

Ultrasnelle kleurverandering van een nano-spiegelpaleis

Het beheersen van de emissie en voortplanting van licht zijn belangrijke doelen in zowel de natuurkunde, nanotechnologie als levenswetenschappen omdat licht – als drager van energie en informatie – zich met onvoorstelbare snelheid voortplant. Op het FOM-instituut voor Atomaire en Moleculaire Fysica (AMOLF) te Amsterdam hebben we in samenwerking met de Universiteit van Minnesota (VS) aangetoond dat we de selectieve kleur van een nano-spiegelpaleis – een zogeheten fotonisch *band gap*-kristal – zo snel kunnen veranderen dat het wellicht mogelijk wordt om lichtpulsen te vangen in trilholtes in het kristal. Tijmen Euser en Willem Vos

4

Het temmen van licht wordt nagejaagd in een nieuwe discipline die 'nanofotonica' wordt genoemd. In 1987 voorspelde de Amerikaanse onderzoeker Eli Yablonovitch dat licht in theorie geheel kan worden gecontroleerd in speciale nanostructuren, bekend als fotonische kristallen. Deze voorspelling vormde het startschot voor wereldwijd onderzoek naar dergelijke structuren waarvan onderzoekers verwachten dat ze bouwstenen zullen vormen van optische 'chips' waarmee men informatie als licht manipuleert. Experimenteel leidt dit tot vragen als: "Hoe kan je atomen zo manipuleren dat ze licht uitzenden als jij dat wilt?" en "Hoe kan je fotonen laten propageren of zelfs stoppen zoals jij het wilt?" Een fotonisch kristal is een sterk geordende nanostructuur die vele luchtballen bevat (zie figuur 1). De kristallen worden gemaakt uit kunstmatige opalen. Opalen – die ook in de natuur voorkomen – bestaan uit een zeer geordende opeenstapeling van silicabol-

letjes. De ruimte tussen de bolletjes wordt in een chemisch proces opgevuld met silicium waarna de silicabolletjes worden verwijderd. De resulterende luchtballen hebben de typische doorsnede van de golflengte van licht. Licht van een bepaalde kleur dat in het fotonisch kristal komt, wordt door de structuur in alle richtingen verstrooid. Het kristal werkt als een spiegel-paleis voor fotonen. Door interferentie-effecten¹ worden bepaalde kleuren volledig uitgesloten door het kristal. Het verboden kleurengedrag wordt de fotonische *band gap* genoemd [1]. Het uitsluiten van bepaalde kleuren leidt tot het bijzondere fenomeen dat een in het kristal ingebrachte lichtbron (bijvoorbeeld een atoom of quantumdot) geen licht kan uitzenden (zie figuur 2, links). De grootte van de luchtballen en de brekingsindex² bepalen welke kleur licht wel of niet in het kristal kan doordringen. Als een fotonisch kristal eenmaal is



Tijmen Euser studeerde technische natuurkunde aan de Universiteit Twente. In 2007 promoveerde hij op ultrasnelle schakelexperimenten aan fotonische kristallen gedaan op AMOLF en aan de Universiteit Twente. Op het moment verricht hij postdoctoraal onderzoek aan fotonisch-kristal-fibers in de Max Planck Research Group van de Universiteit Erlangen-Nuremberg in Duitsland.



Willem Vos studeerde natuurkunde aan de Universiteit van Amsterdam (1987), waar hij in 1991 promoveerde op hagedrukfysica. Sinds 1993 bestudeert hij fotonische kristallen, onder andere om spontane emissie te beheersen en ultrasnel licht te schakelen. Sinds 2005 is hij groepsleider bij het Centrum voor Nanofotonica, FOM-Instituut AMOLF te Amsterdam. Daarnaast leidt hij de groep Complex Photonic Systems (COPS) aan de Universiteit Twente.

