

Licht uit nul-dimensionale objecten

Citation for published version (APA):

Kemerink, M. (2001). Licht uit nul-dimensionale objecten. In H. Veenhof (Ed.), *KNAW Jaarboek 2000 "Over de grenzen van het weten"* (pp. 35-39). Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (KNAW).

Document status and date:

Published: 01/01/2001

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of Record (includes final page, issue and volume numbers)

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Licht uit nul-dimensionale objecten

Kleiner en kleiner

Een belangrijk deel van de moderne natuurkunde houdt zich de laatste jaren bezig met het bestuderen van de fysische eigenschappen van zeer kleine structuren. Zeer klein wil hier zeggen dat de eigenschappen bepaald worden door de afmetingen van de structuur. Zo blijkt bijvoorbeeld dat de kleur van een op halfgeleiders gebaseerde laser, zoals die bijvoorbeeld in een cd-speler zit, verandert zodra de actieve laag voldoende dun gemaakt wordt.

De lengteschalen waarop dit gebeurt zijn typisch kleiner dan 100 nm (nanometer, een nm is een miljoenste millimeter). Met behulp van moderne technologie is het mogelijk om structuren te maken die in één, twee of zelfs drie richtingen 'zeer klein' zijn. In jargon worden zulke structuren ook wel twee-, een- en nul-dimensionaal genoemd, zie kader 'Dimensionaliteit'.

Het zijn met name de nul-dimensionale structuren (ook wel *quantum dots* genoemd) die de laatste jaren zeer in de belangstelling staan vanwege hun fysisch zeer interessante eigenschappen. Deze eigenschappen lijken daarbij ook nog eens uitermate toepasbaar te zijn voor, onder andere, verbetering van de eerder genoemde halfgeleider lasers.

Een rechtstreeks gevolg van de 'nanoscopische' afmetingen van deze nul-dimensionale structuren, of quantum dots, is dat het uitermate lastig is om een individuele 'dot' te bestuderen. Een quantum dot is veel te klein om met een gewone, optische microscoop te kunnen bestuderen, en elektrisch contact maken aan een voorwerp van 20 x 20 x 20 nm is verre van triviaal.

Een zeer geschikte methode om individuele dots af te beelden en elektrisch te bestuderen is Scanning-Tunneling Microscopie (STM, zie kader 'STM en STL'). Alhoewel STM in principe een techniek is die elektrische eigenschappen meet, is het ook mogelijk om licht te genereren met een STM: STM-veroorzaakte luminescentie of kortweg STL.

Hoewel het principe van STL relatief eenvoudig is, blijken er bij toepassing een aantal flinke adders onder het gras te zitten. Zo is STM/STL in principe een oppervlakte gevoelige techniek. Omgekeerd wil dat zeggen dat het uitermate lastig is om te achterhalen wat er onder de oppervlakte met de geïnjecteerde elektronen gebeurt. Om deze reden is het gebruik van STL in het verleden altijd beperkt gebleven tot samples waarbij de te bestuderen structuren direct aan het oppervlak liggen. Veel van de bovengenoemde nul-dimensionale structuren bevinden zich echter 'van nature' juist binnen in het preparaat.

Het onderzoek dat in het kader van mijn KNAW fellowship is verricht, heeft zich in eerste instantie gericht op het bouwen van een geschikte STL opstelling, die hieronder kort besproken zal worden. Bij een van de eerste metingen die hiermee gedaan zijn, vonden we zeer sterke aanwijzingen voor lichtopwekking in een zeer speciaal soort quantum dot, namelijk een zogenaamde tip-veroorzaakte quantum dot. Over dit volledig onverwachte maar zeer interessante verschijnsel gaat het laatste deel van dit verhaal. Volledigheidshalve zij hier nog vermeld dat het eveneens gelukt is om STL te doen aan structuren die dieper in de halfgeleider liggen, en dit modelmatig te beschrijven.

Een eierleggende wolmelkzeug...

