

Halfgeleider fotonenbronnen

L.J. van Ruyven

Philips Usfa b.v., Meerenakkerweg 1, 5600 MD Eindhoven

Halfgeleider fotonen bronnen zijn vaste stof lichtbronnen, die licht uitzenden zonder gebruik te maken van gloeiprocesen. De eerst halfgeleider lichtbron werd bij toeval ontdekt door Lossev in de tijd dat veel met de kristaldetectorradio werd geëxperimenteerd. De hierbij gebruikte kristaldetectoren bestaan uit een brok grof kristallijn carborundum (SiC), waarop met een metalen punt aan een armpje naar een gelijkrichtend contact gezocht werd. Lossev onderzocht of wellicht een voorspanning een gunstig effect zou hebben op de gelijkrichtende eigenschappen toen hij zag hoe onder voorwaartse stroomdoorvoer een blauw licht onder de metalen punt werd opgewekt. Na zich ervan overtuigd te hebben dat het hier niet ging om vonkontladingen maakte hij zijn ontdekking wereldkundig. Dit verschijnsel, de injectie-electroluminescentie, vormt de grondslag van de huidige halfgeleider lichtbronnen, de L.E.D. en de halfgeleiderlaser. Het emitteren van licht door een halfgeleider berust op het stralend verval van een electron in de geleidingsband naar een energetisch lagere toestand van de valentieband, ook wel electron-gat recombinatie genoemd. De energie van het foton, welke de golflengte van het uitgezonden licht bepaalt, is juist gelijk aan het energie verschil tussen de twee toestanden waartussen de overgang plaats vindt; bij electrongat recombinatie is dit de bandafstand E_g . De bandafstand E_g is een materiaal parameter, welke in eerste instantie wordt bepaald door de chemische samenstelling en slechts in geringe mate afhangt van de temperatuur en kleine hoeveelheden verontreinigers (concentratie $< 1\%$). Behalve de bekende halfgeleider silicium Si zijn er ook een groot aantal halfgeleidende verbindingen, welke vooral gebruikt worden in de halfgeleidende fotonenbronnen.

Silicium zelf is ongeschikt als materiaal voor een fotonenbron, omdat de electron-gat recombinatie een impuls verboden overgang is, een zgn. indirecte overgang. In een indirecte halfgeleider wordt de toestand van laagste energie voor een electron in de geleidingsband bereikt bij een impuls ongelijk nul d.w.z. een bewegend electron. Om bij de electron-gat recombinatie in Si ook aan de wet van behoud van impuls te voldoen moet het impuls verschil opgevangen worden door emissie of absorptie van een fonon.

Vele halfgeleidende verbindingen zoals GaAs zijn directe halfgeleiders d.w.z. aan de electron-gat recombinatie nemen geen fononen deel en hebben daardoor een veel grotere waarschijnlijkheid. De corresponderende levensduur, een maat voor de waarschijnlijkheid van de overgang, voor een directe halfgeleider is in de orde van 10^{-9} sec. terwijl de levensduur voor Si , zoals berekend uit de bandenstructuur van Si , ongeveer 10 minuten moet zijn.

De huidige halfgeleider technologie is nu zover gevorderd, dat niet alleen halfgeleidende verbindingen zoals GaAs of GaP zeer zuiver gemaakt kunnen worden, maar ook de hele reeks van halfgeleidende mengkristallen $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ gevormd uit twee of meer halfgeleidende verbindingen. De bandafstand kan nu continu gevarieerd worden tussen de eindwaarden behorende bij de zuivere verbindingen. Fig. 1 geeft de bandafstand als functie van de arsen fractie in atoomprocenten voor de combinatie van de directe bandhalfgeleider GaAs, $E_g = 1,42$ eV en de indirecte bandhalfgeleider GaP $E_g = 2,2$ eV. Uit de figuur blijkt dat mengkristallen met een samenstelling, welke minder dan 52 % arsen (notatie: $\text{GaAs}_{52}\text{P}_{48}$) bevatten, een directe bandstructuur hebben en dus van nature goede licht emitterende eigenschappen hebben.

Alhoewel GaP een indirecte halfgeleider is en dus de recombinatie van een vrij electron met een vrij gat een impuls verboden overgang is, kan van GaP toch een goed fluorescerend materiaal gemaakt worden en wel in het groen (560 nm), omdat het mogelijk is het vrije electron te binden aan stikstof atomen, welke als verontreinigers aan het moederkristal (GaP:N) worden toegevoegd en nu een stralende overgang tussen het gebonden electron en een gat

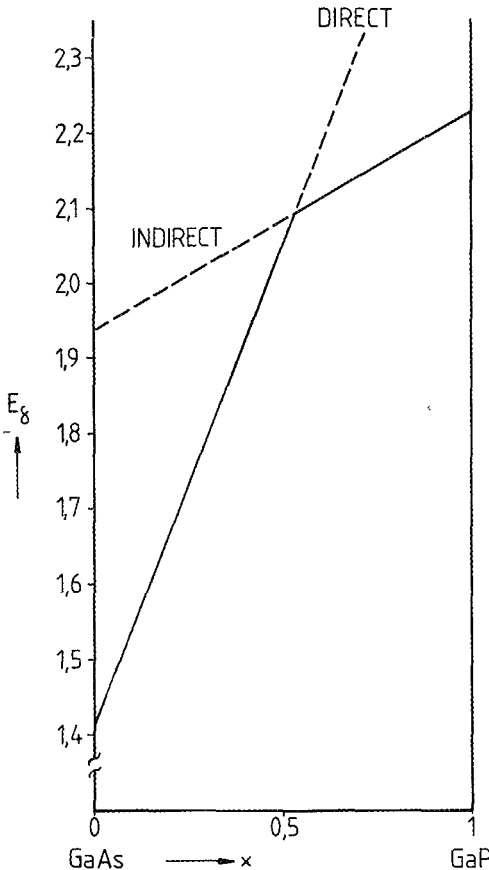


Fig. 1
Bandafstand E_g als functie van compositie voor de ternaire halfgeleider $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$

