en

5p electronen, zijn de energieverschillen tussen de nivo's nauwelijks gevoelig voor de omgeving waarin het Er^{3+} -ion geplaatst wordt: in elke omgeving correspondeert de 1→0 overgang met een golflengte van ca. 1535 nm, en dit ligt juist in het derde telecommunicatievenster! De 4f-overgangen zijn relatief zwak, waardoor ook de levensduur van nivo 1 relatief groot is: 10-15 msec

Beide eigenschappen, $\lambda_{emissie} \approx 1535$ nm en $\tau \approx 15$ msec, maken het Er^{3+} -ion een uitstekende kandidaat als drager van de optische versterking in het 3e telecommunicatievenster. Omdat de 1→0 overgang hier t.g.v. het Stark-effect nog wat opgesplitst is, ontstaat een ca. 100 nm brede emissieband, wat het uitzicht biedt dat ook over dit golflengte-interval versterkt kan worden, wat zeer gunstig is als men kanalen van diverse golflengte zou willen definiëren

De glasfiberversterkers bevatten een glasvezelstuk met een lengte van enkele meters, waarin Er^{3+} -ionen in een lage concentratie zijn opgenomen. Het pomplicht wordt in deze vezel gestuurd, waarhet door absorptie door het Er^{3+} -ion (gewenst!) en andere verliesmechanismes (ongewenst, maar in een fiber erg laag verzwakking hierdoor ~ 1 dB/km) verzwakt wordt. Na bepaalde afstand is ze verzwakt tot de drempelintensiteit en daarna kan ze

lichtgeleidende laag



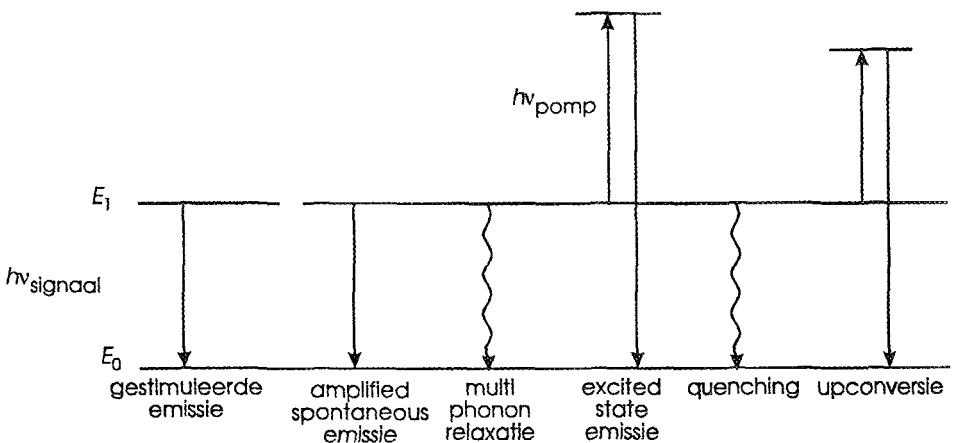
Figuur 4
Veldverdelingen van een 0^e en 1^e orde mode

geen inversie meer opwekken; bij deze afstand moet juist de Er^{3+} -dope ophouden! Door dezelfde vezel lopen de lichtpulsjes. Voor de gestimuleerde emissie zijn de intensiteiten van belang. Omdat de effectieve doorsnee van een monomode glasfiber klein is (kern diameter $\sim 5 \mu$) en van planaire lichtgeleiderkanalen nog kleiner ($0,5 \times 4 \mu^2$), kunnen met relatief lage absolute vermogens hoge intensiteiten verkregen worden.

In een lichtgeleider propageert het licht in bepaalde patronen van de intensiteit, die

zgn. modes, met voor elke patroon een gegeven snelheid

In de fig 4 zijn de elektrisch veldverdelingen van de zgn. 0^e en 1^e mode aangegeven die zich in zgn slabguides in de z-richting bewegen. Wij beperken ons en dat is in de praktijk vaak zo, tot lichtgeleiders die voor elke golflengte maar één geleide mode, de 0^e orde mode kunnen bevatten: monomode golfgeleiders. We zien, dat de intensiteit x-afhankelijk is, en zowel de populatie-inversie veroorzaakt door de pompmode, als de signaalintensiteit die de gestimuleerde emissie opwekt



Figuur 5
Parasitaire effecten bij optische versterking

zijn dan ook plaats-afhankelijk. Hoewel dit de zaak compliceert, zijn deze complicaties goed in rekening te brengen.

Deeltjes in toestand 1 dragen niet altijd bij tot de versterking, er zijn parasitaire effecten: (fig. 5).

- 1 De amplified spontaneous emission (ASE): spontaan geëmitteerde fotonen kunnen zich ook vermeerderen door van nivo 1 snoepen; omdat een deel van deze spontane, en daarna versterkte emissie terecht komt in de geleide mode maar dan met een willekeurig faseverschil t.o.v. te versterken bundel, uit zich dit ook als ruis!
- 2 Nivo 1 kan ook zijn energie aan de trillingen van het rooster afgeven. De kans hierop wordt kleiner als de dominante roostertrillingen een lagere frekwentie hebben. Dit is een belangrijke factor bij de keuze van het gastheermateriaal, waarin het Er^{3+} ion opgenomen wordt.
- 3 Bij enkele pompgolflengtes kan een deeltje vanuit nivo 1 door absorptie van een pompfoton naar een hogere aangeslagen toestand overgebracht worden, de zgn. excited state absorption (ESA). Dit is een belangrijke factor voor de keuze van de pompgolflengte.

In planaire versterkers kan het actieve kanaal niet meters lang zijn, enkele cm's is het maximum. Om toch voldoende versterking te krijgen, moet dan de Er^{3+} -concentratie veel hoger zijn. Dit betekent, dat aan het gastheermateriaal de eis gesteld wordt, dat het deze hoge Er-concentratie moet kunnen accepteren. Daarnaast blijkt echter zo'n hogere concentratie tot extra-effecten te leiden, de zgn. stralingsloze energiemigratie, waardoor uiteindelijk ook deeltjes uit toestand 1 nutteloos weggenomen kunnen worden.

Deze energiemigratie houdt in dat de aangeslagen energie ΔE van het ene Er^{3+} -ion stralingsloos op een naburig Er^{3+} -ion kan overgaan. De waarschijnlijkheid hiervoor is evenredig met de onderlinge afstand tot de macht $(-6)!$, en neemt dus buitengewoon

snel met de afstand af. Bij de gewenste concentraties is deze energie-overdracht echter zeer waarschijnlijk en het aanslag-energiepakketje zal over niet te verwaarlozen afstand door het systeem kunnen diffunderen voordat het uitgestraald wordt. Als het tenminste uitgestraald wordt! Ook binnen het zuiverste gastheermateriaal zijn nog verontreinigingen aanwezig, die ook dit energiepakketje kunnen oppikken, maar niet doorgeven maar a.h.w. opeten: de energie wordt aan de roostertrillingen overgedaan. Het deeltje fungeert als een dover en dit verschijnsel heet quenching.

