

Polarisatie van kleine halfgeleiderlasers

Rob Hendriks*, Martin van Exter en Han Woerdman
Rijksuniversiteit Leiden, Huygens Laboratorium
Postbus 9504, 2300 RA Leiden

Uiterst kleine halfgeleiderlasers (vertical-cavity surface-emitting lasers) worden steeds vaker gebruikt voor allerlei toepassingen in optische communicatie, laserprinters en optische dataopslag. Vanuit wetenschappelijk oogpunt zijn met name de polarisatie eigenschappen van deze lasertjes interessant. Het blijkt dat de polarisatie dominant bepaald wordt door de lineaire anisotropie: dubbele breking en dichroïsme. De invloed van de niet-lineaire anisotropie is echter ook meetbaar.

Inleiding

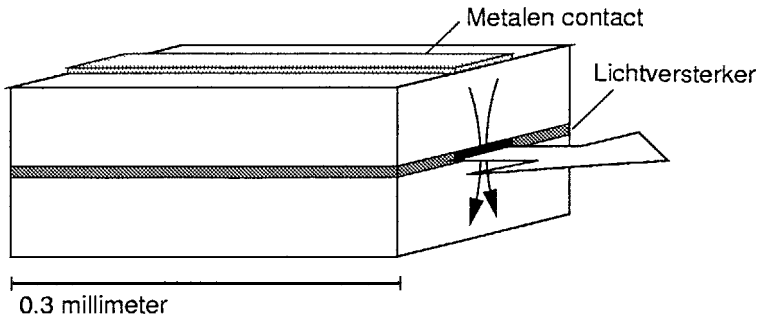
Halfgeleiderlasers bestaan sinds 1962. Dankzij de grote betrouwbaarheid, kleine afmetingen en het lage energieverbruik vinden ze toepassingen in onder andere telecommunicatie, laserprinters en optische dataopslag. In 1989 is een nieuw type halfgeleiderlaser ontwikkeld [1] dat in vele opzichten superieur is aan de traditionele halfgeleiderlaser: de VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser). In figuur 1 is het verschil tussen traditionele halfgeleiderlasers en VCSELS aangegeven. Bij traditionele halfgeleiderlasers beweegt het licht in het vlak van de versterkende laag, terwijl bij VCSELS het licht loodrecht op deze laag beweegt. Hierdoor is het mogelijk VCSELS veel kleiner te maken dan de traditionele halfgeleiderlasers. Omdat de versterkende laag meestal uit extreem dunne quantumputten bestaat, en het licht per doorgang dus maar heel weinig versterking ondergaat, worden aan de spiegels van een

VCSEL heel hoge eisen gesteld. De Braggspiegels die gebruikt worden hebben een reflectiviteit van meer dan 99%. Ter vergelijking merken we op dat de spiegels in traditionele halfgeleiderlasers, die gevormd worden door de grensvlakken tussen het halfgeleidermateriaal en de lucht, een reflectiviteit van ongeveer 30% hebben.

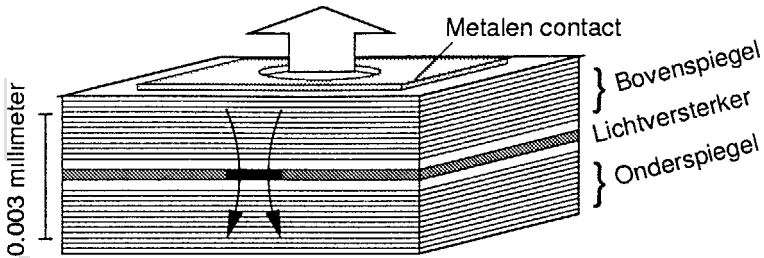
Naar de meeste VCSELS wordt energie gevoerd door middel van een elektrische stroom. Bij deze elektrisch gepompte VCSELS worden vorm en positie bepaald door het metalen contact dat bovenop de VCSEL is aangebracht. In Leiden maken we gebruik van *optisch* gepompte VCSELS. Naar deze VCSELS wordt de energie gevoerd met behulp van een andere laser, die licht uitzendt met een andere (blauwere) kleur. Vaak wordt een argon-ion gepompte titanium-saffier laser gebruikt, zoals weergegeven in figuur 2. De bundel uit de zogenaamde pomplaser wordt door middel van een lens gefocusseerd tot een klein lichtvlekje, de pompspot. Vorm en positie van een optisch gepompte VCSEL worden bepaald door die van de pompspot.

