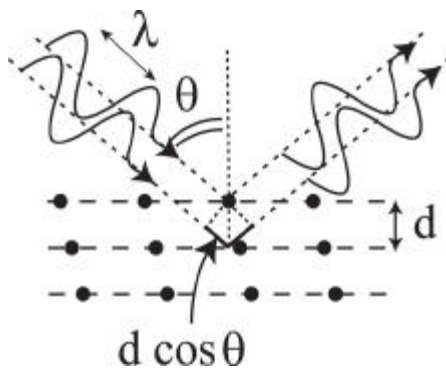


Fotonische kristallen: houdgreep op maat voor lichtbronnen

FEMIUS KOENDERINK

Fotonische kristallen zijn materialen die bijzondere verschijnselen vertonen wanneer men er met licht van buitenaf naar kijkt. In feite zijn fotonische kristallen zelfs ontworpen om nog onalledaagsere verschijnselen te veroorzaken wanneer de lichtbron binnen in het kristal wordt geplaatst.

Een fotonisch kristal is een in alle drie dimensies regelmatig opgebouwd samenstelsel van dielectrische materialen, waarbij de afstand tussen bouwstenen ongeveer zo groot is als de golflengte van licht. Een voorbeeld uit de natuur is opaal: een dichte stapeling van kleine glasbolletjes die alle dezelfde straal hebben (ca. 200 nm). Hoewel dit erg klein lijkt, is de afstand tussen de bouwstenen



Figuur 1: Constructieve interferentie veroorzaakt sterke reflectie ('Bragg reflectie') wanneer het weglengte verschil $2d \cos \theta$ tussen reflecties aan opeenvolgende kristalvlakken gelijk is aan de golflengte λ .

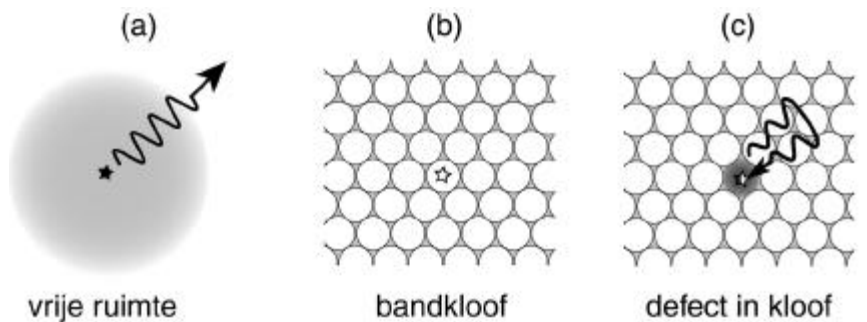
zo'n 1000 maal groter dan die tussen atomen in een normaal kristal, zoals bijvoorbeeld keukenzout.

Zo op het oog vertonen fotonische kristallen een zelfde kleurspel als bijvoorbeeld parelmoer, pauwenveren of de onderkant van een compact-disc: onder bepaalde belichtingen

zijn fel gekleurde weerkaatsingen te zien die bij kleine verandering van belichting van kleur wisselen.

Deze kleuren zijn het gevolg van interferentie. Wanneer de golflengte precies past op de afstand tussen kristalvlakken, versterken golven die verstrooid zijn aan opeenvolgende vlakken elkaar. Zo'n reflectie aan een gelaagde structuur heet 'Bragg reflectie' (zie figuur 1). Omdat een fotonisch kristal langs verscheidene richtingen dezelfde regelmaat ('roosterafstand') heeft, reflecteert het ook langs meerdere richtingen dezelfde kleuren. Door de materialen goed te kiezen en te rangschikken kan theoretisch zelfs een kristal gemaakt worden met een 'fotonische bandkloof'. Zo'n kristal weerkaatst een bepaalde kleur licht en houdt deze kleur buiten, ongeacht de richting waarin het licht invalt. Een bandkloof-kristal is dus een drie-dimensionale reflector, ook wel 'omnidirectionele spiegel' genoemd.

Op zichzelf is een object dat een bepaalde kleur ongeacht de invalrichting weerkaatst niet zo inter-



Figuur 2: (a) Een atoom of molecuul in de vrije ruimte kan in alle richtingen stralen. (b) Als de uitstralingsgolflengte in een bandkloof valt straalt het atoom helemaal niet, en moet aangeslagen blijven. (c) Bij een defect (missende bol) in een bandkloofmateriaal kan het atoom steeds weer een foton uitwisselen met het defect dat als trilholtte werkt; het foton kan niet weg.

essant. Een metalen doos is bijvoorbeeld ook een omnidirectionele spiegel. Er is echter een belangrijk verschil tussen een metalen doos en een kristal met een bandkloof. Binnen in een metalen doos kan wel degelijk licht zijn; als men er een lichtbron in plaatst, straalt deze gewoon. Dat het licht van binnen aan de buitenkant niet zichtbaar is (en licht van buiten binnenin ook niet) heeft alleen te maken met het feit dat licht niet door het oppervlak van de doos heen kan. Een fotonisch kristal met een bandkloof sluit daarentegen alle kleuren die het omnidirectioneel reflecteert echt uit. Licht van die kleuren kan in zo'n kristal dus niet bestaan; men kan de lichtbron wel proberen aan te zetten, maar hij zal geen licht uitzenden! Het verrassende van deze situatie wordt duidelijk wanneer men denkt aan een atoom of molecuul als lichtbron.

