

# Nanogolfgeleider voor individuele fotonen

**Fotonen zijn geschikte deeltjes voor het verzenden van informatie omdat ze weinig interactie met hun omgeving hebben en de informatie daardoor niet verloren gaat. Individuele fotonen zijn erg geschikt om quantuminformatie mee te versturen. De meeste systemen die individuele fotonen genereren, zenden deze in een willekeurige richting uit, waardoor alsnog veel informatie verloren gaat, omdat de fotonen niet hun eindbestemming bereiken. Typisch bereikt maar 1% van de fotonen hun doel. In ons onderzoek laten we zien dat we dit kunnen verhogen naar 42% door een één-fotonbron te plaatsen in een nanogolfgeleider op een gouden spiegel.** Maaïke Bouwes Bavinck, Michael Reimer, Gabriele Bulgarini, Erik Bakkers en Val Zwiller

412

Quantumcommunicatie is een belangrijk onderdeel bij het ontwikkelen van netwerken tussen quantumcomputers en voor het gebruik van quantumcryptografie [1]. Quantumcomputers maken gebruik van de quantummechanica door bits niet alleen '0' of '1' te laten zijn, maar ook '0' en '1' tegelijk. Deze quantummechanische toestand wordt een superpositie genoemd. Ook quantumcryptografie maakt gebruik van superposities om informatie te coderen. Bij het uitwisselen van informatie moet deze superpositie

worden verzonden en ontvangen. Dit kan bijvoorbeeld met een enkel foton dat zich in een superpositie van polarisatietoestanden bevindt. Fotonen zijn een betrouwbare manier om quantuminformatie uit te wisselen, omdat een foton weinig interactie heeft met zijn omgeving en daardoor de superpositie bewaard blijft.

Een veel belovende bron voor het uitzenden van individuele fotonen zijn quantumdots. Deze quantumdots hebben namelijk een hoge interne quantumefficiëntie; voor bijna elk elektron-gatpaar zendt de quantumdot een foton uit [2]. Echter, veel van de informatie gaat verloren, omdat niet alle fotonen worden opgevangen door de meetopstelling. De fractie van fotonen die door de eerste lens van de meetopstelling wordt geïncollimeerd wordt de collectie-efficiëntie genoemd.

De meest gebruikte methode om quantumdots te groeien is Stranski-Krastanovgroei (SK-groei). Deze methode maakt gebruik van het verschil in roosterafstand tussen twee verschil-

lende materialen wat zorgt voor een mechanische spanning in het materiaal dat wordt gegroeid. Hierdoor ontstaan kleine willekeurig geïncollimeerde eilanden van het gegroeide materiaal: de quantumdots (figuur 1a). Vervolgens wordt er een laag over de quantumdots gegroeid. Dit is belangrijk omdat aan het oppervlak van de quantumdots de elektronen en gaten kunnen recombineren zonder een

Maaïke Bouwes Bavinck (1985) studeerde in 2010 af aan de Universiteit Twente op het meten van het Seebeckeffect in dunne films. Haar promotieonderzoek in de groep Quantum Transport onder begeleiding van Val Zwiller richt zich op het onderzoeken van quantumdots in nanodraden gedefinieerd door de kristalstructuur.



Michael Reimer (1976) behaalde zijn BSc in natuurkunde aan de University of Waterloo in 2000. Daarna werkte hij twee jaar in R&D bij JDS Uniphase alvorens terug te gaan naar de academie. In 2004 studeerde hij af in Toegepaste Natuurkunde aan de Technical University of Munich. Daarna promoveerde hij aan de University of Ottawa onder toezicht van Dr. R. Williams aan de National Research Council of Canada. Michael is nu post-doc aan de TU Delft in de groep van Val Zwiller en onderzoekt quantumdots in halfgeleidende nanodraden voor toepassingen in de quantuminformatie.