Daarnaast kan een energiepakketje worden overgegeven aan een Er^{3+} -ion dat al in aangeslagen toestand verkeert, en dan naar een hogere aangeslagen toestand gaat, van waaruit het uitgestraald wordt (up conversion). Bij hoge Er^{3+} -ionenconcentratie geeft zelfs pomplicht van 1480 nm door deze upconversie een duidelijk zichtbare groen emissie!

De energiemigratie is sterk als alle Er^{3+} -ionen precies dezelfde ΔE i.e. dezelfde afstand tussen nivo 1 en 0 hebben. Is ΔE ongelijk dan neemt de waarschijnlijkheid voor energieoverdracht sterk af. Een verschil in ΔE is te creëren doordat de Er^{3+} -ionen een iets verschillende omgeving zien, wat eisen stelt aan het gastrooster.

Al deze storende verschijnselen bieden het Er^{3+} extra wegen om naar de grondtoestand terug te gaan. De verhouding tussen ongewenste en gewenste processen kan tot uiting gebracht worden in het zgn. quantum rendement: het percentage van de geabsorbeerde pompfotonen, dat in emissie van licht van de gewenste frekwentie resulteert. Ook kan ze worden teruggevonden in de levensduur van de metastabiele toestand: makkelijk begaanbare storende parallelpaden geven een korte levensduur.

We zien dat eigenschappen van het materiaal waarin het Er^{3+} -ion is opgenomen

een belangrijke rol spelen bij de optische versterking. Daarnaast moet het gastheermateriaal, natuurlijk ook geschikt zijn om er de geïntegreerd optische lichtgeleider kanalen in aan te brengen. Bovendien moeten we een technologie in huis hebben, waarmee het Er^{3+} -ion in het materiaal opgenomen kan worden. Men kan aanvoelen, dat Er^{3+} -concentratie (-verdeling) de geometrie van het lichtgeleider, de gekozen pompgolflengte en -intensiteit, de optische versterking sterk kunnen beïnvloeden. Zie daar het speelveld

De drie groepen hebben, binnen dit veld, verschillende benaderingen gekozen:

- Universiteit Twente gaat uit van een uit luminescentie bekend gastheermateriaal Y_2O_3 , en kijkt of hiermee ook geïntegreerd optische circuits zijn te maken
- TNO-TPD zoekt naar glassamenstellingen, die goed zijn als gastheermateriaal, niet alleen voor Er^{3+} -ionen maar ook

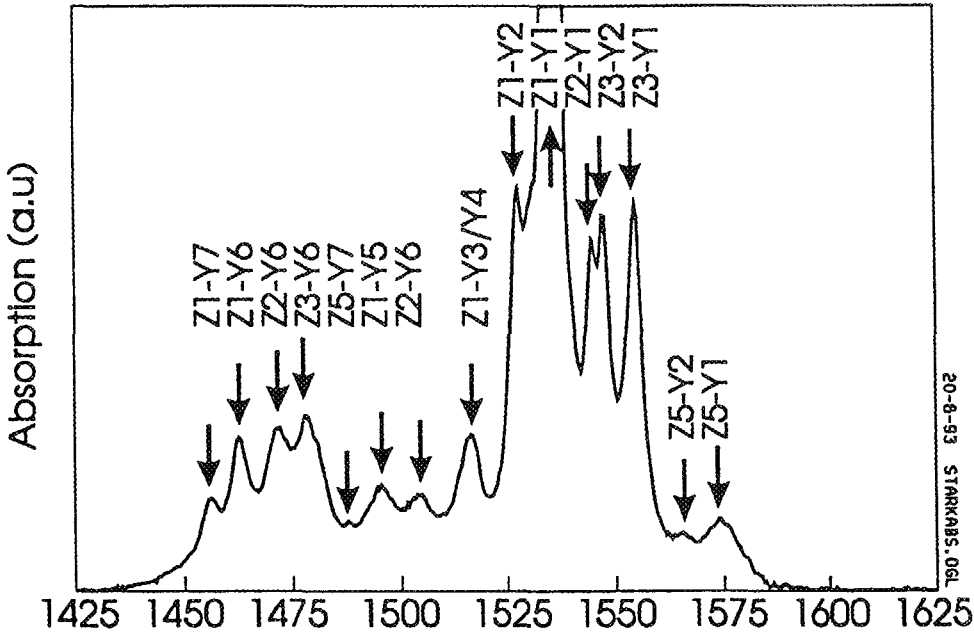
voor Pr^{3+} -ionen die bij 1300 nm (tweede telecomunicatie-venster) emitteren.

- FOM-AMOLF gaat uit van bekende lichtgeleider materialen en schiet daar d m.v. ionen-implantatie de Er^{3+} -ionen in

Alle groepen onderzoeken hoe binnen de door hen gekozen randcondities, het spel gespeeld moet worden om tot een optimale versterker te komen.

3. Versterking met Er^{3+} opgenomen in Y_2O_3

In Twente heeft men gekozen voor Y_2O_3 als gastheer materiaal voor de Er^{3+} -ionen. Uit de luminescentie literatuur is bekend dat het Er^{3+} -ion uitstekend de plaats van het bijna even grote Y^{3+} -ion kan innemen. Ook de lage dominante fonon energie (400 cm^{-1}) was aantrekkelijk, omdat zo de storende multiphonon relaxatie vrijwel verwaarloosbaar zou zijn. Ook wist men dat in dit materiaal de metastabiele E_1 -toestand van het Er^{3+} -ion een relatief lange levens-