GaAs, direct, 1,42 eV
GaP, indirect, 2,25 eV

mogelijk maken. Mengkristallen van GaAs en GaP worden voornamelijk gebruikt voor L.E.D.'s, welke dienen als signaallamp voor het menselijk oog, omdat de golflengte gemakkelijk tussen 650nm (rood) en 560 nm (groen) gevarieerd kan worden.

Naast de hierboven besproken eigenschap van halfgeleiders om licht van een bepaalde kleur te kunnen emitteren door stralende recombinatie tussen de geleidingsband en de valentieband geeft deze bandenstructuur tevens de mogelijkheid de electronen in de geleidingsband aan te voeren en vanuit de valentieband af te voeren, waardoor een directe omzetting van electriciteit in licht mogelijk wordt (injectie electroluminescentie). Het energie niveau t.o.v. het vacuüm van de electronen, waarop de elektrische geleiding effectief plaatsvindt, kan in een halfgeleider door middel van kleine toevoegingen (< 1%) van bepaalde verontreinigers over een energie hoeveelheid groter dan de bandafstand verschoven worden, ofwel effectief in de geleidingsband (n-type halfgeleider). Deze mogelijkheid bestaat zowel voor directe als indirecte halfgeleiders en vormt de basis voor de halfgeleider diode (Shockley-diode), waarvan de light emitting diode L.E.D. een voorbeeld is. Deze unieke eigenschap voor halfgeleiders (het "dopen") betekent dat we de uittree-arbeid (energieverschil Fermi-niveau tot vacuüm) over een waarde van tenminste de bandafstand E_g kunnen variëren, zie Fig. 2. In Fig. 2 zijn de energiebanden-schema's van n- en p-type GaAs en n- en p-type GaP weergegeven evenals hun verschillende uittree-arbeid. Wanneer we twee materialen, welke in het algemeen een verschillende uittree-arbeid hebben, met elkaar in electrisch contact brengen, zullen er electronen van het materiaal met de kleinste uittree-arbeid overstromen naar het materiaal met de grootste uittree-arbeid. Aan het grensvlak ontstaat een electrische dipool bestaande uit een positieve ruimte-ladingslaag (waar de electronen uit weggestroomd zijn) aan de zijde van het materiaal met de kleinste ϕ en omgekeerd. Fig. 3 geeft de situatie, waarbij de materialen van Fig. 2 electrisch contact maken. De gehele serieschakeling van halfgeleiders heeft nu een gemeenschappelijk Fermi-

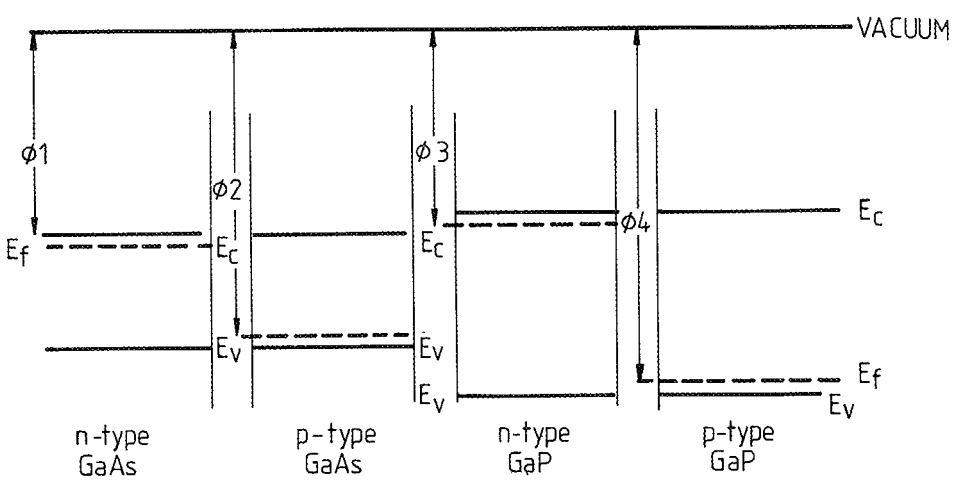


Fig. 2
Energiebanden-schema's van n- en p-type GaAs en n- en p-type GaP, wanneer deze geen electrisch contact maken. Het verschil in uittree-arbeid is eveneens aangegeven.

