

Fotonische kristallen zijn leger dan vacuüm

Meestal wordt bij quantummechanica gedacht aan processen die op heel kleine schaal spelen maar in de dagelijkse praktijk verwaarloosbaar zijn. Maar eigenlijk komen we deze intuïtief bizarre theorie ongemerkt in de alledaagse praktijk tegen. Bijvoorbeeld in de vorm van licht. Het uitzenden van licht kan alleen worden begrepen met behulp van quantummechanica waarin het vacuüm vol zit met elektromagnetische fluctuaties. Na vier jaar in het donker metingen verrichten is de conclusie: in speciale fotonische kristallen is het zelfs leger dan in vacuüm. Merel Leistikow

Spontane emissie

Een lichtdeeltje of foton kan ontstaan als een lichtbron, bijvoorbeeld een molecuul of atoom, van een hoge energietoestand vervalt naar een lagere toestand. Er zijn verschillende manieren waarop dit kan gebeuren. Het meest voorkomende proces waarbij licht ontstaat, is spontane emissie. Dit heet vooral spontaan omdat bij de eerste beschrijvingen niet goed werd begrepen waarom de lichtbron vervalt. Met de ontdekking van de quantummechanica werd dit antwoord gegeven: het vacuüm ruist. Gemiddeld is het elektromagnetische veld gelijk aan nul maar de waarde fluctueert hieromheen in de tijd. En het zijn precies

deze velden die zorgen dat een lichtbron van hoge naar lagere energie verval. Voor een enkel emissiefoton is van tevoren niet te voorspellen hoe lang het zal duren na excitatie voordat het licht wordt uitgezonden. Maar er is wel iets te zeggen over het gemiddelde. Dat kan worden gemeten in experimenten. Door het emissieproces heel vaak te herhalen wordt een histogram opgebouwd. De gemiddelde tijd en de specifieke vorm van het emissie-histogram zijn kenmerkend voor een bepaald verval.

Beïnvloeden van elektromagnetische fluctuaties

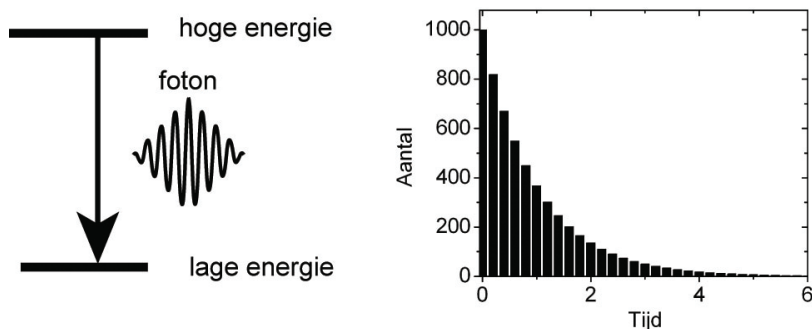
Dit kenmerkende verval is niet al-

leen afhankelijk van welke lichtbron er wordt gebruikt. De fluctuaties van het elektromagnetische veld zijn te beïnvloeden. Het is namelijk mogelijk interferentie te veroorzaken zodat het aantal fluctuaties toeneemt of juist afneemt voor bepaalde frequenties. Een klassieke manier om dit te beschrijven heet de lokale toestandsdichtheid. Dit is een maat voor hoeveel toestanden er aanwezig zijn op de plaats van de lichtbron. Een voorbeeld van deze situatie is de lokale toestandsdichtheid vlak bij een spiegel. Op sommige plekken ontstaat een hogere toestandsdichtheid omdat hier het licht constructief kan interfereren terwijl op andere plekken juist minder toestanden aanwezig zijn door destructieve interferentie. Iedere structuur die ervoor zorgt dat licht wordt teruggeslagen, verandert de lokale toestandsdichtheid. Meestal is dit effect klein en alleen aanwezig heel dicht bij de structuur, tot op een paar golflengtes afstand. Maar ook extreme veranderingen zijn mogelijk.