Op het eerste gezicht lijkt optisch pompen veel onhandiger en inefficiënter dan elektrisch pompen, en voor vrijwel alle toepassingen van VCSELS is dit ook zo. Het voordeel van optisch pompen is echter de grote flexibiliteit: het is bijvoorbeeld heel makkelijk om de vorm en positie van de VCSEL te veranderen, simpelweg door de vorm en positie van de pompspot te veran-

* e-mail: hendriks@molphys.leidenuniv.nl



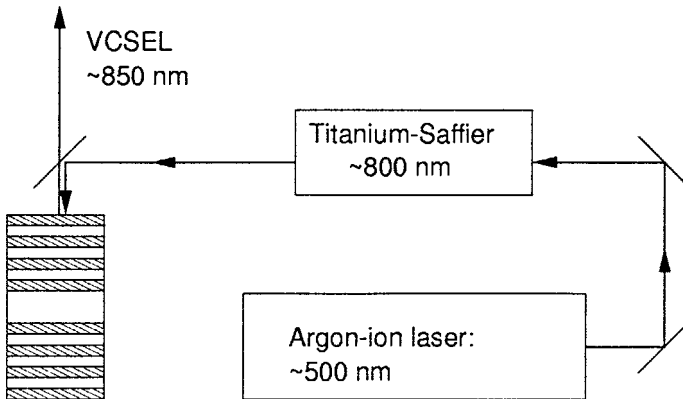
Traditionele halfgeleiderlaser



VCSEL

Figuur 1

Bij een traditionele halfgeleiderlaser (boven) plant het licht zich voort in het vlak van de lagen waaruit de structuur is opgebouwd. In een VCSEL (onder) is de voortplantingsrichting loodrecht op die lagen.



Figuur 2

Schema van de opstelling zoals die gebruikt wordt voor optisch gepompte VCSELs

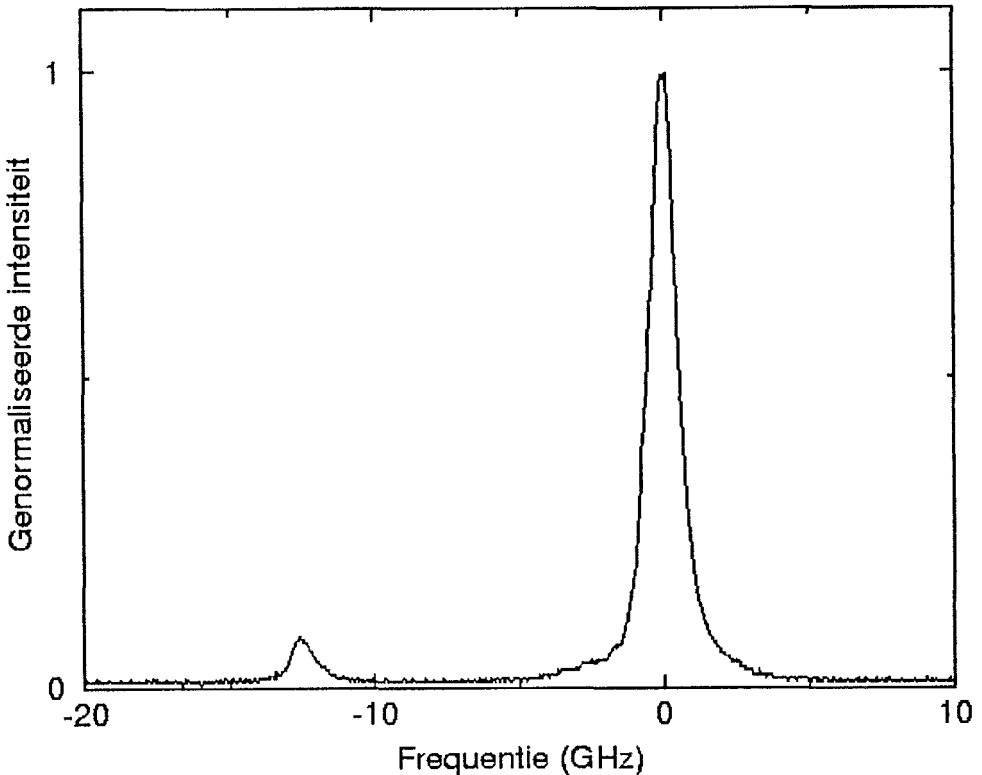
deren

De flexibiliteit van optisch pompen kan gebruikt worden om experimenten uit te voeren, die niet gedaan kunnen worden met elektrisch gepompte VCSELS. De resultaten van deze experimenten zijn weer wel relevant voor VCSELS in het algemeen.