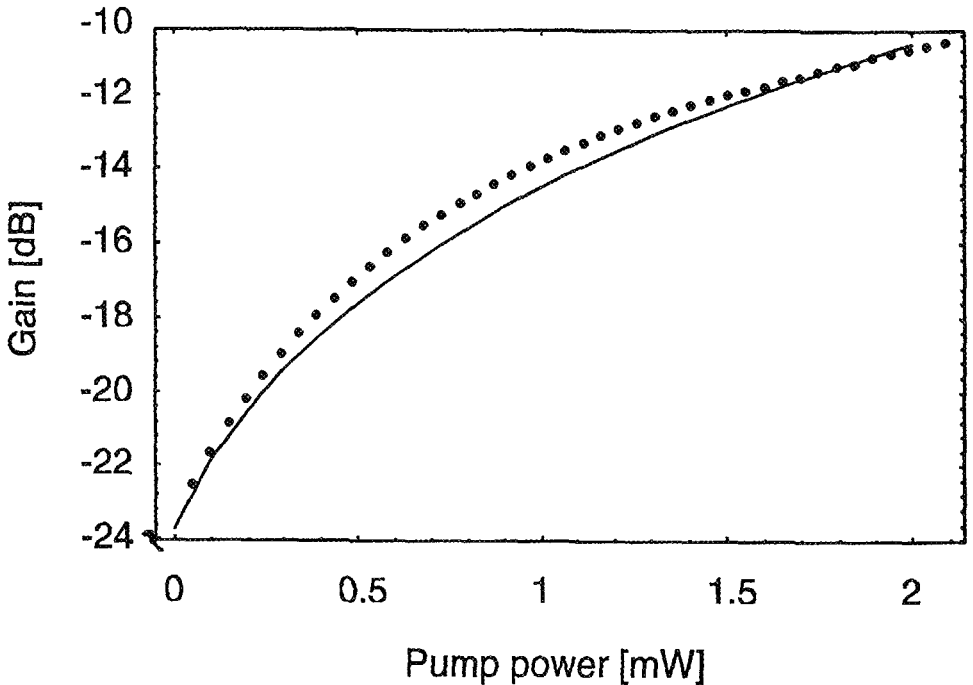
Figuur 6
Absorptiespectrum van Er^{3+} -gedoteerde Y_2O_3 in het golflengtegebied 1425-1625 nm

duur van ca 10 msec kan hebben. De belangrijke vraag of dunne Y_2O_3 lagen en hierin lichtgeleiderkanalen met lage verliezen gemaakt zouden kunnen worden, kon op basis van eigen onderzoek bevestigend beantwoord worden: Door reactief sputteren met gebruik van Y en Er sputterguns en toepassing van fotolithografie en ion-beam etching bij de kanaalvorming, waren uiteindelijk heel reproduceerbaar lichtgeleiderkanalen met (achtergrond-)dempingen lager dan 1 dB/cm bij 1535 nm te maken, een heel acceptabele waarde.

Het Er^{3+} -ion kan afhankelijk van het vermogen dat aan het sputtergun toegevoerd wordt in elke gewenste concentratie aangebracht worden. Het Er^{3+} -ion bleek overal heel netjes geplaatst te zijn, wat onder andere geconcludeerd kon worden uit het feit dat in de absorptie en emissiespektra van de "1535 nm" overgang de zgn. Stark-fijnstructuur heel duidelijk zichtbaar was

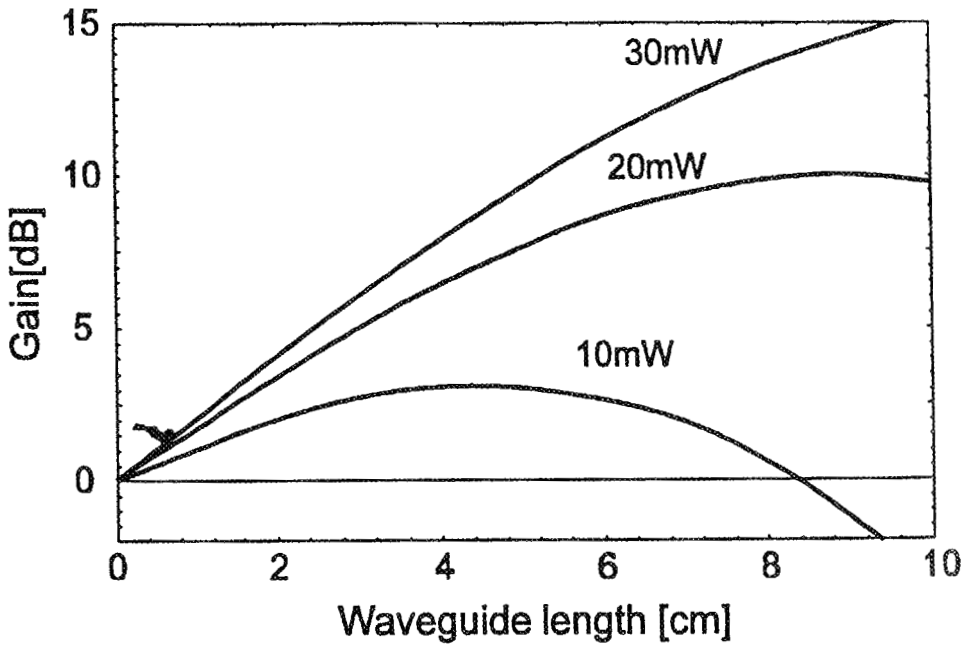
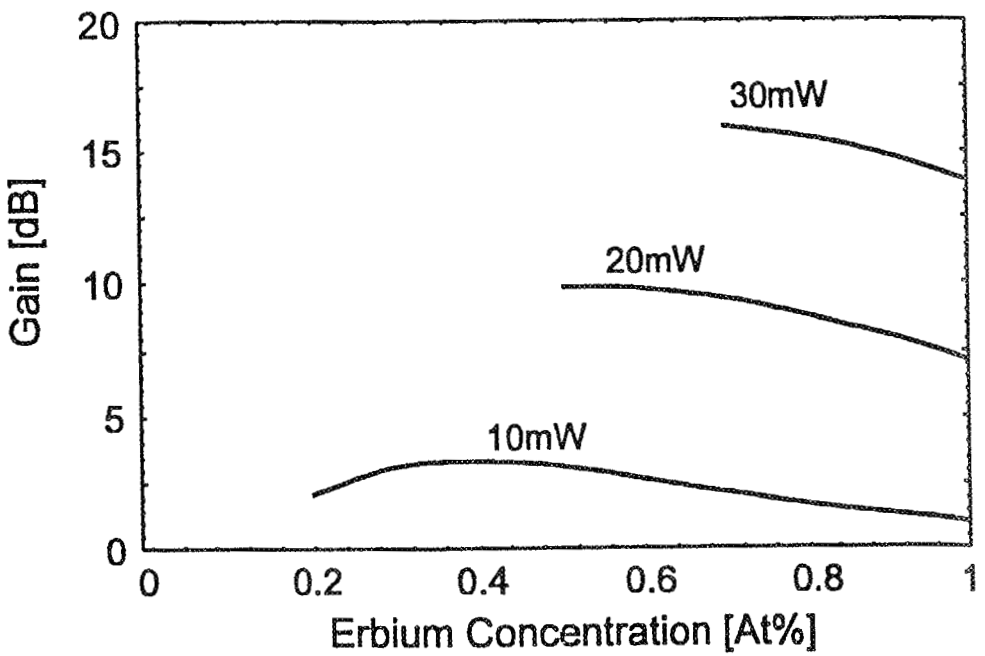
(zie fig. 6). Dit betekent enerzijds dat de 1535 nm versterking relatief hoog kan zijn, maar dat ze anderzijds sterk golflengte-afhankelijk zal zijn, wat het materiaal in deze vorm voor golflengte multiplexing ongeschikt maakt. Ook bleek bij hogere concentraties en hogere 1480 nm pomp vermogens naast het 1535 nm licht duidelijk zichtbaar groen licht uitgestraald te worden, wat op een flinke upconversie wijst.