Het aantal eisen waaraan het door ons beoogde STL apparaat moest voldoen is nogal fors. Centraal staat een goed werkende STM, die echter niet alleen gebruikt moet kunnen worden bij kamertemperatuur, maar ook bij extreem lage temperaturen ($-270\text{ }^{\circ}\text{C}$). Voorts moet hij ook geschikt zijn voor gebruik in extreem hoge magneetvelden (tot 11 T. Ter vergelijking, een magneet in een fietsdynamo is nog geen 0.1 T) en moet er een mogelijkheid zijn om het licht dat door het sample uitgestraald wordt op te vangen en naar de waarnemer te geleiden. De waarnemer zit logischerwijs niet in 11 T bij $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$, maar gewoon in het lab. De waarnemer analyseert het licht weliswaar niet direct, maar via een speciale, uiterst gevoelige detector. Ook deze detector is veel te groot om rechtstreeks in de STL opstelling te integreren.

Vooraf de eis van een hoog magneetveld is nogal complicerend, doordat de ruimte in de daarvoor benodigde spoel erg beperkt is. Om in deze spoel te passen moet de hele STM in een buis met een diameter van 38 mm passen. Daarom is er niet gekozen voor de gebruikelijke lichtopvang met behulp van lenzen en spiegels, maar voor een systeem waarbij twee glasfibers op circa een millimeter van tip en sample gebracht worden. Door de kleine afstand tussen fiberuiteinde en sample kan een vergelijkbare hoeveelheid licht gedetecteerd worden als met een conventioneel lenzensysteem.

Uiteindelijk is in samenwerking met de groep van professor Van Kempen aan de universiteit van Nijmegen een systeem gebouwd dat aan al deze eisen voldoet. Het Duits heeft voor een dergelijk (bijna) alles kunnend apparaat de prachtige benaming 'eierliegende Wollmilchsau', een eierleggende wolmelkzeug.

...maakt een quantum dot

'Fortune favors the prepared mind', zegt een bekend Engels citaat. Dit bleek tijdens een van de eerste meetsessies met de nieuwe STL opstelling, waarin wij zeer onverwachte STL spectra maten (een spectrum is een grafiek waarin de gemeten lichtintensiteit is uitgezet als functie van de golflengte ('kleur') waarop gedetecteerd is, zie de figuur op de volgende pagina). Het grote aantal pieken dat we in het spectrum zien is karakteristiek voor een nul-dimensionale structuur met een geschatte afmeting van zo'n 25 tot 50 nm. De verrassing zit hem in het feit dat er helemaal geen nul-dimensionale objecten in het sample aanwezig zijn! Het bevatte uitsluitend tweedimensionale halfgeleider structuren.

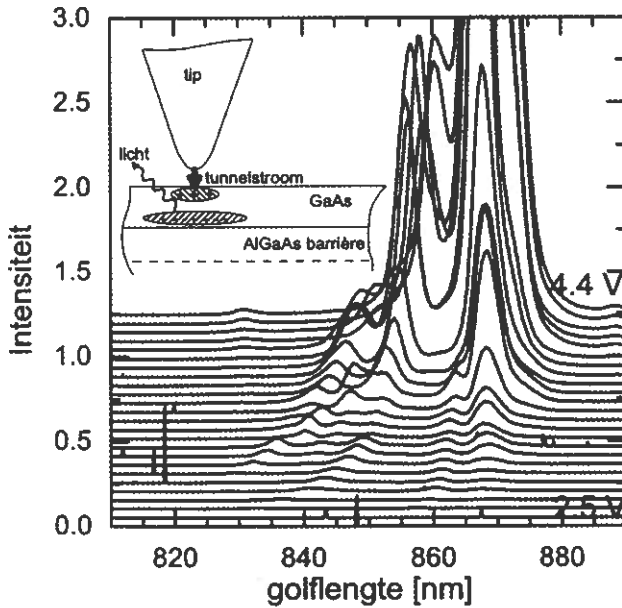


Fig. 1. Lichtintensiteit van de tip-veroorzaakte quantum dot als functie van de detectiegolflengte. De tip-sample spanning neemt toe van 2.5 (onderste curve) tot 4.4 V (bovenste curve). De inset geeft schematisch het in de tekst beschreven proces weer waarbij licht wordt gegenereerd in een tip-veroorzaakte quantum dot.

