

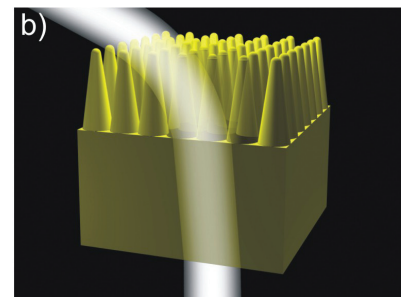
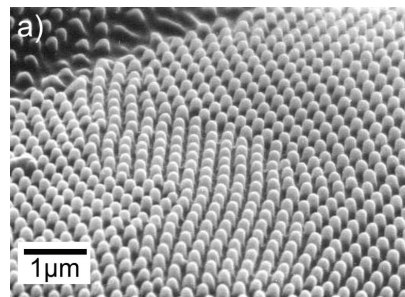
Efficiënt licht invangen met behulp van nanogestructureerde oppervlakken

Met behulp van een nanogestructureerd oppervlak wordt de reflectie van licht op het grensvlak van een halfgeleider met een hoge brekingsindex en lucht drastisch verminderd. Met deze nieuwe methode komt er veel meer licht in de halfgeleider, wat een stevige basis legt voor bijvoorbeeld gevoeligere lichtdetectoren of efficiëntere zonnecellen en LEDs. Dit onderzoek is geïnspireerd op de ogen van nachtvlinders. Deze ogen zijn bedekt met taps toelopende nanostaafjes, waardoor de vlinders beter zien in het donker.

Silke Diedenhofen, Rienk Algra, Erik Bakkers en Jaime Gómez Rivas

176

In een homogeen medium plant licht zich voort als een rechte bundel. De richting van de lichtbundel verandert als de bundel een grensvlak tussen verschillende media tegenkomt. Als dit gebeurt wordt een fractie van het licht weerkaatst. De rest wordt afgebogen en gaat door in het tweede medium. Voor grote invalshoeken en aan grensvlakken tussen lucht en vaste stoffen, zoals halfgeleiders, wordt bijna 100% van het licht gereflecteerd. In de natuur zijn grensvlakken te vinden waarbij de reflectie wordt gereduceerd. Al in de jaren zestig van de vorige eeuw hebben onderzoekers ontdekt dat op de ogen van nachtvlinders een nanogestructureerde laag zit [1,2]. Deze laag verbetert het zicht van de insecten door meer licht in het oog te leiden. In figuur 1a is een elektronenmicroscopopname te zien van de taps toelopende staafjes die op het oog van een nachtvlinder zitten. Deze staafjes hebben een lengte van ongeveer 200 nanometer en dezelfde diameter. Dankzij deze structuren wordt



Figuur 1 a) Elektronenmicroscopopname van het oog van een nachtvlinder (ter beschikking gesteld door P. Vukusic, University of Exeter). b) Schematische weergave van een geleidelijke verhoging van de brekingsindex.

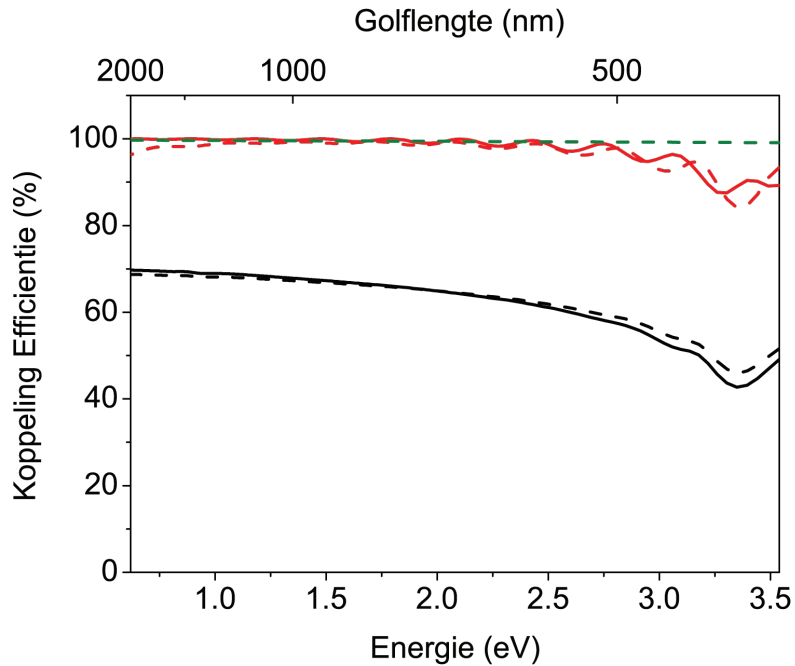
het licht niet aan de oppervlakte tussen het oog en de lucht gereflecteerd maar het oog ingeleid.