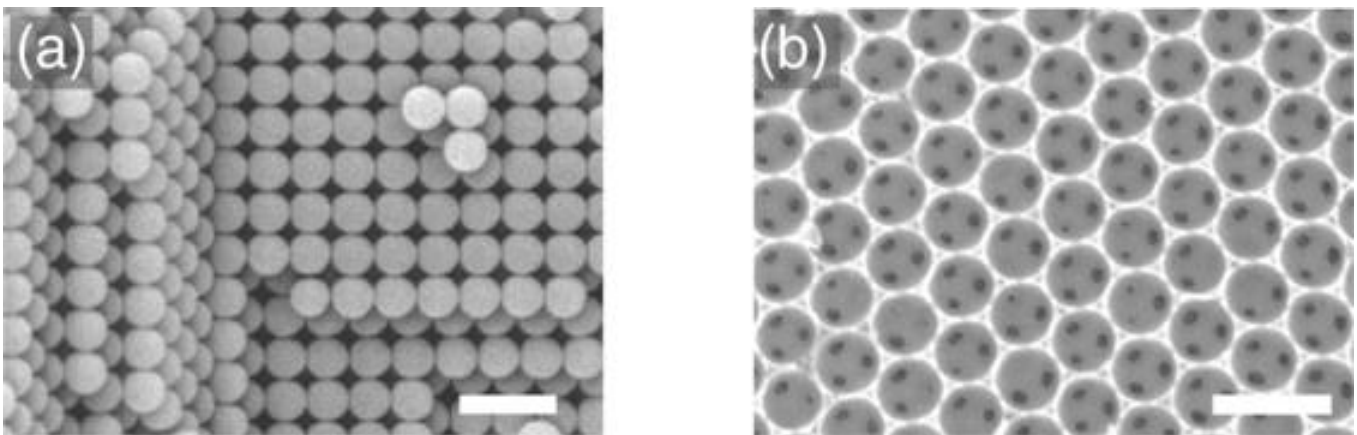
Quantummechanica voorspelt het spectrum dat een atoom uitzendt wanneer het terugvalt van een aangeslagen toestand naar de grondtoestand heel precies: dit hangt alleen af van de massa van de kern, en het aantal elektronen van het atoom. Denk bijvoorbeeld aan het karakteristieke oranje licht van natriumatomen in de lampen langs de snelweg. Het uitzenden van het licht (emissie) gebeurt spontaan en in een willekeurige richting, en het moment van uitzenden berust op toeval. De kleur en de gemiddelde tijd tussen aanslaan en spontane emissie zijn karakteristieken van het atoom. Toch kan de

levensduur beïnvloed worden. We stellen ons bijvoorbeeld voor dat het aangeslagen atoom in een kristal wordt geplaatst dat een bandkloof heeft die precies past bij de overgangsenergie van het atoom. Omdat het kristal het uit te zenden foton helemaal niet toelaat kan het atoom niet stralen en zal het oneindig lang aangeslagen blijven (zie figuur 2). De levensduur van het atoom kan dus beïnvloed worden door zijn optische omgeving aan te passen. Het blijkt dat niet alleen vertraging van stralend verval, maar ook versnelling mogelijk is. Kleine veranderingen in levensduur (meest versnellingen) zijn inderdaad waargenomen voor atomen tussen twee dicht op elkaar staande spiegels. Fotonische bandkloof materialen bieden een unieke mogelijkheid om spontane emissie te vertragen of echt te verbieden. Nog vreemder wordt het als het atoom ingebouwd wordt bij een kleine verstoring in het regelmatige rooster van een fotonisch kristal met bandkloof. Er is voorspeld dat zo'n roosterfout er voor kan zorgen dat er in plaats van geen, precies één toestand voor het uit te zenden foton is. Omdat het defect van alle kanten omgeven is door perfect reflecterend kristal fungeert het als een kooi voor licht: welke kant het foton ook op wil, het wordt altijd Bragg-gereflecteerd terug naar het defect. Het licht wordt zo opgesloten in een trilholtte ter grootte van zijn eigen golflengte in alle drie dimensies.