Wij onderzoeken de polarisatie eigenschappen van het licht dat uit een VCSEL komt. Deze polarisatie is interessant vanwege de toepassingen, maar ook vanuit een wetenschappelijk oogpunt. Bij traditionele halfgeleiderlasers is de polarisatie vastgelegd door de geometrie van de laser: het licht is meestal gepolariseerd in het vlak van de versterkende laag. Omdat

VCSELS van nature veel symmetrischer zijn dan traditionele halfgeleiderlasers is het niet op voorhand duidelijk wat de polarisatie van een VCSEL bepaalt.

Bij de experimenten aan de polarisatie van VCSELS werd het VCSEL licht geanalyseerd met een Fabry-Perot interferometer. Het optische spectrum (zie figuur 3) bestaat uit twee lineair en orthogonaal gepolariseerde modes met een frequentie splitsing van 1-30 GHz [2]. Een van deze modes is de laser mode, en de andere mode wordt gevoed door versterkte spontane emissie. Het frequentieverschil tussen de twee modes is een maat voor de dubbele breking in de VCSEL. De exacte waarde



Figuur 3

De frequentiesplitsing tussen de twee orthogonaal gepolariseerde modes van een VCSEL. Deze splitsing is een maat voor de dubbele breking.

van de frequentiesplitsing en de orientatie van lineaire polarisatie lijkt willekeurig te varieren, ook tussen ogenschijnlijk identieke VCSELs. Verder in dit artikel wordt besproken hoe we, met optisch gepompte VCSELs, hebben kunnen aantonen waardoor de polarisatie van VCSELs wordt bepaald

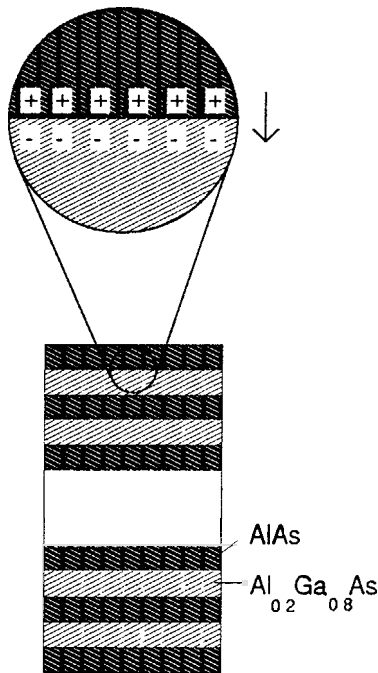
Lineaire anisotropie

Een van de oorzaken van dubbele breking in VCSELs is het zogenaamde elektro-optisch effect een elektrisch veld veroorzaakt dubbele breking. Er zijn in het algemeen drie bijdragen tot het elektrische veld aan te wijzen [3]: (i) Het veld ten gevolge van de pompstroom en de interne weerstand bij *elektrisch* gepompte VCSELs, (ii) het veld ten gevolge van de ruimteladingen door de tegengestelde doping van de onderkant en bovenkant van de VCSEL en (iii) het veld ten gevolge van de ruimteladingen in de Bragg-spiegels

In optisch gepompte VCSELs is effect (i) natuurlijk afwezig. Effect (iii) is geïllustreerd in figuur 4. Hier is te zien dat de ruimteladingen ontstaan aan de grensvlakken tussen de verschillende laagjes waaruit de VCSEL is opgebouwd. Het teken van het elektrische veld hangt af van de doping. Het interessante gegeven is nu dat effecten (ii) en (iii) afwezig zijn in VCSELs met symmetrische doping, dat wil zeggen VCSELs waarbij de onderkant en bovenkant dezelfde doping hebben. Alleen voor optisch gepompte VCSELs is het mogelijk om de doping symmetrisch te maken.

Wij hebben in ons onderzoek VCSELs met symmetrische en asymmetrische doping vergeleken [4]. Zoals te zien is in figuur 5 is de dubbele breking voor symmetrisch gedoopte VCSEL een ordegrrootte kleiner dan voor asymmetrisch gedoopte VCSELs. Hieruit blijkt dat het elektro-optisch effect ten gevolge van de ruimte-lading dominant de dubbele breking in VCSELs veroorzaakt.