Een versterkingsmodel is opgesteld en in software geïmplementeerd, waarin het modale gedrag, de achtergrond verliezen, de quenching en de upconversie geïncorporeerd zijn. Alle modelparameters konden op onafhankelijke manier gemeten worden. De zo berekende en gemeten versterkingscurves bleken onderling goed overeen te komen (fig. 7). Dit betekent dat het model goed voor theoretische optimalisatie gebruikt kan worden. Uit de curves van fig. 7 is direct af te lezen dat in de betreffende



Figuur 7
Versterking als functie van het pompvermogen

experimenteel, — berekend



Figuur 8

8 a Maximale versterking als functie van de erbium concentratie bij verschillende pompvermogens

28 b Versterking als functie van de lengte van de versterker bij een erbium concentratie van 0,5 at %

versterker bij niet-pompen de demping hoog is, liefst -25 dB. Dit komt natuurlijk doordat nu het signaallicht door de 0→1 overgang wordt geabsorbeerd. Als 2mW 1480 nm pompvermogen (en dit is een lage waarde!) door het kanaal wordt opgenomen kan dit verlies al tot -10 dB gereduceerd worden (een relatieve versterking van 15 dB). Verder rekenwerk voorspelt dat voor deze versterker bij een ingestuurd pompvermogen van 10mW absolute versterking zou worden waargenomen. Dit kon tot nu toe niet geverifieerd worden, omdat enerzijds de pomplaser in vermogen beperkt is, anderzijds de efficiency van inkoppeling van het laserlicht nog laag is (ca. 10%). Er bestaan echter opties om deze efficiency aanzienlijk te verhogen en hieraan wordt hard gewerkt.

Verdere simulaties lieten zien, dat bij 0,5 dB/cm achtergrond verlies en kanaallengtes kleinder dan 10 cm, bij opgenomen pompvermogens van 10, 20 en 30mW absolute versterkingen van resp. 4, 10 en 16 dB verwacht mogen worden bij 1535 nm (zie fig. 8). Hiermee is zeker niet de limiet bereikt, o.a. verdere optimalisatie van materiaal, introductie van een Er^{3+} -verdeling over de dikte en introductie van taperachtig structuur kanalen kan het versterkingsgedrag nog aanzienlijk verbeteren en mits er voldoende financiële support van externe geldgevers gevonden kan worden, lijkt een heel aardig device gerealiseerd te kunnen worden.

Er bestaat ook perspectief dat door variatie in chemische samenstelling van het moeder materiaal (a h.w. toevoegen van andere ionen, zoals Al^{3+}), een zekere variatie in de Er^{3+} -ion omgeving verkregen kan worden, waardoor de Stark emissielijnen zo breed worden, dat ze elkaar heel sterk gaan overlappen. Het emissiespectrum rond 1535 nm wordt dan een brede band. Hierbij zakken de toppen natuurlijk wel in. Versterking over een breder golflengte gebied zou dan goed mogelijk worden

4. Optische versterking met Er^{3+} en Pr^{3+} in glazen

Eén van de onderzoeksthema's van de Glasgroep van TNO-TPD betreft de ontwikkeling van geavanceerde glassystemen voor opto-elektronische toepassingen. Op dit moment richt het onderzoek zich op nieuwe glasachtige materialen, gedoteerd met zeldzame aard-ionen, voor toepassing in optische versterkers, met name:

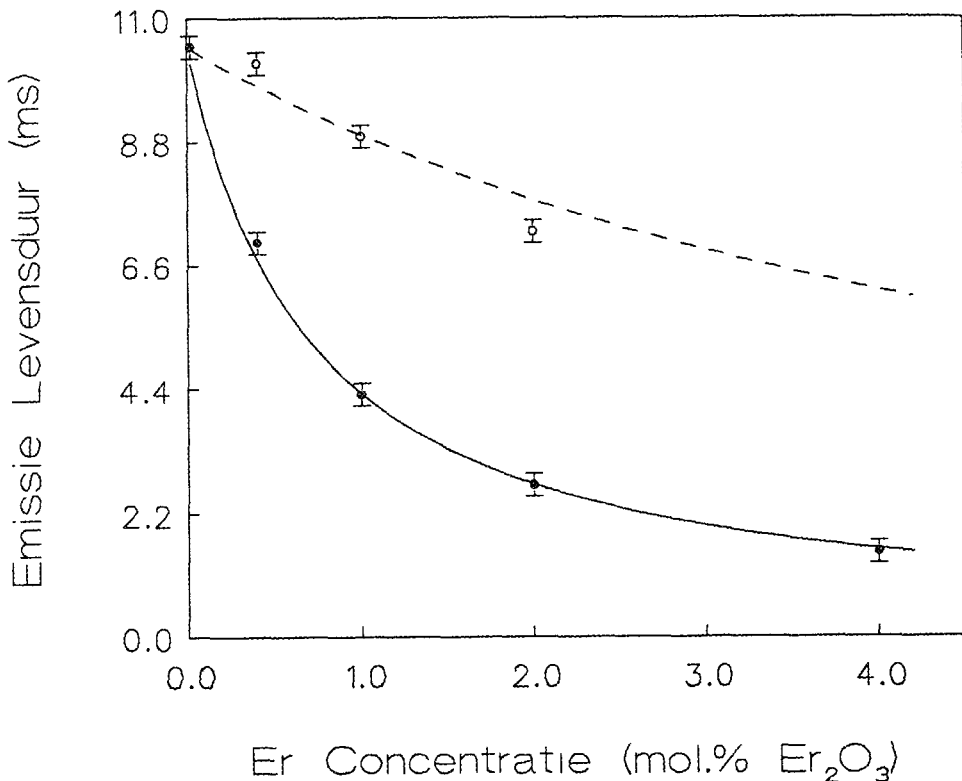
- a) Er-gedoteerde fosfaatglazen voor planaire versterker bij 1 55 μm ;
- b) Pr-gedoteerde chalcogenide glazen voor glasvezelversterkers bij 1 3 μm ,

In het volgende zal een korte beschrijving worden gegeven van bovenstaande onderzoeksactiviteiten.

a) Er-gedoteerde planaire versterkers bij 1 55 μm

Voor de realisatie van een 1.55 μm planaire optische versterker moeten hoog-Er-gedoteerde golfgeleider-structuren worden ontwikkeld. Met het oog op structurele en optische eigenschappen eigenschappen is gekozen voor multi-komponent fosfaatglas als basis-matrixmateriaal voor de Er-ionen. Deze keuze is voor een deel gebaseerd op het ionische karakter van de chemische bindingen in bepaalde fosfaatglazen in combinatie met een relatief groot aantal stabiele sites voor de Er-ionen. Dankzij deze eigenschappen kunnen de Er-ionen in hoge concentraties (typisch 1 at%) in deze glazen worden ingebouwd, zonder dat de fotoluminescentie-eigenschappen van het Er bij 1.55 μm nadelig worden beïnvloed. Het rendement van de Er-emissie bij 1 55 μm in de fosfaatglazen wordt echter wel verlaagd door de aanwezigheid van hydroxyl (OH-)groepen, die fungeren als dovers (quenchers).

