

Wereldrecord

Diepe nanogaatjes in silicium om licht te vangen

Veel onderzoek is gericht op het ontwikkelen van ruimtelijk geordende structuren in silicium. Dergelijke structuren maken verschillende toepassingen mogelijk zoals chemische sensoren, oppervlakken waarvan de oppervlaktespanning kan worden veranderd en condensatoren in hoogfrequente elektronica waaronder bijvoorbeeld mobiele telefoons. De ruimtelijk geordende structuren in dit artikel zijn gemaakt om fotonische kristallen te vormen. Léon Woldering, Willem Tjerkstra, Irwan Setija en Willem Vos

322

Fotonische kristallen zijn periodieke structuren waarin twee verschillende materialen elkaar op een geordende manier afwisselen. Deze beide materialen hebben verschillende brekingsindices voor licht. De periodiciteit van de twee materialen heeft een lengteschaal in de orde

van de golflengte van licht. Door de bijzondere structuur wordt de propagatie van licht in het kristal grondig veranderd. Dit is toegelicht in het kader *Braggdiffractie en de fotonische bandkloof* [1].

Het gebruik van kristallen met een driedimensionale fotonische bandkloof (*bandgap*) is één van de ultieme manieren om licht te vangen. Zo is spontane emissie door lichtbronnen in een kristal met een fotonische bandkloof niet toegestaan [1]. Een bijzondere situatie ontstaat wanneer in een dergelijk kristal een kleine holte geïntroduceerd wordt. Door deze trilholtte is er lokaal geen fotonische bandkloof aanwezig en kan een lichtbron in de nabijheid van deze trilholtte zijn licht uitzenden. Echter, omdat de trilholtte volledig omringd is door het fotonische kristal, kan het licht niet uit de trilholtte ontsnappen en is er dus in gevangen. Door het fotonische kristal ultrasnel te 'schakelen' zodat de bandkloof iets verandert, kan op elk willekeurig gekozen moment het licht wel uitgezonden worden [2]. Dit kan belangrijk zijn voor toekomstige computers waarin informatie wordt doorgegeven door middel van kleine pulsen van

licht in plaats van door elektronen. Daarnaast kunnen trilholttes gebruikt worden als nauwkeurige sensoren voor een minuscule hoeveelheid materie of voor zeer efficiënte nanolasers. Om goede driedimensionale fotonische kristallen te produceren is het belangrijk in twee richtingen en loodrecht op elkaar matrices van gaatjes van lucht in het silicium te maken. De gaatjes vormen een driedimensionaal diamantrooster wat een kristal oplevert met een potentieel brede bandkloof. De gaatjes van lucht moeten diep zijn zodat het kristal een groot volume heeft, noodzakelijk voor een sterke interactie met licht. Daarnaast moeten de gaatjes cilindervormig zijn met gladde wanden. De diameters van de gewenste gaatjes van lucht zijn in de orde van de golflengte van licht, rond de 400 nanometer. Dit is meer dan honderd keer kleiner dan de diameter van een haar.

Nanofabricage

Ondanks dat de fabricage van ruimtelijk geordende structuren al jaren succesvol wordt onderzocht, staat de integratie hiervan in elektronische chips nog in de kinderschoenen. Wij zijn er in geslaagd matrices van gaatjes te maken door gebruik van technieken

Léon Woldering is promovendus bij de groep COPS aan de Universiteit Twente.



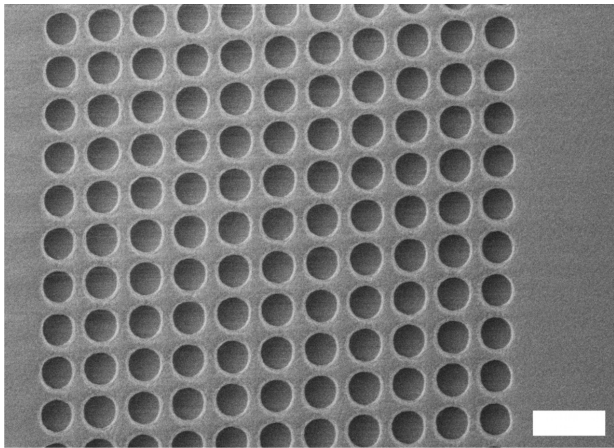
Willem Tjerkstra: Technisch wetenschappelijk onderzoeker bij de groep COPS aan de Universiteit Twente.

Irwan Setija is senior scientist bij ASML.