Zoals uitgelegd in het kader 'STM en STL' wordt bij deze technieken een geleidende tip op extreem kleine afstand van een oppervlak gebracht. De elektrische spanning tussen tip en het oppervlak zorgt er daarbij voor dat elektronen (negatief) van de tip af, dus naar het sample bewegen. Daardoor is het gebiedje vlak onder de tip juist zeer attractief (aantrekkend) voor de positieve lading (de gaten) in het sample. Er ontstaat dus een plasje gaten aan het oppervlak onder de tip, dat ongeveer de afmetingen heeft van de punt van de tip. Voor de door ons gebruikte tips is dat zo'n 25 tot 50 nanometer, klein genoeg om opsluiting in drie richtingen te laten optreden. We hebben dus een nul-dimensionaal object, namelijk een 'tip-veroorzaakte quantum dot' gemaakt!

Nu was het in de literatuur al bekend dat dit mogelijk is, maar nog nooit was er licht van een dergelijk object waargenomen. De reden hiervoor is simpel: Het gebied onder de tip is weliswaar attractief voor de positieve ladingdragers, maar daardoor ook meteen repulsief voor de negatief geladen elektronen. Aangezien voor luminescentie beide nodig zijn, zal in de regel dus geen licht uitgezonden worden. Dat dit in ons sample toch gebeurt is een gelukkig toeval. Vlak onder het oppervlak, op 17 nm diepte, zit namelijk een barrièrelaag die er voor zorgt dat (een deel van) de elektronen niet naar achteren kan ontsnappen, maar vlak bij de tip-veroorzaakte quantum dot blijft zitten. Het zijn deze elektronen die recombineren met de gaten en daarbij het door ons waargenomen licht uitzenden.

Uniek en onbegrepen

In een groot aantal opzichten zijn de hierboven beschreven metingen uniek. In de eerste plaats is het aantal ladingsdragers in de quantum dot extreem hoog. Verder kunnen zowel de gaten- als de elektronendichtheid afzonderlijk geregeld worden, door respectievelijk de spanning en de stroom tussen tip en sample te variëren. In andersoortige metingen is dit vrijwel onmogelijk. Door ook daadwerkelijk spanning en stroom te variëren hebben we zeer interessante spectra gemeten, die echter tevens bijzonder lastig te interpreteren blijken te zijn. Dit is een rechtstreeks gevolg van het nieuwe karakter van dit soort metingen en het grote aantal parameters dat een rol speelt.

In samenwerking met de theoriegroep van professor Devreese uit Antwerpen zijn we er echter in geslaagd belangrijke delen van de meetresultaten te interpreteren. Om de breedte van de pieken in de spectra te verklaren, moeten we aannemen dat de geïnjecteerde elektronen met de gaten recombineren voordat ze hun evenwichtstoestand bereikt hebben. Hierbij is gebleken dat de afzonderlijke pieken in de spectra niet overeenkomen met recombinatie van één bepaalde gaten-quantumtoestand met één bepaalde elektronen-quantumtoestand, maar dat ze samengesteld zijn uit een aantal van dit soort recombinaties.

Waarom deze verschillende recombinatiemogelijkheden optellen tot één bepaalde piek in het spectrum is op dit moment onduidelijk. Het verschuiven van de spectra met de spanning tussen tip en sample lijkt redelijk eenvoudig te begrijpen in bestaande modellen. Dit is niet het geval voor de waargenomen stroomafhankelijkheid. De spectra blijken met toenemende stroom namelijk zeer sterk naar kortere golflengtes (naar het blauw) te verschuiven. De eerste, simpele modellen om dit te beschrijven geven ofwel een veel te kleine verschuiving, ofwel een verschuiving naar grotere golflengtes. Op het moment van schrijven, zijn we bezig de mogelijkheid dat ook de gaten in een niet-evenwichtstoestand zitten te onderzoeken.