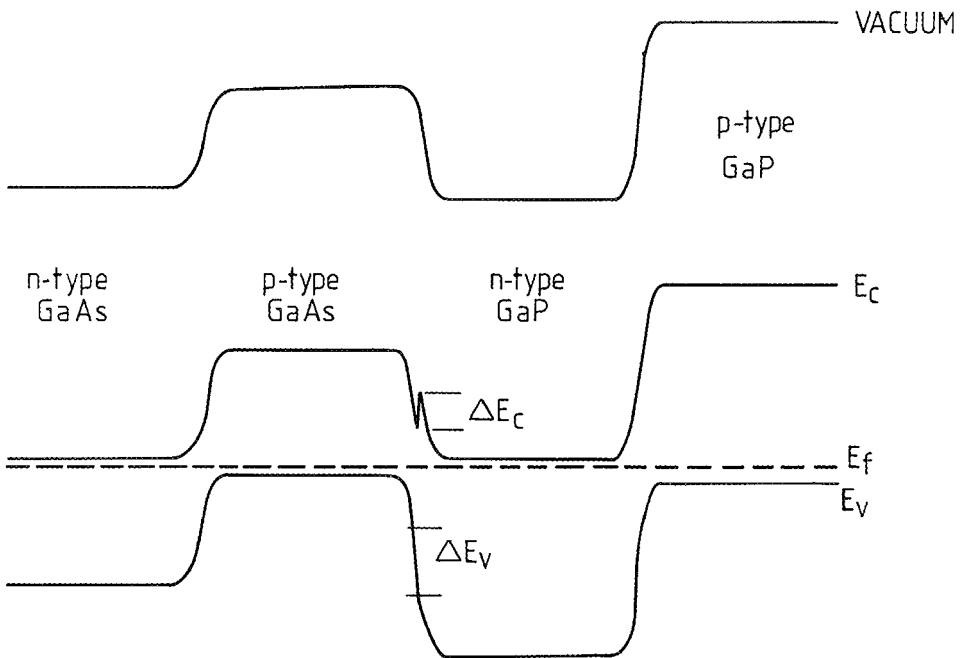


Fig. 3
Energiebanden-schema van n- en p-type GaAs en n- en p-type GaP, wanneer electrisch contact bestaat. De potentiaal van het vacuum juist buiten het halfgeleider-systeem varieert nu t.g.v. de verschillen in uittree-arbeid.

niveau, terwijl het vacuum juist buiten dit halfgeleider-systeem tengevolge van de inwendige dipolen potentiaal verschillen vertoont. Het p-type GaAs vormt met het n-type GaAs een p-n diode, evenals het p-type GaP met het n-type GaP, terwijl het n-type GaAs en het p-type GaP een z.g.n. heterojunctie vormen. Een heterojunctie is een contact tussen twee verschillende halfgeleiders. Het is hierbij niet noodzakelijk dat het geleidingstype wisselt. Er zijn ook n-n en p-p heterojuncties. Men kan nog twee kanttekeningen maken bij Fig. 3. Ten eerste is impliciet aangenomen dat de interfaces foutvrij zijn, d.w.z. er zijn geen lokale toestanden, waarin lading kan worden opgeborgen. Ten tweede zij opgemerkt dat er twee oor-

zaken zijn, die de uittree-arbeid bepalen, 1. de ligging van de banden t.o.v. vacuüm, 2. de dope. Het is mogelijk de ene oorzaak (de dope) zo te kiezen, dat hij de andere opheft. Dan ontstaat een p-n heterojunctie zonder ruimteladingslaag, hetgeen een perfect Ohm's contact betekent. In het algemeen kan men stellen dat wanneer electronen in een halfgeleider geïnjecteerd moeten worden men een contactmateriaal met een lagere uittree-arbeid nodig heeft; het omgekeerde geldt voor gateninjectie. De L.E.D. is een in voorwaartse richting (p gebied +) geschakelde diode, zoals het woord al zegt, waarbij het n-type materiaal met lage ϕ electronen injecteert in het p-type materiaal met hoge ϕ . Tegelijkertijd injecteert het p-type materiaal

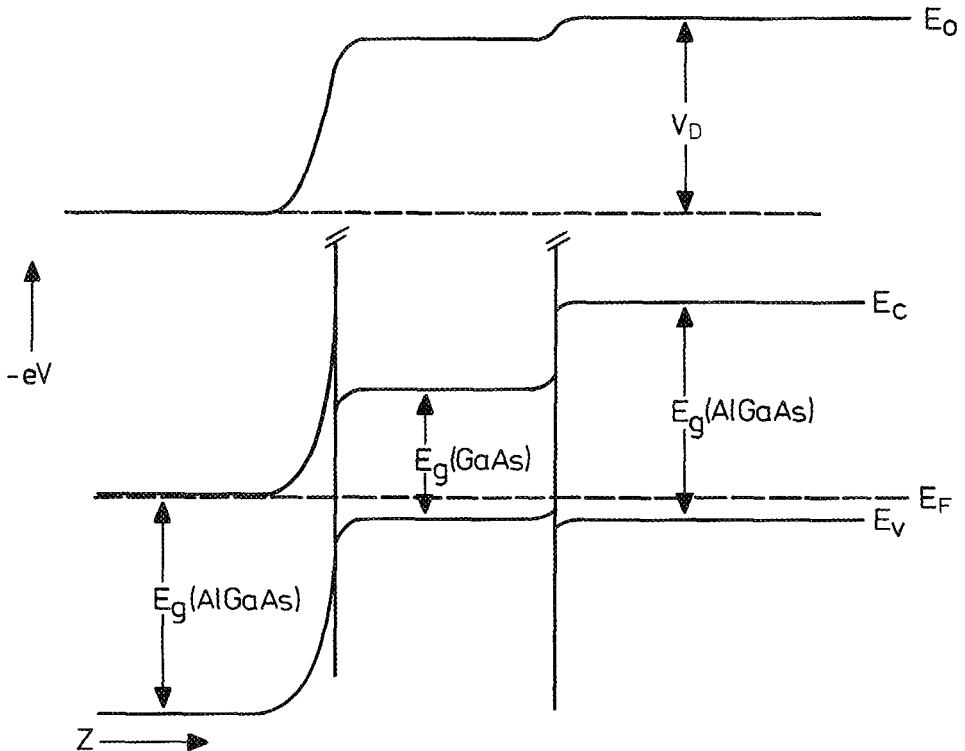


Fig. 4
Energiebanden-schema van L.E.D. met aparte actieve laag, waarbij de electronen- en gateninjecterende lagen een grotere bandafstand hebben t.o.v. de actieve laag, situatie in thermisch evenwicht.