In het onderzoek is een groot aantal fosfaatglazen met verschillende Er-doteringsnivo's gesmolten en optisch gekarakteriseerd (o.a. door fotoluminescentie- en IR-spektroskopie). Speciale warmtebehandelingen bij 1000 - 1200°C onder een atmos-



Figuur 9

Emissie levensduur als functie van de Er-concentratie in fosfaatglazen vóór (getrokken lijn) en na (onderbroken lijn) een warmtebehandeling bij 1200°C. De discrete punten geven de meetwaarden aan en de getrokken en onderbroken lijnen de voorspelling volgens het energie-overdracht model.

feer van zuivere Ar zijn toegepast voor het verwijderen van de OH-groepen. Dankzij deze behandeling vertoont het Er in de fosfaatglazen een efficiënte fotoluminescentie bij 1.55 μm , ook bij hoge Er-concentraties (quantumrendement ca 70% bij een doteringsnivo van ca. 1 at%). Dit is een eerste vereiste voor een efficiënte optische versterker.

Voor een theoretische beschrijving van de effecten van Er-concentratie en OH-verontreinigingen op de fotoluminescentie bij 1.55 μm is een model opgesteld, dat gebaseerd is op het overdragen van de excitatie-energie van het ene Er-ion naar het andere. Tijdens deze energiemigratie kan het energiepakketje door een naburige

OH-groep worden ingevangen en daar uiteindelijk in warmte worden omgezet (quenching). Experiment en model blijken goed met elkaar overeen te komen (zie fig. 9). Uit deze figuur blijkt dat de warmtebehandeling voor het verwijderen van de OH-groepen de levensduur van het emitterende nivo aanzienlijk verlengt. Dit past in het beeld dat door de afname van het aantal quenchers de parallelweg naar de grondtoestand, die overeenkomt met het doingsproces, a.h.w. smaller is geworden. Op dit moment worden verschillende technieken bestudeerd voor de fabricage van dunne films en planaire golfgeleiders in de Er-gedoteerde fosfaatglazen, waaronder - depositie van Er-gedoteerde glasfilms

- m.b.v. laser-ablatie gevolgd door lithografie en etsmethodes voor het aanbrengen van lichtgeleiderkanaaltjes
- depositie van Er-gedoteerde glasfilms m.b.v. RF-sputteren, weer gevolgd door lithografie en etsen.
- lokale (in kanaaltjes) ionenuitwisseling in Er-gedoteerde bulkglazen voor het lokaal aanbrengen van brekingsindexvariaties om op deze manier planaire lichtgeleiders te maken

Optische karakterisatie van de planaire structuren door fotoluminescentiespektroskopie en door optische versterkings- en dempingsmetingen zal moeten uitwijzen welke techniek het meest geschikt is voor een efficiënte Er-gedoteerde optische versterker.

b) Pr-gedoteerde glasvezelversterker bij 1,3 μm

Het onderzoek aan Pr-gedoteerde glas-systemen is weliswaar gericht op de ontwikkeling van een glasvezelversterker voor licht met een golflengte van 1,3 μm , maar is ook zeer relevant voor de ontwikkeling van een overeenkomstige planaire optische versterker

Voor de ontwikkeling van zo'n optische versterker, is het noodzakelijk dat het Pr-ion wordt ingebouwd in een glasachtige matrix met laag-energetische fononen (roostertrillingen). Gangbare oxidische glassamenstellingen die worden gebruikt voor de optische vezel zijn hiervoor niet geschikt. Daarom worden nieuwe, Pr-gedoteerde, glassamenstellingen onderzocht op basis van Ge-sulfide (GeS_2), die optisch transparant zijn in het relevante golflengtegebied en daarbij een laag-energetisch fononspectrum vertonen.

In het experimentele werk wordt veel aandacht besteed aan een optimale bereiding van Pr-gedoteerd GeS_2 -glazen, die moet plaatsvinden onder water- en zuurstofvrije atmosfeer in afgesloten kwarts ampullen. Op basis van optische IR-metingen is het fononspectrum van de glasmatrix bepaald. De dominante fononenergie in de GeS_2 -

glazen bedraagt 370 cm^{-1} , wat aanzienlijk lager (dus beter) is dan de fononenergie in gangbare oxide (silicaat-) glazen (ca. 1100 cm^{-1}). Het fotoluminescentie-spectrum van Pr in de GeS_2 -glazen vertoont een maximum bij 1,34 μm . De maximale oplosbaarheid van Pr in mono-komponent GeS_2 -glazen is onderzocht en bedraagt maximaal zo'n 200 ppm. Voor praktische toepassing in glasvezelversterkers is dit niveau te laag. Boven dit concentratieniveau vertoont het matrixglas echter sterke kristallisatie. Daarom richt het onderzoek zich nu op verhoging van het Pr doteringsniveau, door toevoeging van andere sulfidecomponenten aan de GeS_2 -glazen (voor openbreken glasstructuur). Uit recente experimenten is gebleken dat door toevoeging van zo'n 20 (mol)% Ga_2S_3 aan een GeS_2 -glas de oplosbaarheid van Pr sterk kan worden verhoogd, met minimaal een factor 10.

Het theoretische werk binnen het project concentreert zich op de volgende onderwerpen:

- de modellering van het fonon-energiespectrum van GeS_2 -glazen,
- de analyse van de fotoluminescentiekarakteristieken van Pr in verschillende glasmatrices m.b.v. de zgn. Judd-Ofel'tmethode

Op basis van een combinatie van theoretische en experimentele resultaten wat betreft het rendement van de 1,3 μm emissie van Pr in verschillende glassystemen en de werkzame doorsnede voor deze emissie, kan een voorspelling worden gegeven van de te bereiken optische versterking in Pr-gedoteerde chalcogenide (sulfide) glasvezels.