De residuele dubbele breking (ongeveer 1 GHz) in de symmetrisch gedoopte VCSELs



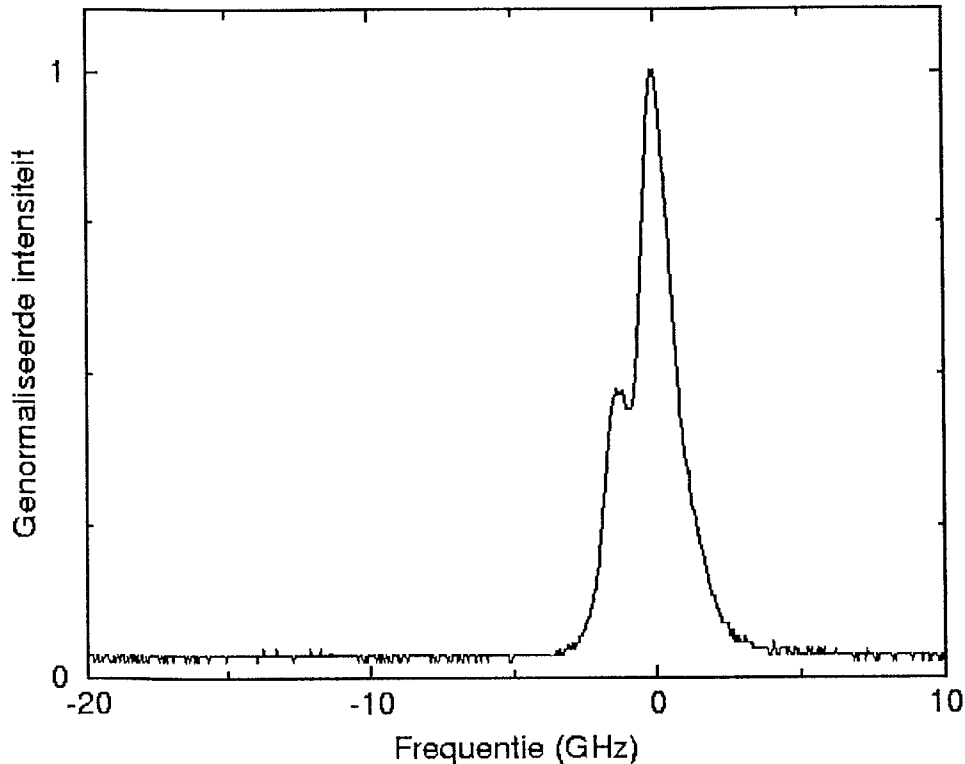
Figuur 4

Electro-optische dubbele breking ten gevolge van ruimteladingen in de Bragg-spiegels

wordt waarschijnlijk veroorzaakt door mechanische spanning in het materiaal waaruit de VCSEL is gemaakt. Deze spanning is waarschijnlijk ook de oorzaak van de spreiding in de polarisatie richting tussen ogenschijnlijk identieke VCSELs. De invloed van de mechanische spanning kan gebruikt worden om de dubbele breking te beïnvloeden. Door de VCSEL een beetje te buigen kan de dubbele breking op bijna elke gewenste waarde worden ingesteld. Dit effect is gebruikt in het verdere onderzoek naar polarisatie eigenschappen van VCSELs.

Niet-lineaire anisotropie

Naast de hierboven beschreven lineaire anisotropie is er ook nog een ander effect dat de polarisatie van een VCSEL beïnvloedt, namelijk de verzadiging het verschijnsel



Figuur 5

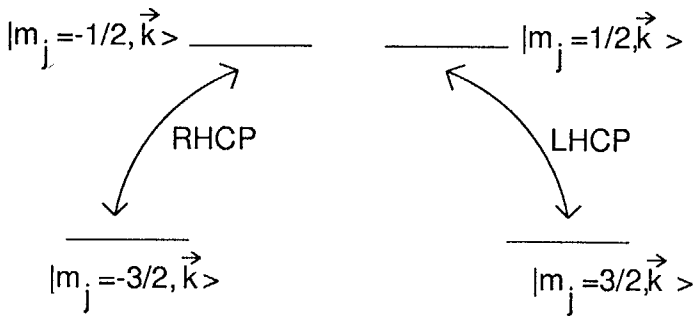
Optisch spectrum van een VCSEL met symmetrische doping. De frequentiesplitsing is ongeveer een ordegrrootte kleiner dan voor asymmetrische doping.

dat de lichtversterking minder efficiënt wordt naarmate de lichtintensiteit toeneemt. Een maat voor de verzadiging is de verzadigings-intensiteit, die is gedefinieerd als de intensiteit waarbij de lichtversterking een factor 2 kleiner is dan de onverzadigde versterking.