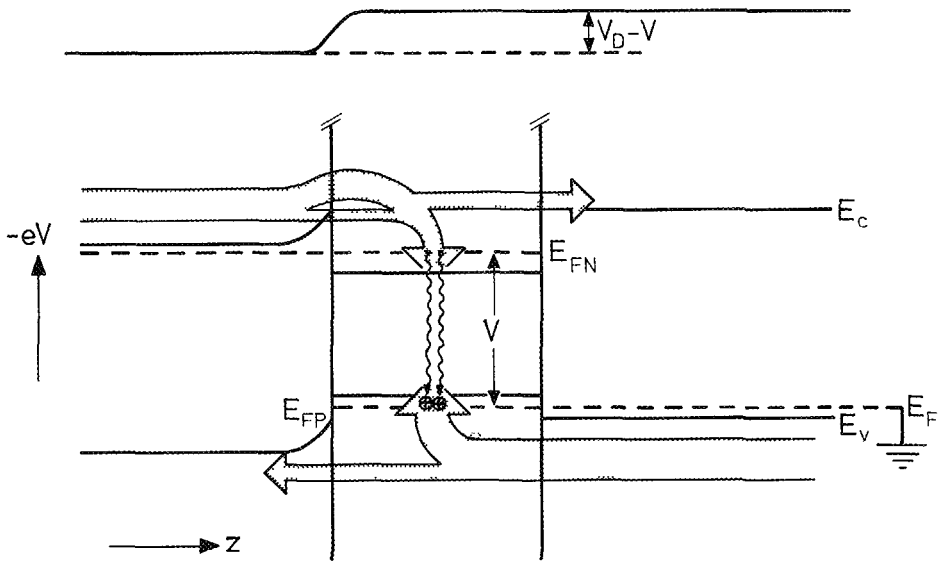


Fig. 5

Energiebanden-schema van L.E.D. met aparte actieve laag, waarbij de electronen en gaten injecterende lagen een grotere bandafstand hebben t.o.v. de actieve laag; situatie onder voorwaartse stroomdoorgang.

gaten in het n-type materiaal. Het licht wordt dus opgewekt in een smal gebied om de p-n overgang. Het contactmateriaal is tevens het materiaal, waar het licht wordt opgewekt, ook wel actieve gebied genoemd. De meest algemene configuratie bestaat uit een aparte actieve laag, waarin de licht emitterende eigenschappen optimaal zijn met aan weerszijden een contactmateriaal met resp. een hogere en lagere uittree-arbeid (de z.g.n. pin diode). Wanneer deze contactmaterialen uit andere halfgeleiders (heterojunctie), metalen (Schottky diode) of zelfs vloeistoffen (oxyderend vermogen is hier uittree-arbeid) bestaan is het belangrijk dat het aantal grensvlak toestanden verwaarloosbaar moet zijn. Anderzijds is het nu mogelijk de eigenschappen van de contactmaterialen te optimaliseren. Zo is het bijvoorbeeld belangrijk dat de niet in licht omgezette warmte zo efficiënt mogelijk wordt afgevoerd; ook kan men de contactlagen zo maken, dat de ladingsdragers in de actieve laag gevangen worden en in

veel gevallen ook de fotonen. Dit laatste wordt geïllustreerd in Fig. 4, waarbij de bandafstand van de actieve laag in feite veel lager is dan de opsluitende contactlagen. In halfgeleider materialen betekent een grotere bandafstand een lagere brekingsindex. Een grotere bandafstand aan beide zijden van de actieve laag heeft nu een dubbel effect, er ontstaat een potentiaal barrière, zodat de actieve laag zelf onder voorwaartse stroomdoorgang een potentiaal put voor zowel gaten als electronen wordt (Fig. 5).

Een apart probleem bij het ontwerpen van halfgeleider lichtbronnen, zowel L.E.D.'s als lasers is het uitkoppelen van het opgewekte licht, doordat het halfgeleidermateriaal een hoge brekingsindex heeft (GaAs 3.4). In optische communicatiesystemen, optische sensoren of optische logische schakelingen is het belangrijk de lichtbron zo efficiënt mogelijk te koppelen aan de glasfibers of de lichtkanalen van geïntegreerde optische schakelingen. Alleen licht-

stralen binnen een bepaalde invalshoek kleiner dan de grenshoek tussen kern en mantel ondervinden totale reflexie en zullen dus doorgegeven worden. Fig. 6 laat verschillende uitvoeringsvormen zien om L.E.D.'s te koppelen aan glasfiber en tegelijkertijd een goede koeling te waarborgen. In de L.E.D. is de in axiale richting uitredende lichtsterkte heel belangrijk. Deze bepaalt namelijk de lichthoeveelheid die bij gegeven kerndoorsnede en gegeven numerieke apertuur in de fiber gekoppeld kan worden. De beste koppeling geeft een dikke kern en fysiek contact van de fiber met de actieve laag. In Fig. 6a (top emitter) is het kristal met de vlakke zijde op het koelblok bevestigd, de actieve laag is vlak onder het ringvormige contact. De stroomdichtheid is beperkt tot 1000 A/cm^2 door opwarming, corresponderend met een "Radiance" van 5 W/sr cm^2 . Fig. 6b heeft een lensstelsel toegevoegd, waardoor de diode en de fiber afkoppelbaar zijn. Fig. 6c geeft een uitvoeringsvorm weer (Burrus-diode), waarbij het kristal ondersteboven is gemonteerd om een betere koeling te krijgen. Deze vorm is noodzakelijk voor L.E.D.'s, waarvan het substraatmateriaal een kleinere bandafstand heeft dan de actieve laag en daardoor ondoorzichtig voor het in de actieve laag opgewekte licht. Om de glasfiber nu toch dichtbij de actieve laag te brengen is in het substraat een gat