Het schema in figuur 1b verduidelijkt het proces van het verbeterde zicht van de nachtvlinders. Door de taps toelopende staafjes neemt de effectieve brekingsindex langzaam toe van de brekingsindex van lucht (1,00) naar de brekingsindex van het oog (1,57). Deze geleidelijke verandering vermijdt een overgang met een groot verschil in brekingsindices en ver-

laagt daardoor de reflectie. In tegenstelling tot deze biostructuren, wordt in de industrie gebruik gemaakt van antireflectielagen die bestaan uit een enkele dunne uniforme laag of meerdere lagen die door middel van interferentie de reflectie verlagen. Het grote nadeel van deze methode is dat de antireflectielagen specifiek voor een bepaalde golflengte en hoek gemaakt worden en daarom slechts in een beperkt kleur- en hoekbereik efficiënt zijn.

Mogelijkheden van bio-geïnspireerde lagen

Met de hedendaagse technologie is het mogelijk om nieuwe bio-geïnspireerde nanostructuren te produceren [3]. Hierdoor kan de reflectie over een breed spectrum verminderd worden en dit is niet afhankelijk van de invalshoek van het licht dat op de structuren valt [4]. Met deze nieuwe lagen, bestaande uit nanodraden, is het mogelijk om de efficiëntie van zonnecellen te verhogen of om meer licht uit een LED te krijgen. Berekeningen laten zien dat met behulp van deze lagen bijna al het licht dat op een halfgeleidend materiaal valt ingekoppeld kan worden. In figuur 2 is een berekening te zien van de inkoppefficiëntie in silicium, het meest gebruikte materiaal voor zonnecellen. De berekening is gedaan voor silicium met een brekingsindex die van 3,45 naar 4,0 oploopt over het golflengtegebied van 2000 nm naar 550 nm en lichtabsorptie tussen 550 nm en 1000 nm, en met een antireflectie laag met een langzaam oplopende brekingsindex van 1 (lucht) naar 3,3. Het is duidelijk dat met de laag meer dan 95% van het licht in het siliciumsubstraat binnentreedt. De afgelopen jaren werd op verschillende manieren de reflectie van meestal siliciumsubstraten verlaagd door nanostructuren te etsen. Met deze methode werd de speculaire reflectie, dus het licht dat met dezelfde hoek wordt gereflecteerd als het licht dat op de structuur valt, sterk verlaagd tot minder dan 1%. Hierbij is niet duidelijk of het licht beter het sample wordt ingeleid, of diffuus wordt gereflecteerd. [5] Deze metingen werden altijd in het zichtbare bereik van het spectrum gedaan, omdat op een verbeterde lichtkoppeling voor zonnecellen gemikt werd. Omdat transmissiemetingen in het zichtbare

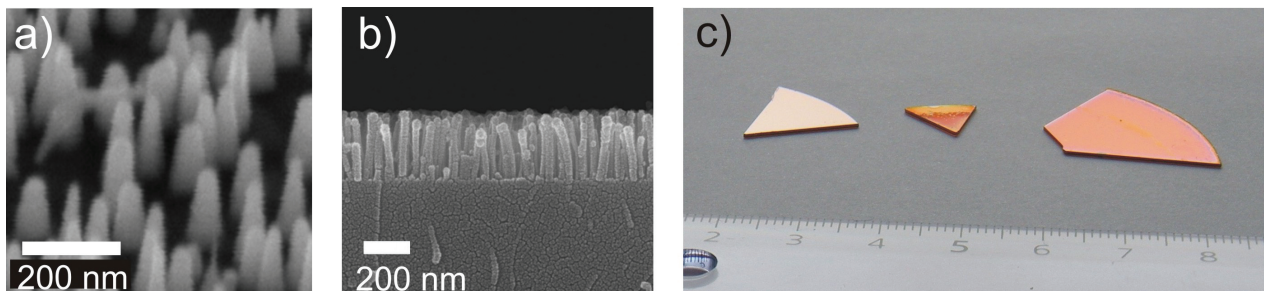


Figuur 2 Berekening van de koppelingsefficiëntie van licht in silicium zonder antireflectie laag (zwarte curves) en met nanodraden (rode curves) voor een loodrechte inval. De onderbroken curves zijn berekeningen voor een hoek van 60°.