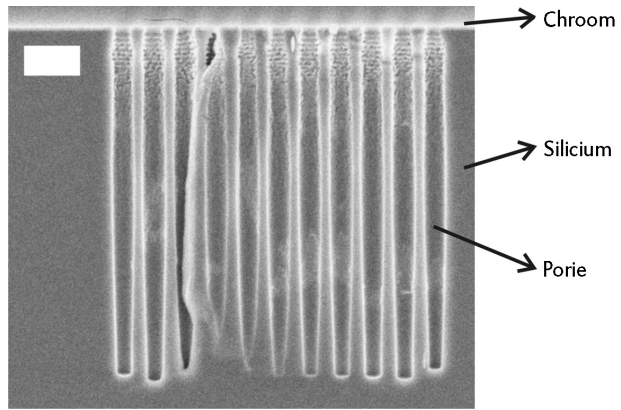


Willem Vos is groepsleider bij het FOM-instituut AMOLF en leerstoelhouder van de groep COPS aan de Universiteit Twente.

L.A.Woldering@tnw.utwente.nl



Figuur 1 Scannende-elektronenmicroscopfoto van een masker voor een matrix van gaatjes gemaakt door middel van uv-lithografie. De diameter van de openingen in het masker bedraagt 462 nanometer. De afstand tussen de openingen bedraagt 600 nanometer. Deze patronen kunnen op een groot oppervlak aangebracht worden. In dit geval strekt het patroon zich in de lengte uit over meer dan 15 millimeter, wat overeenkomt met ongeveer 25.000 rijen van openingen. De schaalbalk is gelijk aan 1 micrometer.



Figuur 2 Scannende-elektronenmicroscopfoto van een doorsnede van diep geëtste gaatjes. Deze gaatjes hebben een diameter van 402 nanometer en een aspectverhouding van 15,2. De gaatjes hebben gladde wanden, wat gunstig is voor fotonische kristallen. De onregelmatigheden in het derde en vierde gaatje van links zijn een gevolg van het breken van het geëtste monster. De schaalbalk is gelijk aan 1 micrometer.

die routinematig in de siliciumchip-industrie worden toegepast. De gaatjes zijn het resultaat van een etsproces [3]. Hierbij zijn de posities waar geëtst wordt gedefinieerd door ronde openingen in een masker. Dit masker is gemaakt van chroom en bedekt alleen die plaatsen waar niet geëtst moet worden. Figuur 1 laat één van de maskers zien die gebruikt zijn tijdens de experimenten. Dit masker is gemaakt met behulp van ASML's diep-ultraviolet (uv)-lithografie: een gigantische lens projecteert de structuren op een laagje fotoresist met behulp van uv-licht. Het bewerkte fotoresist dient als masker voor een bewerking waarmee de structuur wordt overgezet in de daaronder liggende chroomlaag. Met behulp van uv-lithografie is het mogelijk een patroon aan te brengen op grote oppervlakken, wat gunstig is om fotonische kristallen met een groot volume te maken of om kristallen te integreren met elektronische chips.

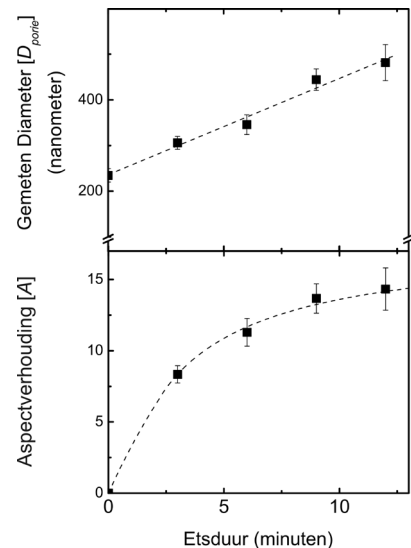
De volgende stap is het etsen van de gaatjes door middel van Boschreactief ion-etsen. Dit proces wordt veelvuldig gebruikt om structuren met groottes van meerdere micrometers in silicium te etsen. Het etsen vindt plaats door het monster in een plasma met daarin reactieve ionen en radicalen te plaatsen. De ionen worden versneld naar het siliciumoppervlak, dusdanig dat ze het silicium loodrecht raken. Deze combinatie van radicalen en ionen zorgt ervoor dat gaatjes geëtst worden op de posities van de openingen in het

masker en dat ze steeds dieper worden naarmate het etsen voortduurt.