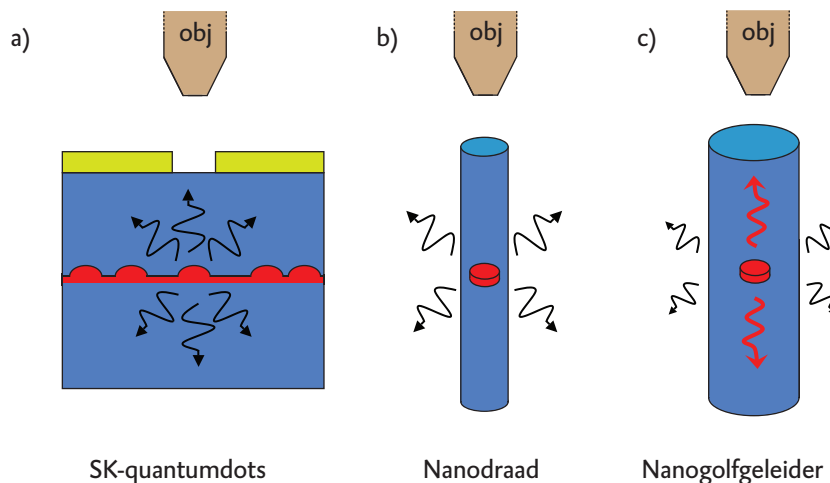


M.E.Reimer@tudelft.nl

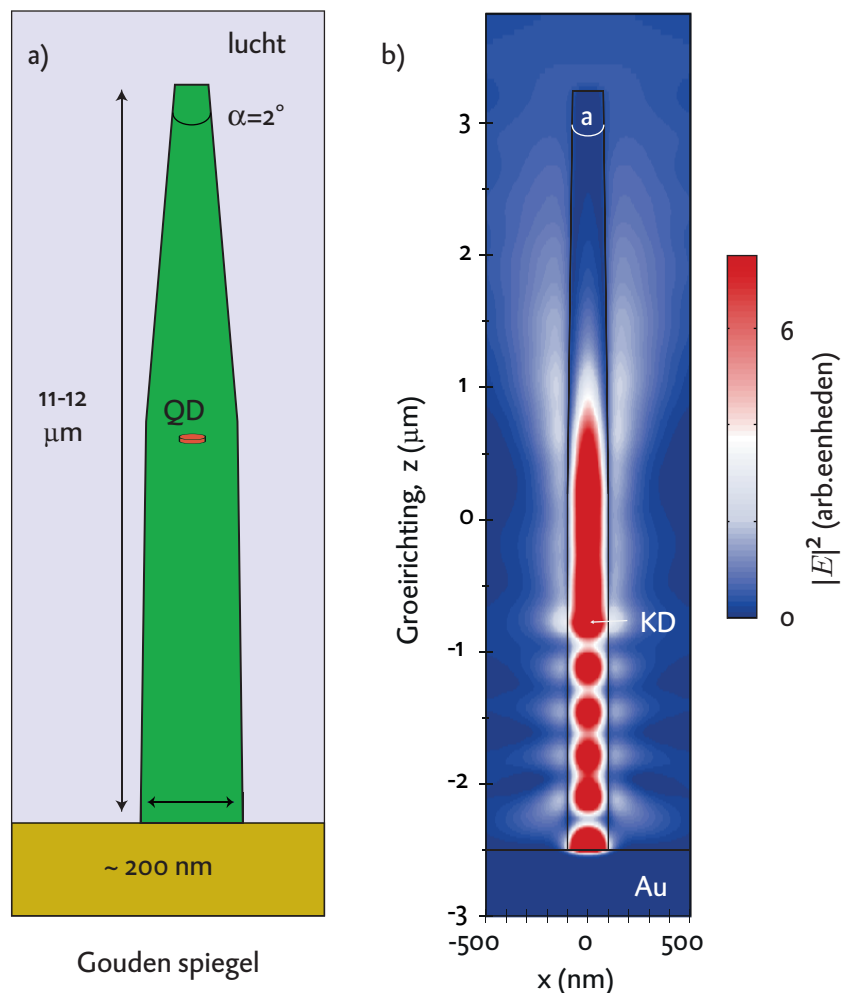
foton uit te zenden. Echter, door deze extra laag worden de fotonen in willekeurige richting uitgezonden wat resulteert in een lage collectie-efficiëntie. Van de fotonen die richting de detector worden uitgezonden, wordt ook nog een gedeelte gereflecteerd aan het oppervlakte tussen het sample en de lucht.