geest en de fiber met epoxy aan het substraat vastgezet. De maximale stroomdichtheid in verband met de betere koeling kan een orde van grootte hoger zijn dan bij de top-emitter.

Fig. 6b laat de zijkant-emitter zien. Het lichtgevend kristal bestaat uit een dubbele heterojunctie d.w.z. een dunne actieve laag wordt aan beide zijden begrensd door een p en een n laag met grotere bandafstand, zoals weergegeven in Fig. 4 en Fig. 5. Bovendien is de actieve laag begrensd in de richting loodrecht op het vlak van tekening in de vorm van een smalle strook, een "stripe". De "stripe" configuratie is gekozen om de elektrische stroom in laterale richting te beperken zonder dat het hele "device" onhandelbaar smal wordt als gevolg van afzagen. Als nu de voor- en achterzijde van deze smalle strook spiegelend zouden zijn uitgevoerd, kan bij hoge stroomdichtheid laserwerking optreden. Bij de L.E.D.-uitvoering zoals afgebeeld in Fig. 6d is de achterkant opzettelijk dempend gemaakt, zodat optische terugkoppeling voorkomen wordt. Het totale actieve gebied waarin het licht wordt opgewekt, bestaat uit een dunne strook van 300 micron lengte, een breedte van 5 micron en een dikte van slechts 0,2 micron (de dikte moet klein zijn t.o.v. de diffusie recombinatielengte). Het kleine uittreewenster ($5 \times 0,2 \text{ micron} \times \text{micron}$) maakt

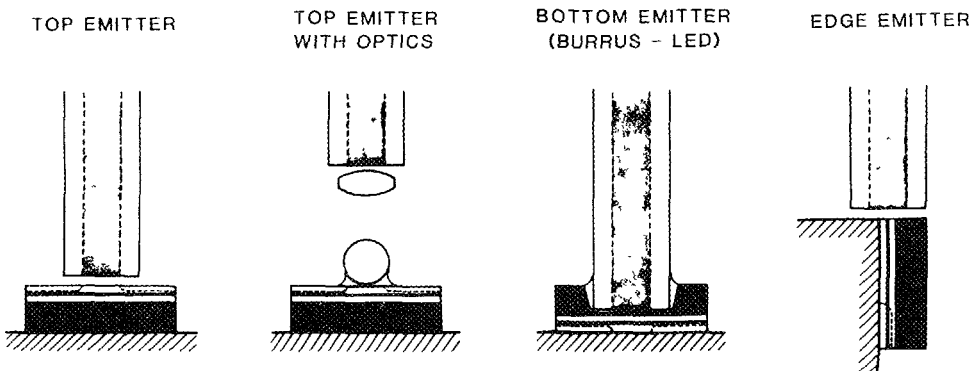


Fig 6
Verschillende uitvoeringsvormen om L.E.D.'s te koppelen aan glasfiber. Top emitter, top emitter met connector, Burrus L.E.D., zijkant emitter.

deze uitvoeringsvorm bij uitstek geschikt voor koppeling met dunne-kern glasfiber (monomode fiber heeft een kern van 5 micron doorsnede). Een goede koppeling wordt alleen verkregen bij een zeer precieze uitlijning. Een moeilijkheid bij deze uitvoering is dat bij veranderde temperatuur het optisch koppelrendement niet mag veranderen tengevolge van kleine uitzettingen. Eén groot voordeel is echter dat bij hoge stromen het koppelrendement sterk toeneemt, omdat bij hoge stroomdichtheid het aandeel gestimuleerde emissie van de totale emissie groot kan zijn, hetgeen een bundel versmalling en een rendementsverbetering teweeg brengt. Het gebied, waarin de lichtintensiteit superlineair van de stroom afhangt, heet superstralingsgebied. De tot dusverre beschreven halfgeleider fotonenbronnen, de L.E.D.'s zenden voornamelijk spontane emissie uit. Halfgeleider lasers daarentegen danken hun naam, "Light Amplification by Stimulated Elec-

tromagnetic Radiation" aan de *netto* gestimuleerde emissie. De structuur van de halfgeleider laser is afgebeeld in Fig. 7 en vertoont grote gelijkenis met de structuur in Fig. 6d. In tegenstelling tot de uitvoering van Fig. 6d is in de structuur van Fig. 7 wel optische terugkoppeling gerealiseerd door de natuurlijke klieflakken (110), welke loodrecht op het p-n junctionvlak aangebracht zijn, als spiegels te gebruiken. Duidelijk is de strookbegrenzing in het horizontale vlak zichtbaar (Fig. 7). Onder deze strook bevindt zich de door de spiegelvlakken gedefinieerde trilholte. Wanneer de injectiestroom van gaten en electronen voldoende groot is, ontstaat inversie in de actieve laag, d.w.z. de toestanden met de hoogste energie (geleidingsband) worden bezet terwijl de toestanden met laagste energie (valentieband) geleegd of wel gevuld worden met gaten. Laserlicht, dat nu door de trilholte loopt, stimuleert de recombinatie, waardoor de lichtgolf