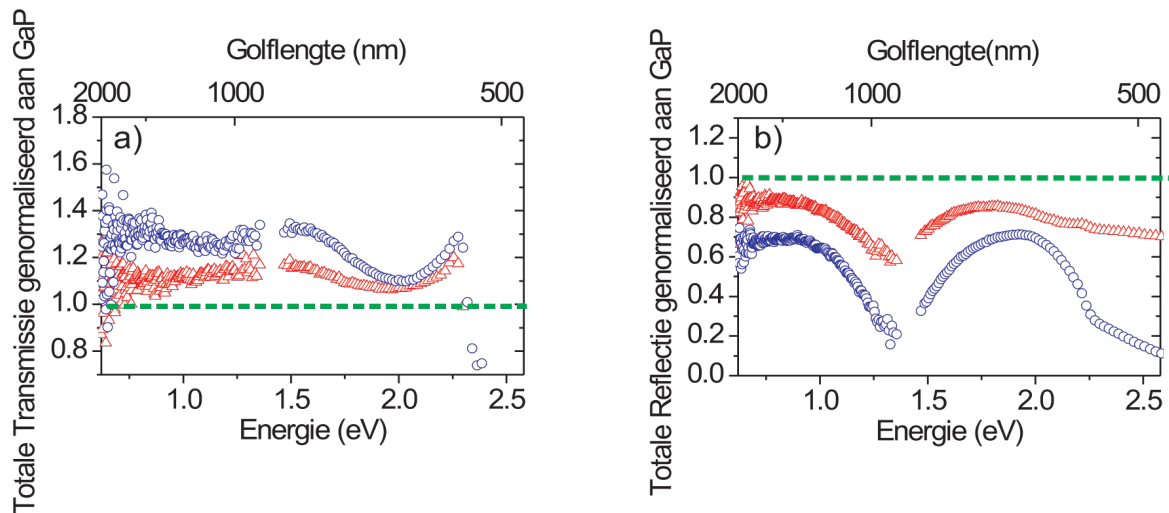
spectrum niet mogelijk zijn voor silicium, is het niet mogelijk om eenduidig vast te stellen wat de oorzaak voor de vermindering van de reflectie is: een hogere absorptie in de nanostructuren, lichtverstrooiing en daardoor een verhoging van diffuus gereflecteerd licht, een langzaam oplopende brekingsindex die meer licht in het substraat koppelt, of uiteindelijk een combinatie van deze effecten. Omdat wij met galliumfosfidesubstraten werken, die transparant zijn in het rode en infrarode deel van het spectrum, was het mogelijk om voor de eerste keer de transmissie door dergelijke structuren te meten. Deze metingen hebben aangetoond dat de reflectie in zulke structuren wordt verlaagd omdat meer licht in het substraat geleid wordt door een langzaam oplopende brekingsindex.

Realisatie van een bio-geïnspireerde laag

De door ons gemaakte antireflectie laag bestaat uit halfgeleidende nanodraden, die op kristallijne oppervlakken kunnen groeien door middel van een chemisch proces [6]. Wij hebben draden bestaande uit galliumfosfide op een oppervlak van galliumfosfide gegroeid. De draden organiseren zichzelf tijdens de groei, dus wij hebben geen controle over de positie en de dichtheid van de draden. Het is ook mogelijk om deze draadjes op silicium te groeien, dat meestal voor zonnecellen gebruikt wordt. In figuur 3a en 3b is een elektronenmicroscopieopname van de structuren te zien. De nanodraden in figuur 3a lijken op de nanostaafjes die op het oog van een nachtvlinder zitten. De nanodraden van figuur 3b zijn veel



Figuur 3 Elektronenmicroscopieopname van a) de taps toelopende nanodraden en b) de rechte nanodraden, c) van links naar rechts een foto van een galliumfosfidemonster, taps toelopende nanodraden op galliumfosfide en rechte nanodraden op galliumfosfide. Het galliumfosfidemonster lijkt lichter omdat meer licht naar de camera gereflecteerd wordt. De antireflectie laag op de twee andere monsters verlaagt de reflectie, waardoor de monsters donkerder zijn.