Door het proces te optimaliseren is het gelukt om diepe gaatjes met de gewenste diameters te etsen, zie figuur 2. In de figuur is te zien dat het etsen gaatjes heeft opgeleverd met een diameter van ongeveer 400 nanometer. De diepte van deze gaatjes wordt weergegeven door de aspectverhouding: de verhouding tussen de diepte van de gaatjes en de diameter. Naarmate deze verhouding toeneemt wordt het kristal groter. In dit geval is de aspectverhouding meer dan 15. De gaatjes die gemaakt zijn in dit onderzoek hebben een aspectverhouding van meer dan 16, een wereldrecord voor nanogaatjes.

Tijdsduur van etsen

Het etsproces is nauwkeurig bestudeerd door te kijken wat er gebeurt als de tijdsduur van het etsen toeneemt. De aspectverhouding van de gaatjes blijkt eerst snel toe te nemen: de gaatjes worden dieper en dieper. Naarmate de aspectverhouding van de gaatjes hoger wordt zien we dat ze steeds minder snel in diepte toenemen, zie figuur 3 (onder). Het blijkt dat de etssnelheid afhangt van de aspectverhouding en voornamelijk beperkt wordt door de spreidingshoek van de ionen in het plasma. De ionen raken het siliciumoppervlak niet alleen precies loodrecht, maar ook onder kleine hoeken. Hierdoor neemt het aantal ionen dat de bodem van een gaatje



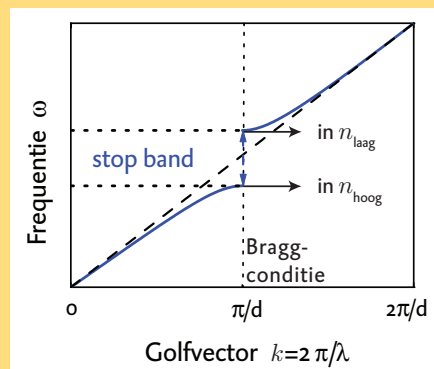
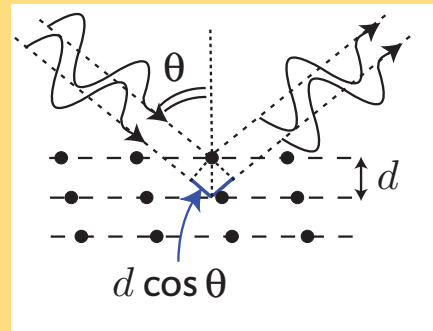
Figuur 3 Boven: gemeten diameter van geëtste gaatjes als functie van de etsduur. Door ongewenst zijwaarts etsen neemt de diameter van de gaatjes toe met de etsduur. Onder: aspectverhouding van de gaatjes als functie van de etsduur. Aanvankelijk worden de gaatjes snel dieper, maar naarmate de aspectverhouding toeneemt steeds minder snel. De beperkende factor blijkt de spreidingshoek van de ionen in het etsplasma te zijn. De gestippelde lijn is een fit van de theorie aan de gemeten waarden.

raakt af naarmate de aspectverhouding van het gaatje toeneemt. Verder blijkt dat door het etsen de diameter toeneemt, zie figuur 3 (boven). Deze ongewenste toename is nagenoeg lineair met de tijdsduur van het etsen. Bij te lang etsen zullen gaatjes die naast elkaar liggen gaan overlappen

Braggdiffractie en de fotonische bandkloof

De verstrooiers in een fotonisch kristal zijn geordend, zoals in de bovenste figuur is aangegeven met stippen. Omdat de verstrooiers onderlinge afstanden van de orde van de golflengte λ van licht hebben, treedt er interferentie op tussen de verstrooide golven. De verstrooiers kunnen worden opgedeeld in kristalvlakken, aangegeven met stippellijnen. Bij verstrooiing aan opeenvolgende vlakken, ondervindt licht voor ieder dieper gelegen vlak een faseverschuiving vanwege de extra afgelegde weglengte van $2d \cos \theta$, met d de afstand tussen de vlakken en θ de verstrooihoek. Als het weglengteverschil gelijk is aan een geheel aantal keren de golflengte ($2d \cos \theta = n\lambda$), dan treedt er constructieve interferentie op en treedt er een bundel uit het kristal die een hoek 2θ met de inkomende bundel maakt. De golflengte van Bragg-gereflecteerd licht verandert dus met de hoek van inval. Dit is Braggdiffractie zoals het al lang bekend is onder andere uit röntgendiffractie.