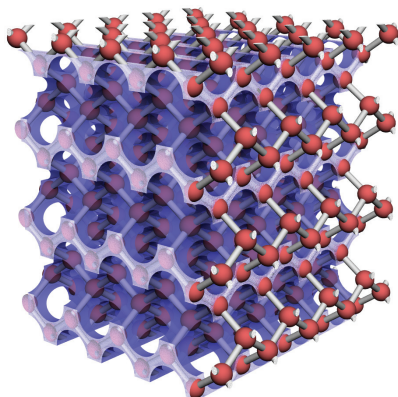
Fotonische kristallen

Een extreme manier om de lokale toestandsdichtheid te beheersen is in een fotonisch kristal. In kristallen zitten de bestanddelen verdeeld in een goed

116



Figuur 1 Links een schematische weergave van spontane emissie van licht. Om van een hoge naar een lage energietoestand te komen wordt licht uitgezonden. Rechts een voorbeeld van een vervalhistogram.



Figuur 2 In het plaatje is het diamantrooster te zien. De rode bolletjes vormen een diamantstructuur met een brede bandkloof. De overlappende lichtblauwe structuur toont hoe deze diamantstructuur te benaderen is met poriën. Illustratie: Léon Woldering.



Figuur 3 Een morpho, gefotografeerd in het National Museum of Natural History in Washington, DC.

geordend periodiek rooster. Een deel van de eigenschappen van het kristal wordt bepaald door hoe de elektronen gebonden zitten in dit rooster. In metalen kunnen de elektronen vrij bewegen, in isolatoren juist niet. Een bijzondere klasse materialen is de halfgeleider. Hierin mogen elektronen niet bestaan in een bepaalde energieband. De huidige transistoren in computers maken dankbaar gebruik van deze eigenschap.

In de jaren tachtig ontstond het inzicht dat wat bestaat in halfgeleiders voor elektronen ook bij lichtfrequenties mogelijk moet zijn. Dit komt voor in extreem periodieke structuren zoals atoomroosters, maar dan met periodiciteiten van de orde grootte van licht. Dit is voor te stellen door lagen met verschillende brekingsindex te stapelen waarbij de dikte precies 'past' op de halve golflengte van het licht. Er ontstaat een heel goede spiegel voor licht, een zogenaamde Braggspiegel, omdat de doorgaande richting voor deze golflengte precies destructief interfereert terwijl de teruggaande richting constructief is. Voor een effect in drie dimensies moet de brekingsindex zodanig worden gemoduleerd dat in alle richtingen destructieve interferentie voor een specifiek golflengtebereik optreedt. Hierbij ontstaat een zogenaamde fotonische bandkloof of bandgap in het Engels.

Echte fotonische kristallen

Fotonische kristallen komen in de natuur voor. Periodieke structuren zijn bijvoorbeeld verantwoordelijk voor

de opvallend blauwe kleur van morpho's, een soort vlinders. Echter, de interferentie-effecten in natuurlijke structuren zijn over het algemeen niet sterk genoeg om volledig leeg te zijn voor bepaalde frequenties.

Na het inzicht in de jaren tachtig zijn wereldwijd verschillende groepen aan de slag gegaan met het fabriceren van fotonische kristallen. Hiervoor moet een periodieke structuur worden gemaakt waarbij de periodiciteit van de orde grootte is van de golflengte van het licht. Voor groen licht is dit bijvoorbeeld rond de 530 nanometer. Oftewel: je hebt nanotechnologie nodig om dit soort kristallen te maken. Er bestaan verschillende processen om materialen op nanoschaal te ordenen tot een fotonisch kristal. Om sterke interferentie-effecten te veroorzaken moet de structuur periodiek zijn over een redelijk aantal periodes en moet het gebruikte materiaal voldoende verschil in brekingsindex hebben opdat reflecties op de grensvlakken sterk genoeg zijn. In Twente is bij het MESA+ Instituut voor Nanotechnologie samen met ASML, TNO en Philips een methode ontwikkeld om deze structuren te fabriceren in silicium.