5. Synthese van optische versterkermaterialen met ionen bundels.

Ionon implantatie

Ionon bundels worden in de halfgeleiderindustrie veelvuldig gebruikt voor het "doteren" van silicium. Met behulp van een deeltjesversneller worden bijvoorbeeld fosfor-ionen met een energie van enkele tientallen of honderden kilo-electron-volts

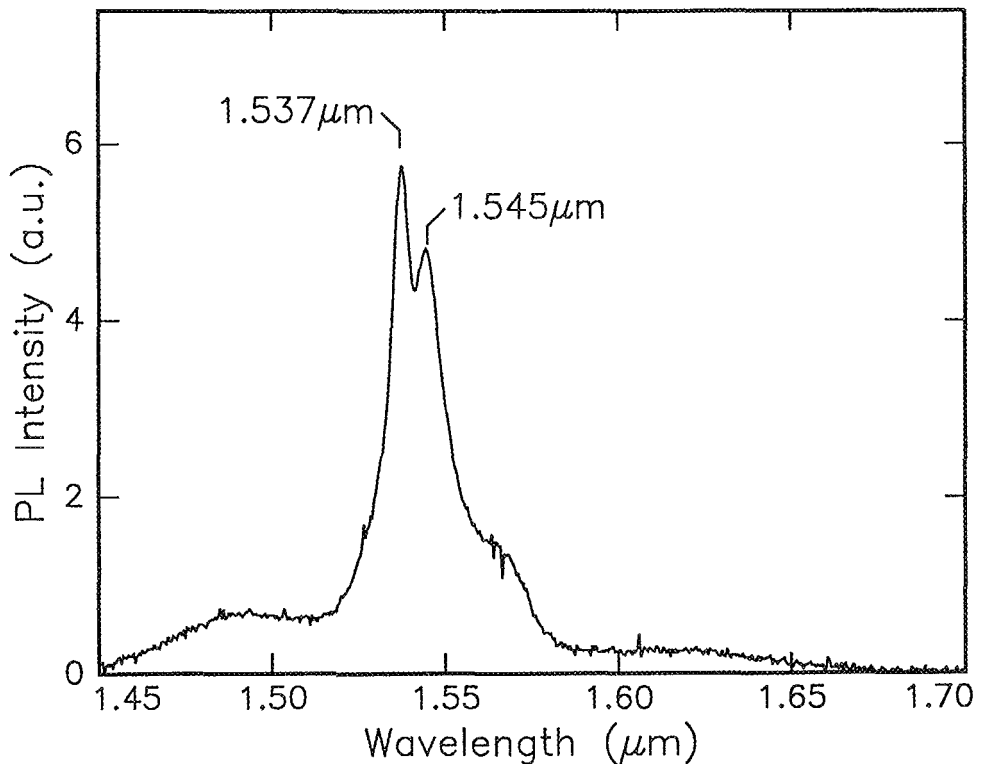
op een silicium preparaat geschoten en erin "geïmplanteerd". Wereldwijd staan duizenden van zulke versnellers opgesteld waarmee op deze manier transistoren en geïntegreerde schakelingen worden gemaakt. Het ligt voor de hand om te onderzoeken of de implantatietechniek ook kan worden toegepast voor de synthese van nieuwe optische materialen

Door de implantatie-energie juist te kiezen kan het diepte-profiel van de te implanteren deeltjes worden bepaald, terwijl de concentratie wordt bepaald door de implantatie-dosis. Een voordeel van implantatie boven andere technieken is dat door het "niet-evenwichts" karakter van de techniek uitzonderlijk hoge concentraties

van het te implanteren deeltje kunnen worden bereikt. Verder is implantatie een techniek die gemakkelijk is te integreren met andere processtappen in geïntegreerde optische technologie. Implantatie wordt ook vaak toegepast om te demonstreren dat een bepaald materiaal kan worden gemaakt. Als blijkt dat zo'n nieuw materiaal veelbelovende eigenschappen bezit, kunnen daarna andere fabricageprocessen worden ontwikkeld om het materiaal op een simpelere of goedkopere manier te maken.

Erbium implantatie voor geïntegreerde optische versterkers

Op het FOM-Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica (AMOLF) wordt implantatie van