Ultrasnelle kleurverandering van een nano-spiegelpaleis

Het beheersen van de emissie en voortplanting van licht zijn belangrijke doelen in zowel de natuurkunde, nanotechnologie als levenswetenschappen omdat licht – als drager van energie en informatie – zich met onvoorstelbare snelheid voortplant. Op het FOM-instituut voor Atomaire en Moleculaire Fysica (AMOLF) te Amsterdam hebben we in samenwerking met de Universiteit van Minnesota (VS) aangetoond dat we de selectieve kleur van een nano-spiegelpaleis – een zogeheten fotonisch *band gap*-kristal – zo snel kunnen veranderen dat het wellicht mogelijk wordt om lichtpulsen te vangen in trilholtes in het kristal. Tijmen Euser en Willem Vos

4

Het temmen van licht wordt nagejaagd in een nieuwe discipline die ‘nanofotonica’ wordt genoemd. In 1987 voorspelde de Amerikaanse onderzoeker Eli Yablonovitch dat licht in theorie geheel kan worden gecontroleerd in speciale nanostructuren, bekend als fotonische kristallen. Deze voorspelling vormde het startschot voor wereldwijd onderzoek naar dergelijke structuren waarvan onderzoekers verwachten dat ze bouwstenen zullen vormen van optische ‘chips’ waarmee men informatie als licht manipuleert. Experimenteel leidt dit tot vragen als: “Hoe kan je atomen zo manipuleren dat ze licht uitzenden als jij dat wilt?” en “Hoe kan je fotonen laten propageren of zelfs stoppen zoals jij het wilt?” Een fotonisch kristal is een sterk geordende nanostructuur die vele luchtballen bevat (zie figuur 1). De kristallen worden gemaakt uit kunstmatige opalen. Opalen – die ook in de natuur voorkomen – bestaan uit een zeer geordende opeenstapeling van silicabol-

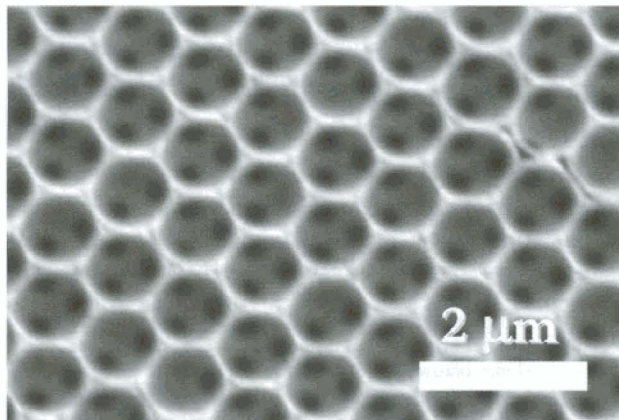
letjes. De ruimte tussen de bolletjes wordt in een chemisch proces opgevuld met silicium waarna de silicabolletjes worden verwijderd. De resulterende luchtballen hebben de typische doorsnede van de golflengte van licht. Licht van een bepaalde kleur dat in het fotonisch kristal komt, wordt door de structuur in alle richtingen verstrooid. Het kristal werkt als een spiegel-paleis voor fotonen. Door interferentie-effecten¹ worden bepaalde kleuren volledig uitgesloten door het kristal. Het verboden kleurgebied wordt de fotonische *band gap* genoemd [1]. Het uitsluiten van bepaalde kleuren leidt tot het bijzondere fenomeen dat een in het kristal ingebrachte lichtbron (bijvoorbeeld een atoom of quantumdot) geen licht kan uitzenden (zie figuur 2, links). De grootte van de luchtballen en de brekingsindex² bepalen welke kleur licht wel of niet in het kristal kan doordringen. Als een fotonisch kristal eenmaal is



Tijmen Euser studeerde technische natuurkunde aan de Universiteit Twente. In 2007 promoveerde hij op ultrasnelle schakelexperimenten aan fotonische kristallen gedaan op AMOLF en aan de Universiteit Twente. Op het moment verricht hij postdoctoraal onderzoek aan fotonisch-kristal-fibers in de Max Planck Research Group van de Universiteit Erlangen-Nuremberg in Duitsland.