Fabricage en karakterisatie van 3D-structuren

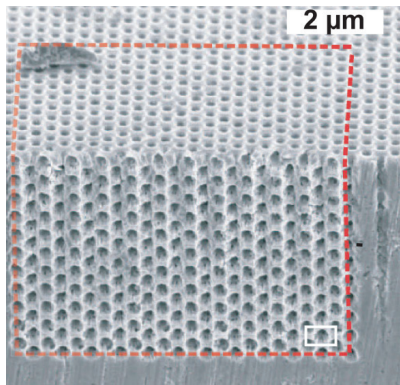
De methode, ontwikkeld in de groep Complex Photonic Systems door Willem Vos, Léon Woldering, Willem Tjerkstra en Hannie van den Broek, bestaat uit het etsen van lange cilindervormige poriën in een plak silicium. Hierdoor ontstaat een tweedi-

mensionaal fotonisch kristal. In het vlak van de silicium wafer varieert de brekingsindex, maar in de hoogterichting nog niet. Door nu heel nauwkeurig de plak 90 graden te draaien en daarop nog een set poriën te etsen, ontstaat een driedimensionale structuur. Hiervoor is te berekenen dat deze structuren inderdaad een volledige bandkloof hebben voor licht van ongeveer 1500 nanometer in het infrarode gebied. Maar hoe bepaal je of er inderdaad geen toestanden aanwezig zijn in de bandkloof?

Emissie-experimenten

Het effect van de bandkloof is te meten door de spontane emissie in kaart te brengen met quantum dots. Quantum dots zijn kunstmatig gemaakte deeltjes, in ons geval van loodsulfide, van enkele nanometer groot, die zich gedragen als atomen. Na excitatie met een pomplaser kunnen deze deeltjes licht uitzenden. Omdat de deeltjes zo klein zijn, passen ze door de poriën van de fotonische structuur en kunnen ze doordringen tot diep in het kristal. Omdat bij de spontane emissie van de quantum dots de fluctuaties in de omgeving ervoor zorgen dat het foton wordt uitgezonden, heb je een directe maat voor het aantal fluctuaties in het fotonisch kristal.

Experimenteel betekent dit dat de quantum dots worden geëxciteerd met een heel korte laserpuls, veel korter dan de typische gemiddelde vervaltijd. Vervolgens wordt heel vaak gemeten hoeveel tijd er zit tussen de excitatie en de gemeten detectie van

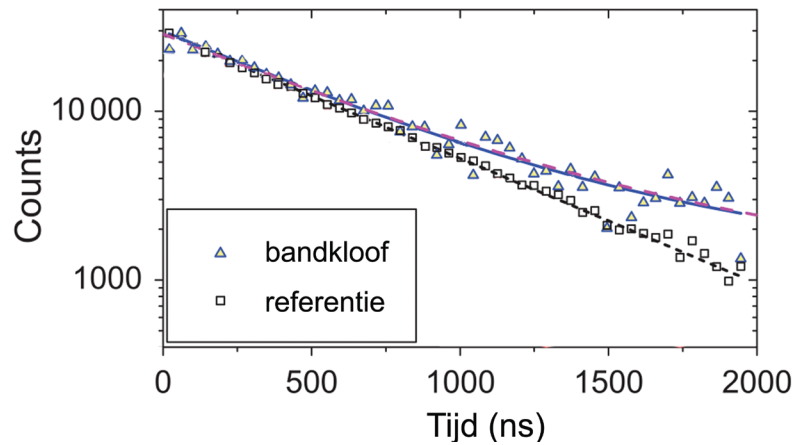


Figuur 4 Een opname gemaakt van het 3D fotonische kristal met een elektronenmicroscop. De lijnen geven aan waar het 3D-gebied zit. Het bovenste deel van het plaatje laat de bovenkant van de poriën zien in de ene richting. De andere porierichting staat daar loodrecht op.

het uitgezonden foton op een snelle detector. Op deze manier wordt een histogram opgebouwd van het vervalproces. De vorm en gemiddelde tijd geven een maat voor de vervalsnelheid van het deeltje.