Figuur 4 a) Gemeten transmissie door een galliumfosfidemonster met taps toelopende nanodraden (blauwe cirkels) en met rechte nanodraden (rode driehoekjes) genormaliseerd aan een galliumfosfidemonster. b) Gemeten reflectie voor dezelfde samples.

smaller en staan recht. Deze draadjes verkleinen de reflectie doordat ze met verschillende lengten zijn gegroeid. Een langzame verhoging van de brekingsindex wordt gerealiseerd omdat de dichtheid aan draden dicht bij het oppervlak hoger is dan verder van het oppervlak. De foto in figuur 3c laat, van links naar rechts, de reflectie van een stukje galliumfosfide, een stukje galliumfosfide met de taps toelopende staafjes en een stukje met de rechte staafjes zien. Het stukje galliumfos-

fide op de foto is lichter, omdat meer licht gereflecteerd wordt. De twee andere monsters zijn donkerder omdat meer licht in het monster naar binnen gaat en daardoor minder licht naar de camera wordt gereflecteerd.

Breedbandige antireflectie

In figuur 4a is een meting te zien van de transmissie door de twee stukjes galliumfosfide met de twee verschillende structuren, genormaliseerd aan de transmissie door galliumfosfide.

Met behulp van een integrerende bol die achter het monster is geplaatst en het licht opvangt dat in alle richtingen kan worden uitgestraald na doorgang of treffen van een sample, wordt al het licht dat door de monsters gaat gemeten. Dus zowel licht dat door de nanodraden diffuus in het substraat is verstrooid als de directe lichtbundel. Hierbij betekent een genormaliseerde transmissie of reflectie van 1 dat de laag van nanodraden geen effect op de transmissie of reflectie heeft. Dat voor de hele meting de transmissie boven 1 ligt, laat zien dat het hele golflengtebereik van rood tot en met infrarood beter in het monster wordt binnengelaten dankzij de nanostaafjes. Voor de taps toelopende draden meten wij een maximale verhoging van de transmissie van 30%. Dus, in dit geval bereikt 30% meer licht de achterkant van het monster. Om een beter begrip van de antireflectielagen te krijgen, hebben wij berekeningen met een transfermatrixmethode gemaakt. Dat wil zeggen dat wij de nano-draadlaag in dunne lagen verdeeld hebben, en de brekingsindex van laag naar laag langzaam verhoogd hebben. Voor de taps toelopende draadjes wordt de brekingsindex gradueel van 1,1 naar 2,1 verhoogd, over de gehele dikte van de laag. Voor de rechtopstaande draden hebben wij een verschil van 1,1 naar 1,4 gebruikt om de meetdata te kunnen reproduceren. De brekingsindex van galliumfosfide in het zichtbaar bereik ligt bij 3,4, dus is het mogelijk de transmissie nog

Silke Diedenhofen (1980) studeerde Elektrotechniek in Duisburg, Duitsland. Haar afstudeeronderzoek deed ze in de groep Optoelektroniek onder leiding van Dieter Jäger. Sinds mei 2006 is ze OIO aan het FOM Instituut AMOLF in de groep Nanowire Photonics bij Philips Research in Eindhoven, waar ze optische fenomenen in nanodraadlagen onderzoekt.



diedenhofen@amolf.nl



Rienk Algra (1981) studeerde scheikunde in Nijmegen. Zijn afstudeeronderzoek deed hij in de Vaste Stof Chemie groep onder leiding van Elias Vlieg. Sinds maart 2006 is hij promovendus voor Mzi (Material innovation institute), Radboud Universiteit Nijmegen en Philips Research, waar hij werkt aan het groeimechanisme van halfgeleider nanodraden.

Erik Bakkers (1972) studeerde Scheikunde in Utrecht. Hij promoveerde bij dezelfde universiteit onder leiding van John Kelly en Daniël Vanmaekelbergh bij de vakgroep Gecondenseerde Materie. Direct na zijn promotie in 2000 trad hij in dienst bij Philips Research te Eindhoven, waar hij werkt aan halfgeleidende nanodraden.



Jaime Gómez Rivas studeerde natuurkunde en astrofysica aan de Universidad Complutense de Madrid (Spanje) en de Université de Liège (België). Van 1995 tot 1997 was hij onderzoeksassistent bij de Stichting Ruimte Onderzoek Nederland. Hij promoveerde in 2002 aan de UvA. Van 2002 tot 2005 werkte hij als postdoctoraal onderzoeker bij de RWTH Aachen (Duitsland). Sinds 2005 leidt hij de AMOLF-groep Nanowire Photonics bij Philips Research in Eindhoven.



verder te verhogen. Daarvoor is het nodig om méér galliumfosfide aan het oppervlak te hebben. Dit is mogelijk door dikkere nanodraden te groeien, maar dan zal ook méér licht verstrooid worden. Een andere optie is om nanodraden met een grotere dichtheid op het oppervlak te groeien en de diameter van de draden niet te veranderen. Maar daarvoor zal bij een hoge dichtheid een controle van zowel positie als diameter van de draden nodig zijn, wat wij op dit moment niet kunnen.