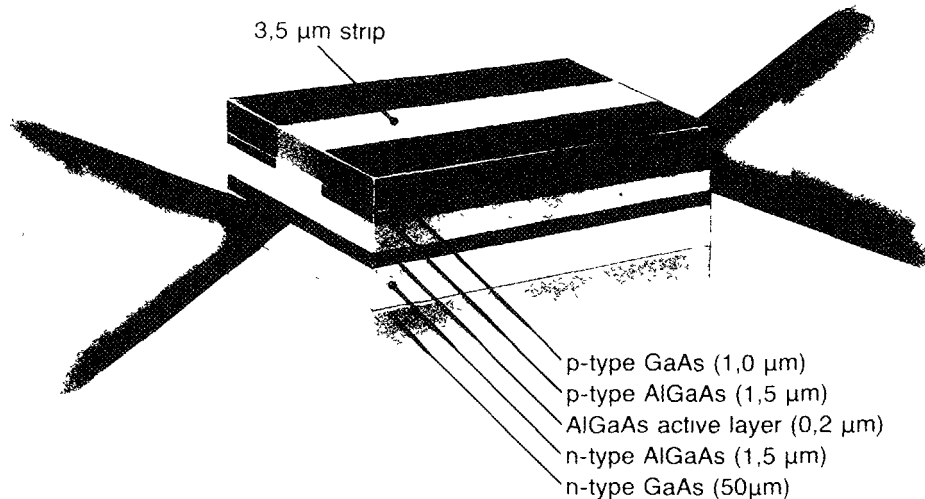


Fig. 7

Opbouw halfgeleider diode laser. De lagen boven en onder de actieve laag (p-type AlGaAs) en (n-type AlGaAs) zijn zo gekozen dat hun bandafstand groter is dan die van de actieve laag. De buitenste lagen, het n-type GaAs substraat en p-type GaAs toplaag vergemakkelijken het metaal halfgeleider contact.

ontdempt. Dit is het superstralend gebied. Er treedt versterking en lijnversmalling op, maar de versterking is nog onvoldoende om de verliezen in de trilholte te compenseren. Er treedt na een zekere drempelstroomwaarde netto gestimuleerde emissie op in een richting loodrecht op het vlak van tekening en het rendement neemt sterk toe. Een halfgeleider laser heeft een grote versterking per lengte eenheid, omdat de dichtheid aan gevulde toestanden (gelijk aan de toestandsdichtheid van de geleidingsband, $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ voor GaAs bij kamertemperatuur) zo enorm hoog is. Het actieve volume is dus relatief klein en in één dimensie, de dikte, zelfs kleiner dan de golflengte van het uitgezonden licht (0,09 micron voor GaAs). Dit betekent, dat het uitgezonden licht altijd divergent is, omdat het nagenoeg als puntbron beschouwd kan worden. Door de asymmetrie in het uittreevlak zijn de hoeken in verticale en horizontale richting van de divergente laserbundel ongelijk. Het zij echter gezegd, dat het golffront van deze monochromatische lichtbron goed gedefinieerd is en dus is het mogelijk met buigingsbegrensde optiek de bundel in een perfect evenwijdige bundel af te beelden (divergentie $< 0,3$ millirad).

Behalve de golflengte, welke in eerste instantie bepaald wordt door de bandafstand E_g van de actieve laag, is ook de lijnbreedte een belangrijke grootte. Er zijn toepassingen, waarbij een grote spectrale zuiverheid (lange coherentie lengte) noodzakelijk is, maar ook het omgekeerde wordt gevraagd. Zo is b.v. in een toepassing, waarbij de informatie, opgeslagen als putjes in een schijf (compact disc) moet worden uitgelezen, een lange coherentie lengte ongewenst. Wanneer namelijk de coherentie lengte van de lichtbron langer is dan de optische weg van de bron tot de plaat en terug, ontstaat een interferentie tussen de coherente heen- en teruggaande bundels, welke natuurlijk sterk afhankelijk is van de constantheid der afgelegde wegen. Het zal duidelijk zijn dat de afstand tot een snel draaiende schijf niet binnen een halve golflengte constant gehouden kan worden en dus zal het terugkomende

licht met wisselende fase de trilholte weer binnenkomen en mee versterkt worden, hetgeen een ongewenste modulatie van de laser intensiteit teweeg brengt. Halfgeleider lasers kunnen evenwel met korte dan wel met lange coherentie lengte gemaakt worden, de eigenschappen van de uitgezonden bundel worden bepaald door het geleidingsmechanisme van de optische flux in de actieve laag van de halfgeleider laser. De geleiding van de optische flux loodrecht op het vlak van de heterojunctie lagen wordt veroorzaakt door een verandering van materiaal eigenschappen en daardoor een verandering van de reële brekingsindex en is voor alle halfgeleider lasers gelijk. Het optisch geleidingsmechanisme in het horizontale vlak hangt af van het ontwerp en kan zowel met een reële of complexe brekingsindex variatie geschieden, reël betekent reflexie complex demping. Fig. 8 geeft de schematische opbouw en emissie spectra van een "gain guided" (complex) en van een "index guided" (reël) halfgeleider laser. In de "gain guided"-structuur is alleen de elektrische stroombaan gedefinieerd door de smalle strook van 3,5 micron breedte over de gehele lengte van de stripe. Daar de injectiestroom de noodzakelijke voorwaarde schept voor versterking n.l. de bezettings inversie in de actieve laag zal het versterkte licht precies onder de stroombaan blijven. Buiten de strook heerst een demping, welke in transversale richting geleidelijk toeneemt. Deze demping veroorzaakt een gekromd golffront en bovendien een belangrijk verlies aan reeds versterkt licht. Om deze reden is de "gain guided" laser astigmatisch (het golffront in verticale richting is wel vlak), een groot gedeelte van de totale emissie is spontane emissie en geeft aanleiding tot een spectrale verdeling met vele longitudinale modes. zie Fig. 8 rechts boven.