In VCSELs hangt de mate van verzadiging af van de lichtpolarisatie: lineair gepolariseerd licht heeft meestal minder last van verzadiging dan circulair gepolariseerd licht (de verzadigingsintensiteit voor lineair gepolariseerd licht is dus hoger dan voor circulair gepolariseerd licht). Een laser gaat het liefst zodanig werken dat hij het minste last heeft van verzadiging (en dus

maximaal kan profiteren van de lichtversterking). Een VCSEL zendt daarom bij voorkeur lineair gepolariseerd licht uit. Omdat de sterkte van de voorkeur bepaald wordt door de verzadiging, en toeneemt als de intensiteit van het VCSEL licht toeneemt, is hier sprake van een niet-lineaire anisotropie.

De oorsprong van de polarisatie-afhankelijkheid van de verzadiging ligt in het niveau-schema van het versterkend medium van de VCSEL (de quantum-put) [5]. De geleidingsband wordt beschreven met de magnetische quantumgetallen $m_j = \pm 1/2$ en de valentieband met $m_j = 3/2$. Er



Figuur 6

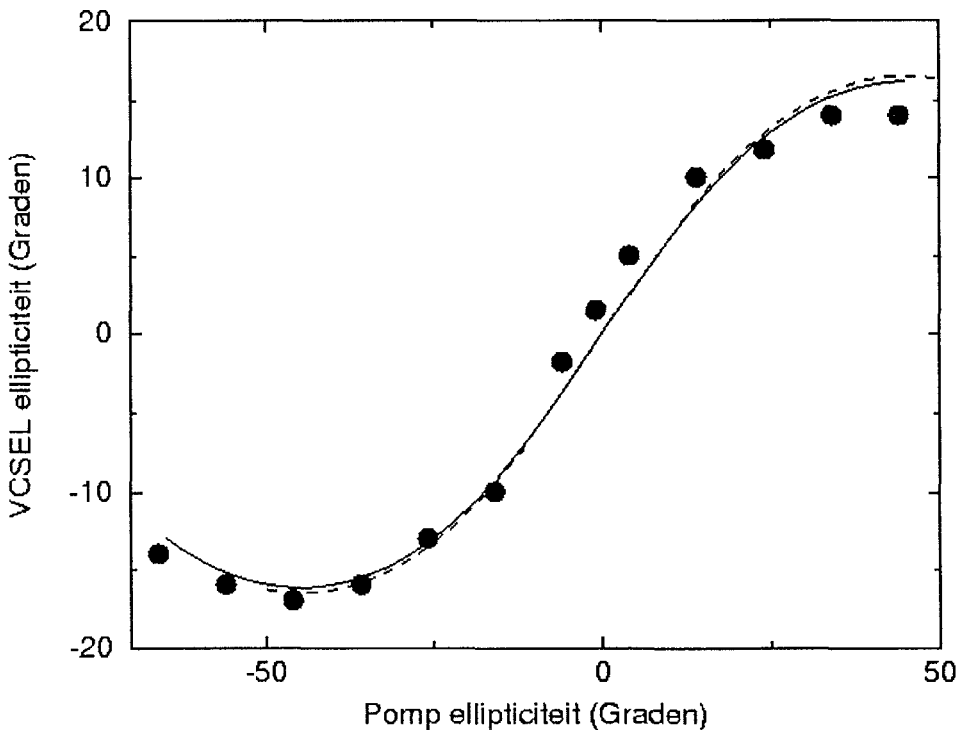
Niveauschema van een quantum-put RHCP geeft aan dat de twee niveau's koppelen met rechtshandig circulaair gepolariseerd licht, en LHCP geeft aan dat de niveau's koppelen met linkshandig circulaair gepolariseerd licht

is dus een overgang die koppelt met rechtshandig circulaair gepolariseerd licht, en een die koppelt met linkshandig circulaair gepolariseerd licht. De populatie-inversie die wordt gecreëerd door het pomp proces wordt verdeeld over deze twee overgangen. De populatie-inversie wordt dus als het ware verdeeld over twee reservoirs, die koppelen met de twee circulaire polarisaties. Nu is de laserwerking het meest efficiënt als het verschil in populatie-inversie tussen de reservoirs zo klein mogelijk is, hetgeen betekent dat het licht lineair gepolariseerd is. Dit verklaart de voorkeur voor lineair gepolariseerd licht in een VCSEL.