Helaas is het is erg moeilijk om een fotonische bandkloof te maken. Ten eerste is een uitdaging dat de regelmaat van de structuur zo klein moet zijn dat alledaagse mechanische werktuigen om een structuur in elkaar te zetten geen uitkomst bieden. Het tweede, voornaamste, probleem is dat het materiaal moet bestaan uit een samenstelsel van componenten waartussen een zo groot mogelijk verschil in brekingsindex bestaat. Veel materialen in de natuur hebben een brekingsindex van ongeveer 1.5. Zelfs als lucht (met de laagst mogelijke brekingsindex van 1.0) als één component voor het kristal gekozen wordt, moet de andere component een index van tenminste 2 à 3 hebben. Er is slechts een handvol materialen die in aanmerking komen, en dit zijn alle halfgeleiders. Onze groep heeft al succes geboekt door kunstmatige opalen als mal te gebruiken om luchtballen in een skelet van titaanwit te maken (figuur 3). In de MESA+ cleanroom hopen we binnenkort bandkloofkristallen te maken in, bijvoorbeeld, silicium (index 3.5).

Nog niemand heeft een bandkloof aangetoond. Toch is het goed na te gaan wat praktisch haalbare

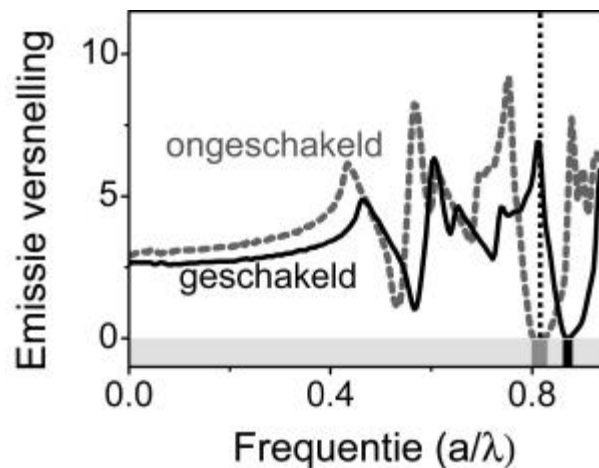
toepassingen zijn als we spontane emissie daadwerkelijk geheel kunnen stoppen of juist versnellen met een fotonische bandkloof. Het ligt voor de hand dat de potentiële mogelijkheden van de bandkloof veel groter zijn, als de bandkloof in de tijd gecontroleerd veranderd kan worden. De bandkloof van een kristal kan geschakeld worden door bijvoorbeeld de brekingsindex van één van de componenten te wijzigen. Voor de halfgeleidermaterialen die voldoende hoge brekingsindex hebben om een fotonische bandkloof te realiseren, blijkt dat de brekingsindex tijdelijk en ultrasnel verminderd kan worden door met een lichtpuls elektronen en gaten in de halfgeleider aan te slaan. Deze vrije ladingsdragers verlagen de brekingsindex. Met praktisch beschikbare korte en intense laserpulsen kan de brekingsindex voldoende veranderd worden om de bandkloof sterk van kleur te laten verschuiven. Men zou daarmee bijvoorbeeld een aangeslagen natrium atoom in een kristal met een bandkloof voor het oranje licht passend bij natrium, opeens met de schakelpuls tot spontane emissie kunnen laten overgaan. Hierbij zorgt de schakelpuls ervoor dat de bandkloof ineens niet meer oranje licht ver-



Figuur 3: Elektronen-microscopie-beelden van een fotonisch kristal van (a) polystyreenbolletjes in lucht (synthetisch opaal) en (b) luchtballen in titaanwit. Het drie-dimensionale karakter van de stapeling is duidelijk zichtbaar in (a). Schaalbalken zijn in beide figuren 2µm.

biedt, maar blauwere kleuren (zie figuur 4). Zo kun je dus een foton op afroep krijgen. Essentieel is dat de kleur van de schakelpuls niet gelijk hoeft te zijn aan die van de emissiebron. Anders zou de schakelpuls het kristal immers niet eens binnen kunnen, omdat de bandkloof voor totale reflectie zou zorgen! Met deze methode kun je op femtoseconde tijdschaal spontane emissie opeens 'aan' of 'uit' zetten, licht gedurende een controleerbare

tijd opslaan in trilholttes, of nano-lasers ultrasnel schakelen. Wil je mee doen met het bouwen van zulke experimenten? Informeer bij COPS naar de afstudeermogelijkheden!



Figuur 4: Versnelling van spontane emissie ten opzichte van vacuum in een fotonisch bandkloof kristal als functie van genormeerde optische frequentie (verhouding van roosterafstand a tot de golflengte λ). Voor frequenties in de bandkloof (grijze/zwarte blokken op de x-as bij $a/\lambda \sim 0.8$) is emissie totaal stop gezet. Een lichtbron met overgangsenergie bij $a/\lambda = 0.82$ zou voor het schakelen niet kunnen uitzenden, en na de optische schakelpuls opeens zo'n zes keer sneller vervallen dan in vacuum.