De "index guided" laser, waarbij de trilholte ook in zijdelingse richting door materiaal veranderingen begrensd is, heeft in beide richtingen een vlak golffront, ergo: heeft geen last van astigmatisme en emitteert in slechts één enkele longitudinale mode. Fig. 10 onderste deel links toont duidelijk de ingeëtste V-groef, welke

later opgevuld is met materiaal van hogere brekingsindex om de trilholte zijdelings te definiëren; onderaan rechts het corresponderende spectrum met slechts één longitudinale mode. Het zal duidelijk zijn, dat de "index guided" laser een lange coherentielengte heeft en een relatief lage drempelstroom, omdat er binnen de trilholte zuinig met licht wordt omgesprongen.

De beide lasers van Fig. 8 zijn geproduceerd uit combinaties van GaAs en AlAs en emitteren bij een piek golflengte van 780 nm. Lasers uit deze AlGaAs-familie emitteren met golflengtes tussen de 780 nm en 900 nm (zuiver GaAs). Het AlGaAs-systeem heeft twee eigenschappen, waardoor het bij uitstek geschikt is voor deze laser toepassing en daarom ook de familie

van de goedkoopste en verst ontwikkelde halfgeleiderlaser is. De eerste eigenschap is de rooster parameter van GaAs, welke nagenoeg gelijk is aan die van AlAs en zelfs bij de preparatie temperatuur exact gelijk is. De tweede eigenschap is de zeer geringe diffusie coëfficiënt van Al in GaAs, waardoor heel steile gradiënten (potentiaal barrières) gerealiseerd kunnen worden, zonder na verloop van tijd te vervagen. In het verleden is veel onderzoek verricht naar de degradatie mechanismen van de AlGaAs lasers. Het bleek dat de spiegels van AlGaAs lasers zeer kwetsbaar zijn en dan ook met een spiegel bedekking van b.v. Al_2O_3 beschermd moeten worden. In de praktijk komt het echter vaak voor dat AlGaAs lasers overlijden aan ongedempte

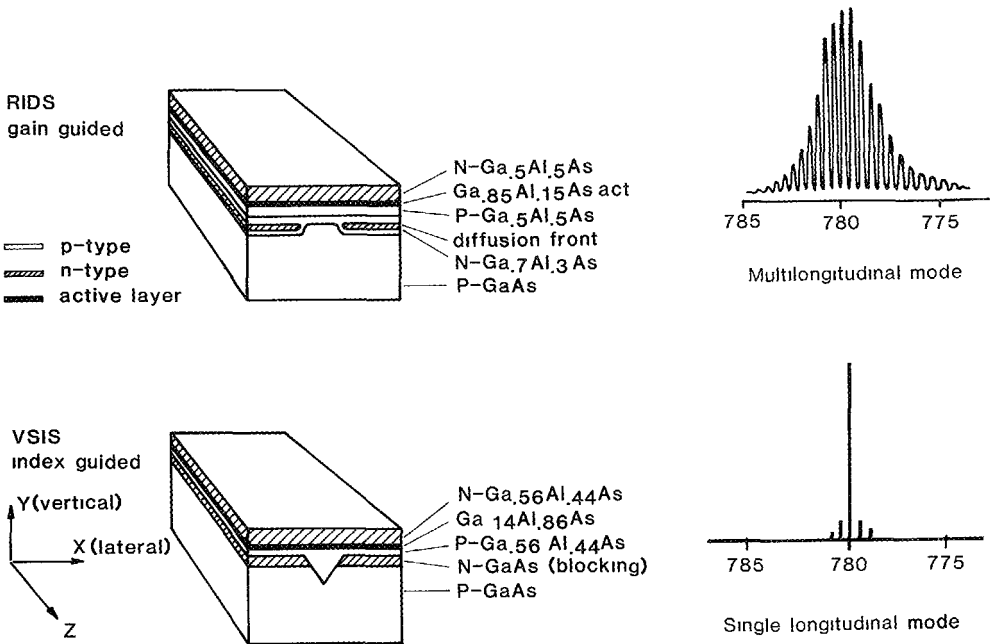


Fig. 8 Schematische opbouw en emissie spectra van een "gain guided" en van een "index guided" halfgeleider laser op p-type substraat.