Populatieverschillen tussen de reservoirs worden teniet gedaan door populatie-overdracht tussen de reservoirs ten gevolge van zogenaamde "spin-flip"-processen. Als deze populatie-overdracht heel snel plaatsvindt, d.w.z. als er veel spin-flip processen zijn, dan is het populatieverschil tussen de reservoirs altijd klein. In dit geval is de voorkeur voor lineaire polarisatie heel zwak. Als de populatie-overdracht daartegen heel inefficiënt is (weinig spin-flip processen), is de voorkeur juist heel sterk. De sterkte van de niet-lineaire voorkeur voor lineair gepolariseerd licht wordt dus

bepaald door de het aantal spin-flips dat per seconde plaatsvindt

Experimenteel kan de spin-flip frequentie bepaald worden door de populatieverdeling over de reservoirs kunstmatig uit evenwicht te brengen. In optisch gepompte VCSELs gebeurt dit door te pompen met circulaair gepolariseerd pomplicht [6]. Het populatieverschil tussen de twee reservoirs in de stationaire toestand wordt bepaald door de verhouding tussen de levensduur van de populatie in de aangeslagen toestand en de gemiddelde tijd tussen twee spin-flips. Deze verhouding wordt Γ genoemd. Doordat er een populatieverschil tussen de twee reservoirs bestaat, wordt de ene circulaair gepolariseerde component van het VCSEL-licht iets meer versterkt dan de andere. Hierdoor wordt het VCSEL-licht elliptisch gepolariseerd. Feitelijk hebben we dus een soort geheugen effect voor de pomp polarisatie. Als de pomp lineair is, is de VCSEL ook lineair gepolariseerd, en als de pomp rechts(links)-handig circulaair gepolariseerd is, dan is de VCSEL rechts(links)-handig elliptisch gepolariseerd. Dit effect is geïllustreerd in figuur 7. Uit de maximale ellipticiteit die we waarnemen kan Γ worden



Figuur 7
Experimenteel resultaat

afgeleid. We vinden dat $\Gamma = 300$: de gemiddelde tijd tussen twee spin flips is 300x kleiner dan de levensduur van de boven-toestand, hetgeen overeenkomt met een spin-fliptijd van 3ps

De polarisatie-afhankelijkheid van de verzadiging is dus heel erg klein. Het feit dat $\Gamma = 300$ betekent dat de verzadigings-intensiteit voor lineair gepolariseerd licht 0.3% groter is dan voor circulair gepolariseerd licht. Het feit dat de verzadiging bijna onafhankelijk is van de polarisatie verklaart waarom de polarisatie-eigenschappen van VCSELs zo goed beschreven kunnen worden door de lineaire anisotropie.

Conclusie

De polarisatie-eigenschappen van VCSELs zijn van grote invloed op de praktische toepasbaarheid van deze lasertjes. Uit ons onderzoek blijkt dat de lineaire anisotropie (dubbele breking en dichroïsme) dominant de polarisatie bepalen. Met name het electro-optisch effect ten gevolge van ruimteladingen in de Bragg-spiegels bepaalt de frequentiesplitsing tussen de orthogonaal gepolariseerde modes van de VCSEL. De rol van de polarisatie afhankelijkheid van de verzadiging in VCSELs is klein in vergelijking met de lineaire anisotropie. De verzadigingsintensiteit blijkt ongeveer 0.3% te variëren als functie van de polarisatie

Referenties

- [1] J L Jewell, A Scherer, S.L. McCall, Y H Lee, S. Walker, J P Harbison and L T Florez *Electron Lett* , 25(17), 1123 (1989).
 - [2] A.K. Jansen van Doorn, M.P. van Exter and J.P. Woerdman *Appl. Phys. Lett.*, 69(8), 1041 (1996)
 - [3] M P van Exter, A K Jansen van Doorn and J P Woerdman *Phys Rev. A*, 56(1), 845 (1997)
 - [4] R.F.M Hendriks, M.P van Exter, J.P. Woerdman, A. van Geelen, L. Weegels, K.H. Gulden and M. Moser, *Appl. Phys. Lett.*, 71(18) 2599 (1997).
 - [5] M San Miguel, Q. Feng and J.V Moliney. *Phys Rev A*, 52(2), 1728 (1995).
 - [6] R.F M Hendriks, M.P van Exter, J.P. Woerdman, K H Gulden and M Moser. *IEEE J Quantum Electron* , 34(8), 1 (1998).
-
-