Uit het bovenstaande moge duidelijk zijn dat het toeval bij het vinden van deze 'optisch actieve tip-veroorzaakte quantum dot' een duidelijke rol heeft gespeeld. Toch was er, zoals meestal bij dit soort 'toevallige' ontdekkingen, wel degelijk sprake van een goede voorbereiding van het experiment, waardoor de juiste randvoorwaarden aanwezig waren. Om een dergelijke quantum dot aan het oppervlak te laten luminesceren is het van belang dat het oppervlak helemaal vrij is van verontreinigingen. Hieraan was zeer veel aandacht besteed, en een speciale, één atoomlaag dikke zwavellaag was aangebracht om verontreiniging te voorkomen. Ook mag het duidelijk zijn dat de gebruikte STM tips extreem scherp moeten zijn. Dit wordt bereikt in een vierstaps etsproces, waarbij uit platina draad met een diameter van 0.15 mm tips geëts worden waarvan de kromtestraal van de punt minder dan 50 nm is.

Enigszins afstand nemend van de hierboven beschreven details kunnen we zeer tevreden zijn. We zijn er in geslaagd om een opstelling te maken die uniek in de wereld is, en die zeer betrouwbaar blijkt te zijn. Het is gelukt om STL te meten aan diep gelegen structuren en de onderliggende fysische processen zijn begrepen. Anderzijds blijken STL metingen aan een 'oppervlakkige' structuur, de tip-veroorzaakte quantum dot, nog volop voor verassingen te kunnen zorgen.

Dimensionaliteit

Wanneer deeltjes, bijvoorbeeld elektronen, in een (deel van een) sample zodanig worden opgesloten dat de beweging in één richting 'ernstig' wordt belemmerd, wordt dit sample twee-dimensionaal genoemd omdat de deeltjes nog maar in twee richtingen vrijelijk kunnen bewegen. De derde dimensie is 'uitgeschakeld'. Op analoge wijze zijn één- en nul-dimensionale structuren te definiëren. Het is zinvol om deze begrippen te introduceren omdat blijkt dat de 'dimensionaliteit' van het sample voor een groot deel zijn eigenschappen bepaalt, onafhankelijk van, bijvoorbeeld, het materiaal waarvan het gemaakt is.

STM en STL

De Scanning-Tunneling Microscoop (STM) is gebaseerd op het zogenaamde 'tunnel-effect'. Als twee geleidende voorwerpen waartussen een elektrisch potentiaalverschil (spanning) staat zich minder dan een paar nanometer uit elkaar bevinden, maar elkaar niet raken, kunnen elektronen toch oversteken. De stroom die gaat lopen is extreem gevoelig voor de afstand tussen de geleiders. Door nu met een zeer scherpe naald, de 'tip', dicht over een geleidend oppervlak te bewegen, en daarbij de tunnel-stroom die gaat lopen constant te houden, zijn oneffenheden van minder dan 0.01 nm hoog en minder dan 0.1 nm breed nog te 'zien'. Deze techniek is zo gevoelig dat individuele atomen zichtbaar zijn. Wanneer het elektron, nadat het 'getunneld' heeft, een gat (voor het gemak te beschouwen als een anti-elektron) treft kunnen deze twee recombineren, onder uitzending van licht. Dit proces (STM-veroorzaakte luminescentie of STL) maakt het mogelijk om optische eigenschappen op een nanometer schaal te bestuderen.

Project: *Directe metingen door STM van de elektronische eigenschappen in 2-D, 1-D en 0-D systemen.*

Dr. M. Kemerink is verbonden aan de Vakgroep Halfgeleiderfysica van de Technische Universiteit Eindhoven.

E-mail: m.kemerink@tue.nl