Willem Vos studeerde natuurkunde aan de Universiteit van Amsterdam (1987), waar hij in 1991 promoveerde op hogedrukfysica. Sinds 1993 bestudeert hij fotonische kristallen, onder andere om spontane emissie te beheersen en ultrasnel licht te schakelen. Sinds 2005 is hij groepsleider bij het Centrum voor Nanofotonica, FOM-Instituut AMOLF te Amsterdam. Daarnaast leidt hij de groep Complex Photonic Systems (COPS) aan de Universiteit Twente.



Figuur 1 Een afbeelding van een fotonisch kristal – een spiegel-paleis op de nanometerschaal – gemaakt met een elektronenmicroscop. De kristallen bestaan uit een periodieke structuur van luchtballen met een 'skelet' van silicium (het materiaal waar computerchips van worden gemaakt). De luchtballen voor dit experiment hebben een doorsnede van circa 900 nanometer. Deze structuren – inverse opalen geheten – zijn voor licht als kleine spiegel-tjes als in een nano-spiegel-paleis.

gemaakt, liggen deze eigenschappen vast. Of toch niet...?

Als je wel in staat bent de *band gap* van een fotonisch kristal voor een korte tijd te veranderen, dan nemen de mogelijkheden voor een toepassing van de kristallen enorm toe. Je zou je kunnen voorstellen dat je dan met licht kunt schakelen. Voor toekomstige 'fotonische computerchips' is het van belang dat je de *band gap* zo snel kunt schakelen dat licht ineens tot stilstand kan worden gebracht. Wij hebben nu voor het eerst experimenteel een supersnelle verandering van de kleur van een fotonisch *band gap*-kristal aangetoond [2]. Een mogelijke toepassing van fotonisch schakelen wordt geïllustreerd in figuur 2, rechts: door het fotonisch kristal snel te schakelen kan een lichtbron in het kristal plotseling wel licht uitzenden en wel wanneer jij dat wilt.

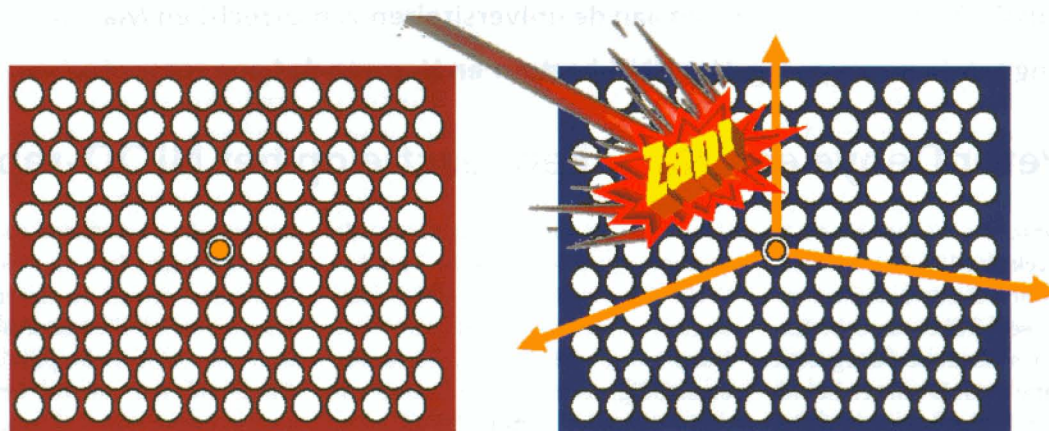
Om het fotonisch kristal te schakelen wordt het met een korte intense laserpuls 'aangetikt'. Met deze puls

worden elektronen in de halfgeleider aangeslagen waardoor de brekingsindex tijdelijk en ultrasnel verminderd kan worden. Op deze manier kan de brekingsindex voldoende veranderd worden om de *band gap* van kleur te laten verschuiven. Met een tweede korte laserpuls wordt de kleur van het geschakelde kristal gemeten. Tijdens deze meting zagen we dat de kleur van de fotonische *band gap* binnen 1 picoseconde³ blauwer wordt (zie figuur 3, links). Dit is snel genoeg om in potentie licht in trilholtes in het kristal te vangen. Nadat het kristal door de eerste laserpuls is geschakeld, is het in 20 picoseconden weer in de oorspronkelijke staat terug (zie figuur 3, rechts). De hele schakelcyclus verloopt zo snel dat het kristal mogelijk 10 maal sneller zou kunnen schakelen dan de snelste computers op dit moment.