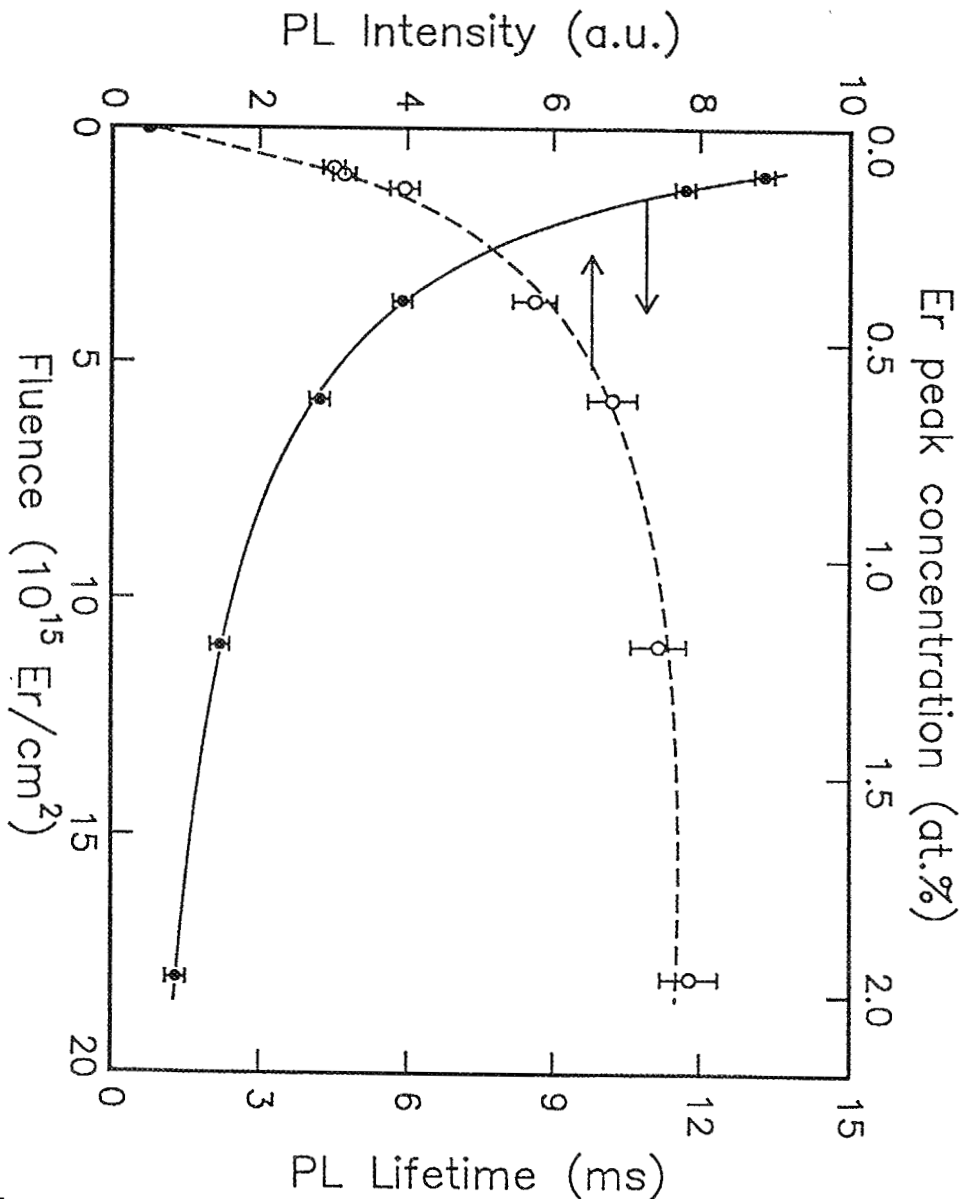


Figuur 10

Fotoluminescentiespectrum van Er-geïmplanteerd natrium-silicaat glas. De implantatie energie was 500 keV, de dosis 3.7×10^{15} Er/cm² (0.4 at % piek concentratie). Na het implanteren is een warmtebehandeling toegepast (500°C, 1 uur).

Er ionen in twee verschillende lichtgeleidermaterialen bestudeerd: natrium-silicaat glas (onderzoek van Edwin Snoeks), en dunne films van Al_2O_3 (onderzoek van

Gerlas van den Hoven). In het natrium silicaat glas kunnen met behulp van een ionen-uitwisselingsproces kanaallichtgeleiders gemaakt. Deze kanalen kunnen met



Figuur 11

Intensiteit van de Er luminescentie bij $1.54 \mu\text{m}$ als functie van de Er implantatiedosis/concentratie. De implantatie-energie was 500 keV en een warmtebehandeling bij 500°C , 1 uur is toegepast. De luminescentie-levensduur bij $1.54 \mu\text{m}$ is ook weergegeven als functie van de dosis

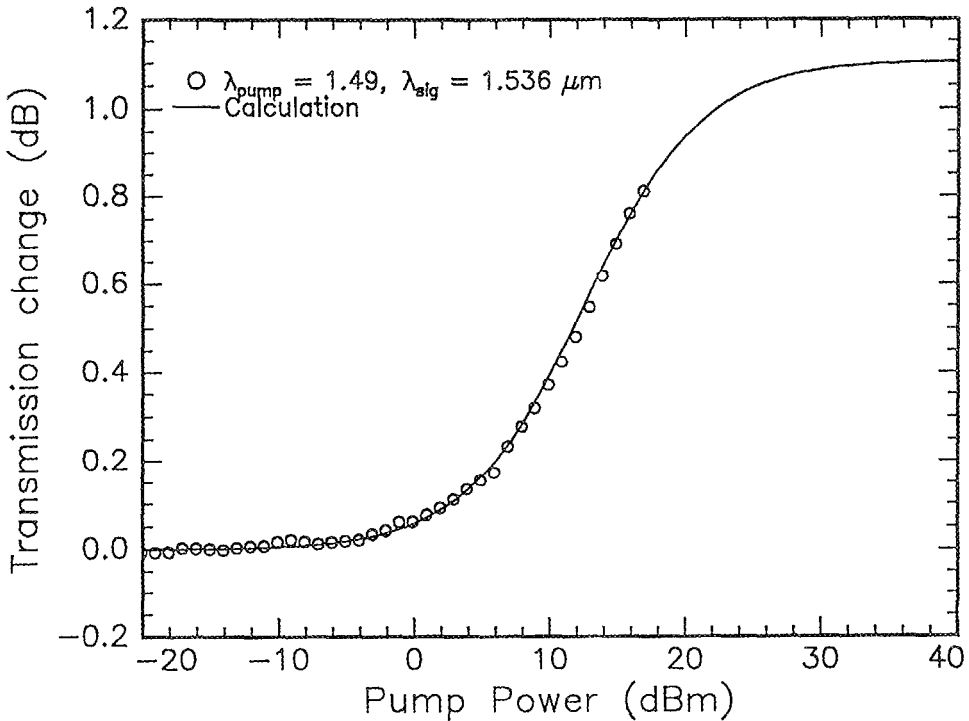
relatief lage optische verliezen worden gekoppeld aan standaard telecomcommunicatieglasfivers. In Al_2O_3 films, gemaakt met sputter-depositie, kunnen lichtgeleiders worden gemaakt met ionenbundel-ets technieken. De implantatie energieën zijn in beide materialen zo gekozen dat het Er diepte profiel overlapt met het optische mode-profiel in de lichtgeleiders. De Er concentraties zijn gevarieerd van 0.1 tot 2 atoom %

a) natrium-silicaat glas

Figuur 10 toont een fotoluminescentie-spectrum van Er-geïmplantieerd natrium-silicaat glas. Het glas is eerst geïmplantieerd met 500 keV Er ionen tot een dosis van 3.7×10^{15} Er/cm². Daarna is een warmtebehandeling toegepast bij 500°C. Duidelijk is de karakteristieke luminescen-

tie van Er^{3+} rond 1.54 μm te zien. De verschillende pieken zijn een gevolg van de Stark-splitsing. In tegenstelling tot Er^{3+} -gedoteerd Y_2O_3 zijn hier de banden in het spectrum breed, wat karakteristiek is voor de inhomogene omgeving van de Er^{3+} ionen in het glas

In Fig 11 staat de luminescentie intensiteit als functie van de Er implantatie-dosis en dus concentratie. De intensiteit neemt niet lineair toe met de Er^{3+} concentratie, maar verzadigt voor concentraties boven de 1 at % In de figuur staat ook de luminescentie-levensduur, die een maat is voor de luminescentie-efficiency voor de Er^{3+} ionen. Duidelijk is te zien hoe de efficiency afneemt met toenemende concentratie. Dit is het gevolg van energie-migratie tussen de Er^{3+} ionen onderling en naar quen-