De inkomende en de Braggverstrooide golven vormen staande golven in het kristal. Ten gevolge van de roostersymmetrie zijn er twee verschillende staande golven mogelijk: met buiken voornamelijk in het materiaal met lage brekingsindex en aan de andere kant golven met buiken voornamelijk in het materiaal met hoge brekingsindex. Dit heeft consequenties voor de dispersierelatie tussen de hoekfrequentie ω en de golfvector $k = 2\pi/\lambda$. In homogene media met brekingsindex n is deze relatie $\omega/k = c/n$, met c de lichtsnelheid, zoals aangegeven in de onderste figuur. De staande golven in het hoge brekingsindexmateriaal hebben daarom bij gelijke golflengte (gegeven door de Braggdiffractie-voorwaarde) een lagere frequentie dan de staande golven in het lage brekingsindexmateriaal. Het blijkt dat golven met tussenliggende frequenties niet kunnen propageren. Deze verboden frequentieband heet de stopband voor propagatie in een bepaalde richting. De relatieve bandbreedte van de stopband is een maat voor de sterkte van de wisselwerking tussen licht en een fotonisch kristal. Voor röntgenstraling zijn de relatieve bandbreedtes van de orde 10^{-6} tot 10^{-4} . Voor licht in fotonische kristallen kunnen de stopbanden zo'n 10 à 20%



van de centrale frequentie in breedte zijn, als gevolg van de grote mogelijke brekingsindexvariëaties.

Hoewel de stopbanden voor voortplanting in verschillende richtingen een verschillende centrale frequentie hebben (die samenhangt met de wet van Bragg), kunnen de stopbanden gaan overlappen. Dit gebeurt bij toenemende wisselwerking, als de stopbanden breder en breder worden. Als er een frequentieband is waarvoor de stopbanden overlappen voor alle richtingen tegelijk in drie dimensies, dan is er sprake van de felbegeerde fotonische bandkloof.

waardoor de matrix van gaatjes onbruikbaar wordt.

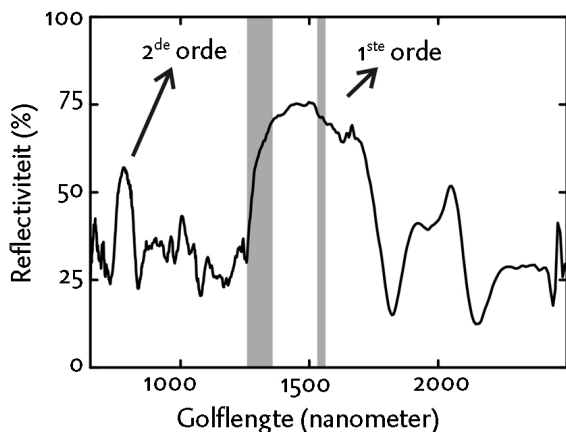
De theorie die de relatie beschrijft tussen etssnelheid en de aspectverhouding als gevolg van de spreidingshoek van de ionen is oorspronkelijk opgesteld voor grove structuren met afmetingen van één micrometer of meer. Nu is deze theorie aangepast om ook te gelden voor kleine nanostructuren. De belangrijkste verandering is dat het ongewenst toenemen van de diameter wordt beschreven. De gestippelde lijn in figuur 3 (onder) is een fit van de aangepaste theorie aan de gemeten waarden voor de aspectverhouding van de gaatjes. De theorie blijkt goed

te passen bij de gemeten waarden. Uit de theorie volgt ook een voorspelling voor de maximale aspectverhouding die gehaald kan worden met dit proces. Het blijkt dat vooral het minimaliseren van de ongewenste verbreding van de gaatjes essentieel is om nog dieper te kunnen etsen.

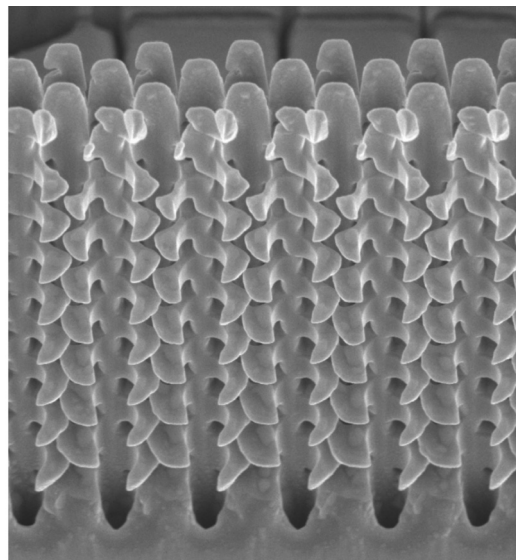
Optische metingen

De gemaakte matrices van gaatjes zijn tweedimensionale fotonische kristallen en daarom ideaal voor optische experimenten. Figuur 4 toont de gemeten reflectiviteit van één van de gemaakte structuren. Rond een golflengte van 1500 nanometer is een