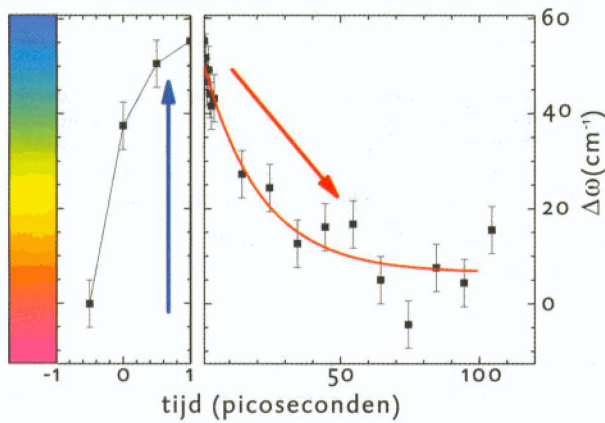
Het ultrasnel schakelen van optische kristallen legt daarmee het fundament voor mogelijke schakelingen op basis van fotonen als alternatief voor

de huidige elektronische schakelingen op silicium chips. Door in zulke fotoncomputers gebruik te maken van fotonische trilholtes met een nauwe lijnbreedte is het mogelijk om de benodigde schakelenergie zeer drastisch te verlagen. Hoewel de eerste fotonisch geschakelde modulatoren rijp lijken voor de markt, zijn er nog heel veel open vragen. Het huidige onderzoek richt zich op de fysica van de schakelprocessen, de invloed van onvermijdelijke imperfecties van de fotonische kristallen en op trilholtes: recent is onze groep er in geslaagd om een ultrasnelle film te maken van de veranderende kleur van een geschakelde fotonische trilholte [3].

De fotonische kristallen die we in onze experimenten gebruiken hebben eigenschappen die overeenkomen met de kleuren die in de moderne telecommunicatiemedia zoals glasfibers worden gebruikt. De resultaten van dit onderzoek zijn daarom van belang voor toepassingen, ook omdat de kristal-



Figuur 2 De linker figuur laat een schematische weergave van een fotonisch *band gap*-kristal zien. In het midden van de afbeelding is een lichtbron getekend die licht wil uitzenden in dezelfde kleur als de *band gap* (rood). Deze kleur is echter niet toegestaan in het kristal. (Rechts) Een korte laserpuls verandert razendsnel de kleur van het kristal van rood naar blauw. Het rode licht van de lichtbron kan hierdoor het spiegel-paleis uit. Niet lang daarna herstelt het kristal weer en kan de lichtbron geen rood licht meer uitzenden.



Figuur 3 De waarneming van de ultrasnelle kleurverandering van de band gap, als een functie van tijd na de eerste laserpuls. De rechter as toont de gemeten kleurverandering (cm^{-1} is frequentie/lichtsnelheid). De selectieve reflectiekleur van het kristal wordt binnen 1 picoseconde blauwer (links, blauwe pijl). Met vervaltijden van 20 picoseconde, herstelt het kristal zich razendsnel weer in zijn oorspronkelijke staat (rechts, rode pijl).

len worden gemaakt op silicium, een materiaal dat in de computerindustrie veel wordt gebruikt. In onze publicaties bespreken we hoe de resultaten kunnen worden toegepast [2,3].

De fotonische band gap-kristallen zijn gemaakt door de groep van David J. Norris van het Department of Chemical Engineering and Materials Science, aan de University of Minnesota, in Minneapolis (VS), in nauwe samenwerking met de groep van Albert Polman van het Centrum voor Nanofotonica, FOM instituut AMOLF te Amsterdam.

De auteurs danken Raymond Oudeboon hartelijk voor zijn hulp bij het opstellen van deze tekst.