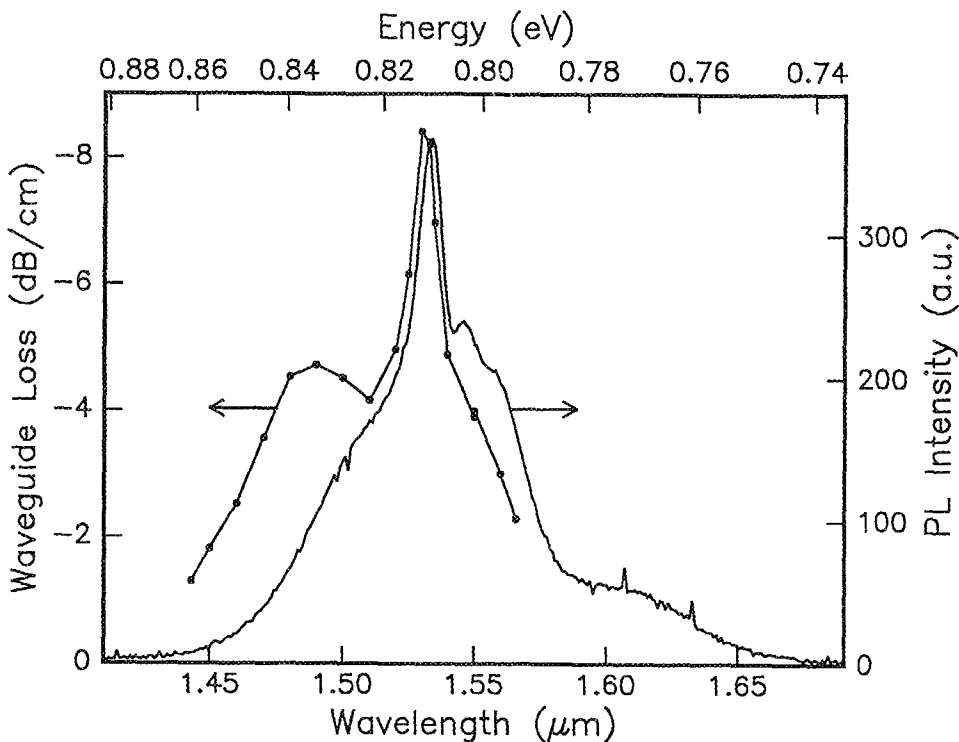


Figuur 12
 Optische versterking in een Er-geïmplantieerde kanaal-lichtgeleider. Weergegeven is de verandering in intensiteit van een signaal bij 1.536 μm als functie van het pompvermogen bij 1.49 μm . De getrokken lijn is een berekening.

chende defecten, waarvan de concentratie wordt verhoogd door het implantatieproces. Deze figuur illustreert duidelijk het belangrijkste probleem in het onderzoek naar geïntegreerde optische versterkers: om in een korte lichtgeleider zoveel mogelijk versterking te krijgen dient zoveel mogelijk Er^{3+} te worden geïmplanteerd, als de concentratie echter te hoog wordt neemt de efficiency af. De optimum concentratie in natrium-silicaat glas ligt rond de 0.2-0.4 at %.

Figuur 12 toont een eerste meting van optische versterking in een Er-geïmplanteerde kanaallichtgeleider. Erbium is eerst geïmplanteerd met twee verschillende energieën ($1.2 \times 10^{16} \text{ Er/cm}^2$ bij 5 MeV en $8 \times 10^{15} \text{ Er/cm}^2$ bij 3 MeV). Daarna is een warmtebehandeling van 512°C , 1 uur toe-

gepast en zijn 3 cm lange kanaallichtgeleiders gemaakt met behulp van een Na-K ionen-uitwisselingsproces (bij PTT Research: B. Hendriksen, M.B.J. Diemeer). Het Er^{3+} wordt gepompt met een halfgeleider laser met een golflengte van $1.49 \mu\text{m}$. Tegelijkertijd wordt een signaal met een golflengte van $1.536 \mu\text{m}$ door de lichtgeleider gezonden. De transmissie van het signaal neemt toe met 0.8 dB (20%) wanneer het pompvermogen wordt opgevoerd tot 16 dBm (40 mW). De getrokken lijn is een berekening die laat zien dat in dit geval een maximale intensiteitsverandering ten gevolge van optische versterking kan worden bereikt van 1.1 dB. Deze meting toont aan dat het principe werkt. De versterking is nog niet voldoende om inkoppelverliezen e.a. te compenseren, maar er wordt gewerkt aan het verder optimaliseren van de-



Figuur 13
Fotoluminescentie spectrum en optisch verzwakkingsspectrum rond $1.54 \mu\text{m}$ in een Er-geïmplanteerde planaire Al_2O_3 lichtgeleider (1.35 MeV Er , $2 \times 10^{16} \text{ Er/cm}^2 + 825^\circ\text{C}$, 1 uur)

ze natrium-silicaat lichtgeleiders

b) Al_2O_3 films

De 0,6 μm dikke, polykristallijne Al_2O_3 films zijn gedeponerd op een geoxideerd Si substraat (bij de Technische Universiteit Delft, K van Uffelen, C van Dam, M.K Smit). We hebben ontdekt dat na implantatie, gevolgd door een geschikte warmtebehandeling, een belangrijk deel van het Er^{3+} op Al posities in het kristalrooster zit. Hierdoor is het mogelijk om hoge Er^{3+} concentraties in het Al_2O_3 op te lossen, zodat in principe hoge versterkingsfactoren kunnen worden behaald

In Fig. 13 staat een fotoluminescentiespectrum van Er-geïmplanteerd Al_2O_3 (1,35 MeV, 2×10^{16} Er/cm² + 825°C) Het spectrum is wat breder dan dat van Er^{3+} in natrium-silicaat glas. Dit is een voordeel want het betekent dat optische signalen over een grotere bandbreedte kunnen worden versterkt. De luminescentie levensduur van het Er^{3+} is lang (8 ms), terwijl de Er^{3+} concentratie relatief hoog is (1 at.%) Dit geeft aan dat hoge versterkingsfactoren kunnen worden bereikt in relatief korte lichtgeleiders.

In Fig. 13 is ook het optisch verzwakkingspectrum in de geïmplanteerde planaire lichtgeleider rond 1,5 μm weergegeven. In dit geval wordt alleen een signaal door de lichtgeleider gestuurd, zonder dat het Er^{3+} door een pomplaser wordt geëxciteerd. De absorptie door het Er^{3+} bij 1,53 μm bedraagt rond 8 dM/cm. Dit is zeer hoopgevend en betekent dat in Er-geïmplanteerde planaire Al_2O_3 optische versterkers een versterking van de orde van 8 dB/cm zou kunnen worden bereikt! Versterkingsmetingen aan Er-geïmplanteerde kanaallichtgeleiders worden op dit moment uitgevoerd

6. Verantwoording

Onderzoek dat in dit artikel is beschreven maakt deel uit van het onderzoeksprogramma van de Stichting voor Fundamenteel

Onderzoek der Materie (FOM) en wordt financieel gesteund door de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO), de Stichting voor de Technische Wetenschappen (STW), en het Innovatief Onderzoekprogramma (IOP-Electro-Optics) van het Ministerie van Economische Zaken.