sterke piek zichtbaar die overeenkomt met de verwachte eerste orde Braggreflectie. In deze piek wordt een tweedimensionale bandkloof verwacht. De tweede orde Braggpiek heeft ook een hoge reflectiviteit. De hoge reflectiviteit laat zien dat deze structuren zeer goed geordend zijn en een sterke interactie met licht hebben. Dit bevestigt dat de ontwikkelde fabricagemethode kwalitatief uitstekende fotonische kristallen oplevert. De piek rond 1500 nanometer overlapt de golflengtebanden waar telecommunicatie plaatsvindt. Dit schept dus mogelijkheden voor toepassing van de gemaakte structuren.



Figuur 4 Optische reflectiviteit van een matrix van geëtste gaatjes. Dit spectrum karakteriseert de interactie van het fotonische kristal met licht. De piek rond 1500 nanometer komt overeen met eerste-orde Braggreflectie. Deze piek overlapt de golflengtebereiken waar telecommunicatie plaatsvindt (grijze vlakken). Bij 800 nanometer zien we de tweede-orde piek. De hoogte van deze pieken (>75% en 50% respectievelijk) is karakteristiek voor een kristal van hoge kwaliteit en een sterke interactie met licht.



Figuur 5 Driedimensionaal fotonisch kristal van galliumfosfide. Dit kristal is gemaakt door met een gefocusseerde ionenbundel in twee richtingen gaatjes te maken. De twee richtingen staan loodrecht op elkaar en zijn aangegeven door de twee pijlen. De diameter van de gaatjes is ongeveer 460 nanometer. Dit kristal heeft een beperkt volume en enigszins conische in plaats van cilindrische gaatjes.

Perspectief

De fotonische kristallen zoals in figuur 2 zijn tweedimensionaal. Om licht volledig te kunnen temmen zijn driedimensionale structuren nodig zoals te zien in figuur 5. Deze structuur is het eerste prototype van een fotonisch kristal met het gewenste diamantrooster voor een brede bandkloof. Deze kleine structuur is gemaakt door met een gefocusseerde ionenbundel plaatselijk, in twee richtingen, materiaal te verwijderen [4]. In de toekomst zal geprobeerd worden driedimensionale bandkloofkristallen te maken door de ontwikkelde etsstechniek in een tweede richting nogmaals toe te passen, loodrecht op de gaatjes in de al gemaakte

kristallen. De diepe gaatjes die we gemaakt hebben zijn hiervoor een goed uitgangspunt. De grootste uitdaging is het zeer nauwkeurig op elkaar uitlijnen van de beide matrices van gaatjes, wat mogelijk is met de zeer geavanceerde machines van ASML. Omdat de daarna geëtste gaatjes ook diep worden, resulteert dit in een driedimensionaal fotonisch kristal met een groot volume en een verwachte zeer brede bandkloof.

De auteurs danken Merel Leistikow voor haar hulp met de tekst, Frans Segerink en Henri Jansen voor hulp bij fabricage, Ruud Balkenende, John Kelly en Fred Roozeboom voor inspirerende discussies.

Referenties:

- 1 Femius Koenderink, Lydia Bechger en Willem Vos, *Fotonische kristallen: oases van stilte in het ruisend vacuüm*, NTVN **68**, p. 188-192 (2002).
- 2 Tijmen Euser en Willem Vos, *Ultrasnelle kleurverandering van een nano-spiegelpaleis*, NTVN **74**, p. 4-6 (2008).
- 3 L.A. Woldering, R.W. Tjerkstra, H.V. Jansen, I.D. Setija en W.L. Vos, *Periodic arrays of deep nanopores made in silicon with reactive ion etching and deep UV lithography*, *Nanotechnology* **19**, 145304 (2008).
- 4 R.W. Tjerkstra, F.B. Segerink, J.J. Kelly en W.L. Vos, *Fabrication of three-dimensional nanostructures by focused ion beam milling*, *J. Vac. Sci. Technol. B* **26** (3), 973-977 (2008).

Meer informatie over fotonische kristallen: www.photonicbandgaps.com
www.amolf.nl