Het verval wordt tien keer trager

Deze verval experimenten zijn uitgevoerd op een aantal verschillende kristallen en bij verschillende golflengtes van het licht. Afhankelijk van de precieze structuur van het fotonisch kristal wordt ander gedrag verwacht. In figuur 5 zijn twee verschillende vervalcurves weergegeven. In een homogene omgeving, het oplosmiddel waarin de quantum dots zweven, meten we een exponentieel verval, aangegeven door de vierkantjes. Dit is hier getekend op een logaritmische schaal, zodat het een rechte lijn wordt. Heel bijzonder is de curve daarboven, aangegeven met de driehoekjes. Hierin is een ver-



Figuur 5 Een vervalcurve van quantum dots in de bandkloof van een fotonisch kristal (de driehoekjes) samen met het verval in een homogene omgeving (de vierkantjes).

val te zien van quantum dots die in een bandkloof vervallen. Het is duidelijk te zien dat ten eerste de lijn erg afwijkt van een rechte lijn voor langere tijd en ten tweede dat de gemiddelde tijd veel langer is dan in het homogene geval. Doordat de fluctuaties van het elektromagnetische veld veel lager zijn binnen in het kristal valt de quantum dot gemiddeld tien keer trager!

De invloed van de buitenwereld

Een factor tien is natuurlijk mooi, maar waarom eigenlijk niet nog veel langzamer? In een berekening van de bandkloof van een fotonisch kristal wordt altijd aangenomen dat zo'n kristal oneindig groot is, om de rekentijd binnen het toelaatbare te houden. Dit is natuurlijk een onrealistische situatie; er zullen altijd randen zijn aan het fotonisch kristal. En gelukkig maar, want als er totaal geen licht wordt uitgezonden, zou ik niet graag wachten op uitgezonden fotonen op de detector. Een luxe probleem, maar wel een probleem. Via de randen van het fotonisch kristal zullen omgevingsinvloeden altijd het kristal binnendringen.

Uit de theorie blijkt dat dit soort effecten typisch exponentieel afnemen met de afstand tot de rand van het kristal. Uit een schatting blijkt dat voor de Twentse kristallen een factor honderd onderdrukking van fluctuaties plaatsvindt precies in het centrum. Maar tijdens een experiment wordt een breder gebied bekeken dan alleen het centrum van het kristal. Daarnaast is de meettijd gelimiteerd. Eigenlijk had de meettijd veel langer moeten zijn, maar dat is met de huidige opstelling niet mogelijk omdat de achtergrondruis aanzienlijk is. De

getrokken lijn is een berekening van de verwachte vervalcurve voor quantum dots die verspreid zitten door het hele kristal. Als de tijdschaal vergroot zou worden, gaat de gevonden gemiddelde tijd van de berekende curve nog aanzienlijk omlaag.

Mogelijke toepassingen

De jacht op de verlaging van het aantal toestanden in fotonische kristallen is sinds de jaren tachtig in eerste instantie ingegeven door fundamentele interesse. Maar toch zijn er voldoende redenen te bedenken waarom het beheersen van het aantal toestanden ook van nut kan zijn. In bijvoorbeeld een laser zorgt spontane emissie voor verlies. Een factor tien minder verlies kan nooit kwaad. Maar de ultieme uitdaging is het maken van een quantumcomputer, waarbij gebruik kan worden gemaakt van superpositie uit de quantummechanica. Vereiste hiervoor is goede afscherming van omgevingsinvloeden. En laat het nou net binnen in een fotonisch kristal leger zijn dan in vacuüm!

Merel Leistikow studeerde technische natuurkunde aan de Universiteit Twente. Hierna promoveerde ze in de groep Photonic Band Gaps onder leiding van Willem Vos bij het FOM-instituut AMOLF en de Universiteit Twente. Het werk over spontane emissie uit fotonische kristallen is gepubliceerd in *Physical Review Letters* met een vermelding op de voorpagina.



merelleistikow@gmail.com