1300 nm LASER DIODE WITH SINGLE - MODE FIBER

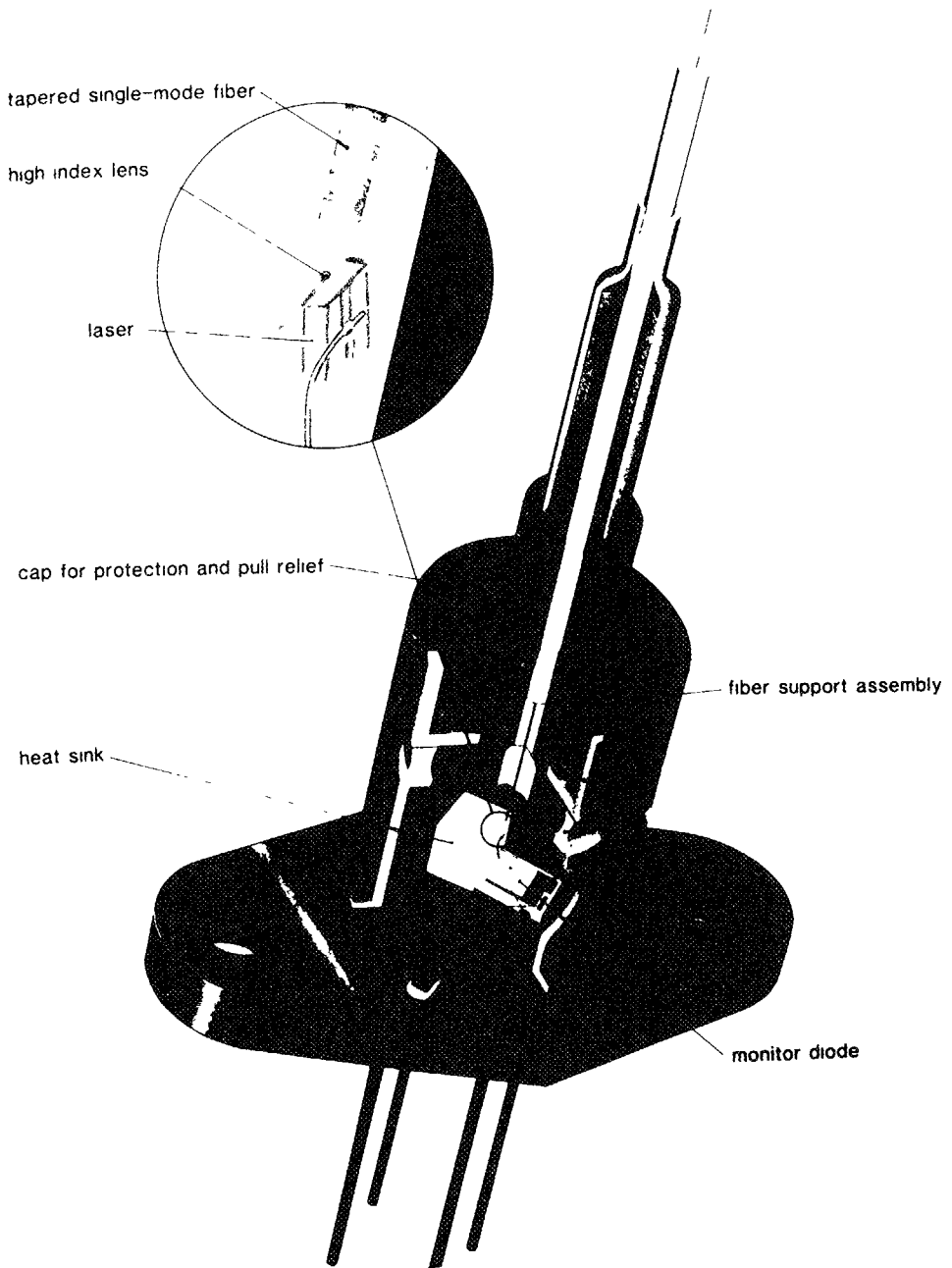


Fig. 9
1300 nm laser gekoppeld aan monomode fiber (inzet). Het koppelrendement is meer dan 50% over een temperatuurgebied van 0°- 60°C. (PHILIPS 503CQF)

stroomstootjes "transients", die door de voedingsbron heenkomen en de optische veldsterkte bij de spiegels laat aangroeien tot een grootte, die zelfs de spiegelbedekking eraf laat springen.

De lasers gemaakt van mengkristallen uit het quaternaire systeem InP en GaAs ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$) hebben een hele reeks mengkristallen met een rooster parameter gelijk aan die van InP, hetgeen als substraat dient. In tegenstelling tot GaAs is het InP substraat transparant voor het laser licht van 1200 - 1600 nm. Dit golflengte gebied is interessant voor toepassing in de lange afstandscommunicatie, omdat de huidige glasfibers bij 1300 nm een minimum in de kleur dispersie blijken te bezitten, hetgeen belangrijk is voor hoge bitsnelheden (1Gb/s). zie Fig. 9. Boven een golflengte van 1500 nm heeft de Raleigh-verstrooiing geen bijdrage meer in de fiber-

demping, zodat lasers met een golflengte van 1600 nm afstanden van 50 km en meer zonder tussenverversterkers hebben overbrugd. De lasers uit de InGaAsP familie zijn aanmerkelijk duurder dan die uit de AlGaAs familie door de ingewikkelde technologie. Zij hebben echter ook enkele voordelen. Zo zijn b.v. de spiegels veel minder kwetsbaar en in toepassingen zoals de geïntegreerde optica heeft men door de grotere golflengte meer ruimte, hetgeen weer gemakkelijker voor de technologie van de optische chip is.

Tot dusverre zijn er nog weinig halfgeleider lichtbronnen in geïntegreerde optische schakelingen toegepast. De meeste experimenten maken gebruik van Nd YAG lasers. Het lijdt geen twijfel dat in de toekomst halfgeleiderfotonenbronnen bij voorkeur toegepast zullen worden in de geïntegreerde optica.