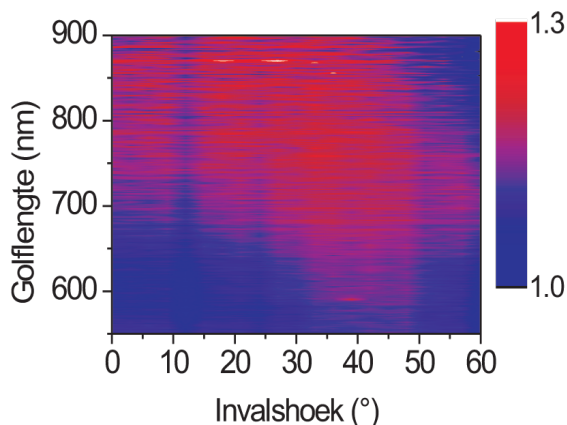
Verder hebben wij de totale reflectie van de structuren gemeten. In dit geval hebben wij de samples achter een integrerende bol geplaatst om zowel het diffuus gereflecteerde licht als het speculair gereflecteerde licht te meten. De reflectie van de twee monsters genormaliseerd aan de reflectie van galliumfosfide is te zien in figuur 4b. Een genormaliseerde reflectie van minder dan 1 betekent dat de nanodraden de reflectie verlagen, dus zowel de speculaire reflectie als de diffuse reflectie. Met deze metingen kunnen wij laten zien dat nanodraden de reflectie verlagen door meer licht naar het substraat te sturen, en niet alleen het speculair gereflecteerde licht te verkleinen door meer licht diffuus te reflecteren. De som van de totale reflectie en totale transmissie is 1 voor beide samples, voor een energie kleiner dan 2,26 eV, wat betekent dat absorptie niet belangrijk is voor een energie kleiner dan de bandgap (2,26 eV).

Antireflectie ook voor grote hoeken

In figuur 5 is een hoekafhankelijke meting van de transmissie door de monsters te zien. De meting is gedaan aan de rechtopstaande draden en de transmissie is gedeeld door de transmissie van een stukje galliumfosfide zonder antireflectie-laag, om alleen

naar het effect van de nanodraden te kijken. Voor alle hoeken en golflengten worden waarden groter dan 1 gevonden, en wordt er dus meer licht in het monster geleid. Door deze meting wordt duidelijk, dat het licht over het hele hoekbereik beter door het sample wordt doorgelaten.

Samenvattend zijn deze bio-geïnspireerde structuren in staat de transmissie door een halfgeleidend materiaal met een hoge brekingsindex te verhogen over een breed golflengtebereik en een breed hoekbereik. Op dit moment is het mogelijk om de transmissie door galliumfosfide met 30% te verhogen. Hierdoor zou de efficiëntie van zonnecellen en LEDs verhoogd kunnen worden.



Figuur 5 Een hoekafhankelijke transmissiemeting van de rechte nanodraden, genormaliseerd aan een galliumfosfidemonster.

Referenties

- 1 C. G. Bernhard, *Endeavour*, **26** (1967), 79.
- 2 P. Vukusic and J. R. Sambles, *Nature* **424** (2003), 852.
- 3 R.S. Wagner and W.C. Ellis, *Appl. Phys. Lett.*, **4** (1964), 89.
- 4 Y.-J. Lee, D. S. Ruby, D. W. Peters, B. B. McKenzie, and J. W. P. Hsu, *Nano Lett.*, **8** (2008), 1501.
- 5 Y.-F. Huang, S. Chattopadhyay, Y.-J. Jen, C.-Y. Peng, T.-A. Liu, Y.-K. Hsu, C.-L. Pan, H.-C. Lo, C.-H. Hsu, Y.-H. Chang, C.-S. Lee, K.-H. Chen, L.-C. Chen, *Nature Nanotechnology*, **2** (2007), 770.
- 6 S. L. Diedenhofen, G. Vecchi, R.E. Algra, A. Hartsuiker, O.L. Muskens, G. Immink, E.P.A.M. Bakkers, W.L. Vos, and J. Gómez Rivas, *Advanced Materials* **21** (2009), 973.