Noten

- 1 Interferentie is de gelijktijdige werking van twee bewegingen die elkaar belemmeren of versterken, in dit geval van lichtgolfbewegingen.
- 2 De brekingsindex geeft aan hoe groot de vertraging van de lichtsnelheid is in een materiaal. Lucht heeft een brekingsindex (n) van 1. In silicium gaat het licht 3,5 maal langzamer ($n=3,5$). Door dit grote verschil in lichtsnelheid treden er sterke spiegelingen op aan de vele oppervlakken binnen het kristal: het nanospiegelpaleis.
- 3 Een picoseconde is een miljoenste van een miljoenste seconde. Om enigszins grip op de extreem korte tijden te krijgen is het handig ze te vertalen naar afstanden: licht reist met 300.000 km/s snel, ofwel 7,5 maal om de aarde in één seconde. De onderzoekers gebruiken laserpulsen van slechts 0,15 picoseconde. In 0,15 picoseconde komt het licht een halve haarbreedte (0,05 mm) verder.

Referenties

- 1 Femius Koenderink, Lydia Bechger en Willem Vos, *Fotonische kristallen: Oases van stilte in het ruisend vacuum*, NTvN 68-6, p. 188-192 (2002).
- 2 Tijmen G. Euser, Hong Wei, Jeroen Kalkman, Yoonho Jun, Albert Polman, David J. Norris en Willem L. Vos, *Ultrafast optical switching of three-dimensional Si inverse opal photonic band gap crystals*, *J. Appl. Phys.* 102, 053111 (2007).
- 3 Philip J. Harding, Tijmen G. Euser, Yoanna Nowicki-Bringuier, Jean-Michel Gérard, en Willem L. Vos, *Dynamical ultrafast all-optical switching of planar GaAs/AlAs photonic microcavities*, *Appl. Phys. Lett.* 91, 111103 (2007).

Meer informatie over fotonische kristallen is beschikbaar op:
www.photonicbandgaps.com
www.amolf.nl
www.cems.umn.edu/research/norris

Opinie

Het Nederlands Instituut voor Oorlogsdocumentatie (NIOD) heeft 27 november een rapport uitgebracht over de carrière van Peter Debye in nazi-Duitsland. Op basis hiervan zal de commissie-Terlouw advies geven aan de universiteiten van Utrecht en Maastricht met betrekking tot de naamgeving. Het NNV-bestuur en Herman de Lang reageren.

Was Peter Debye een Nazi? Een reactie op het NIOD-rapport

Eind januari 2006 verscheen in het weekblad *Vrij Nederland* onder de titel *Nobelprijswinnaar met vuile handen*, een artikel van Sybe Rispens, dat een sensationeel aangezette voorpublicatie vormde van een hoofdstuk uit zijn boek *Einstein in Nederland*. In het artikel werd Peter Debye, Nobelprijswinnaar chemie 1936, van collaboratie met de nazi's beticht. Met name stoelde Rispens zijn beschuldiging op een brief van 9 december 1938 (zes jaar na de machtsovername

door de nazi's in 1933!) die Debye als voorzitter van de Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG) had doen uitgaan en waarin hij stelde dat joodse leden "wegens dwingende heersende omstandigheden" geen lid meer van de DPG konden zijn, en hen daarom vroeg hun uittreden aan de DPG bekend te maken, terwijl de brief ondertekend was met 'Heil Hitler'. Het artikel baarde veel commotie en vormde voor de universiteit van Utrecht aanleiding om – zonder enig nader historisch

onderzoek – het onder haar ressorterende 'Debye Instituut' de naam te ontnemen, terwijl de universiteit van Maastricht hetzelfde deed met de door haar ingestelde 'Debyeprijs'. Op grond van mij ter beschikking staande bronnen heb ik in dit blad (zie *De 'Affaire Debye'*, NTvN 72(2006)220) – en met mij ook anderen – stelling genomen, zowel tegen de beschuldigingen van Rispens als tegen het overhaaste besluit van de universiteiten van Utrecht en Maastricht om op