### Nonodraden verbeteren collectie-efficiëntie

De collectie-efficiëntie kan sterk worden verbeterd door de quantumdots in nanodraden te plaatsen [3]. Bij dunne draden kan een foton nog steeds in een willekeurige richting worden uitgezonden (figuur 1b), maar door de draad dikker te maken ontstaat een nanogolfgeleider (figuur 1c). Er komen dan 'eigenmodes' in de draad beschikbaar: dat zijn toestanden die fotonen kunnen geleiden. De dikte waarbij dat gebeurt, hangt af van de brekingsindex van het draadmateriaal en de omgeving, en de golflengte van de fotonen. Als de draad zich als een golfgeleider gedraagt, wordt een foton met grote waarschijnlijkheid in de richting van de draad uitgezonden. Daarnaast vindt door de hoge dichtheid van de eigenmodes de recombinatie van het elektron-gatpaar sneller plaats en worden er per seconde meer fotonen uitgezonden [4]. Dit gebeurt het meest efficiënt als de quantumdot zich precies op de verticale symmetrie-as van de draad bevindt; de koppeling is dan het grootst. De collectie-efficiëntie kan nog meer worden vergroot door de draad taps toe te laten lopen (figuur 2a). Zonder taps verloop van de draad kunnen de fotonen worden gereflecteerd aan het uiteinde van de draad door het verschil in brekingsindex tussen de draad en de lucht. Doordat de draad taps toeloopt is de overgang tussen de eigenmodes in de draad en de vrije ruimte adiabatisch en vindt er minder reflectie plaats aan het uiteinde van de nanodraad. Dit is optimaal als de hoek  $\alpha$  van de draad  $r^\circ$  is [5]. In figuur 2b is een simulatie te zien van hoe het licht door de nanodraad wordt geleid en gekoppeld naar de vrije ruimte. In de simulatie is ook te zien dat een gedeelte van de fotonen naar de basis van de draad wordt uitgezonden. Door een spiegel aan de onderkant van de draad te maken, kunnen deze fotonen worden gereflecteerd en alsnog worden gedetecteerd.



**Figuur 1** a) Stranski-Krastanov-quantumdots zenden fotonen in willekeurige richting uit. Ook worden veel fotonen aan het oppervlakte van het sample terug gereflecteerd. Hierdoor is de collectie-efficiëntie van dit soort samples laag. b) Quantumdots kunnen ook in een nanodraad worden gegroeid. In een dunne nanodraad worden fotonen echter nog steeds in willekeurige richting uitgezonden. c) Door de nanodraad dikker te maken ontstaat een nanogolfgeleider. Hierdoor wordt 95% van de fotonen in de richting van de draad uitgezonden en kan de collectie-efficiëntie sterk worden verbeterd.



**Figuur 2** a) Een schematische weergave van een golfgeleider met quantumdot (QD). Door de taps toeloping gaan de modes in de draad adiabatisch over in de vrije ruimte en worden er minder fotonen gereflecteerd aan het oppervlakte tussen de draad en de lucht. De gouden spiegel zorgt er voor dat fotonen die richting de onderkant van de draad zijn uitgezonden worden gereflecteerd en alsnog kunnen worden gedetecteerd. b) De simulatie laat zien hoe het elektrische veld,  $E$ , van het licht zich in de nanodraad gedraagt en wordt gekoppeld aan de vrije ruimte.

teerd. Theoretisch is er een collectie-efficiëntie mogelijk van 97% [6].

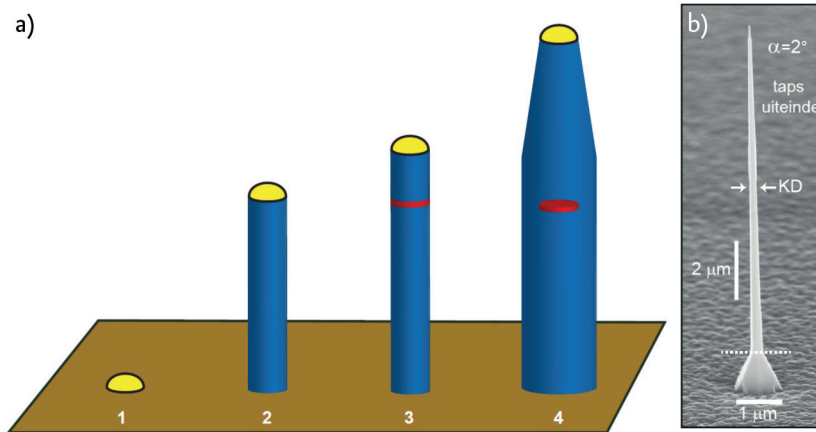
### Hoe maak je een taps toelopende nanodraad?

Er zijn twee verschillende manieren om taps toelopende nanodraden te maken. De eerste manier is door een sample te groeien zoals in figuur 1a, en er vervolgens pilaren uit te etsen

[8]. Met deze methode is het lastig om de quantumdot precies op de verticale symmetrie-as van de draad te positioneren. Zo kan de dot zich precies op de verticale symmetrie-as van de draad bevinden, maar ook dicht bij het oppervlak van de draad. Dit laatste vermindert koppeling tussen de quantumdot en de draad aanzienlijk. Ook kan een draad meer dan één quan-

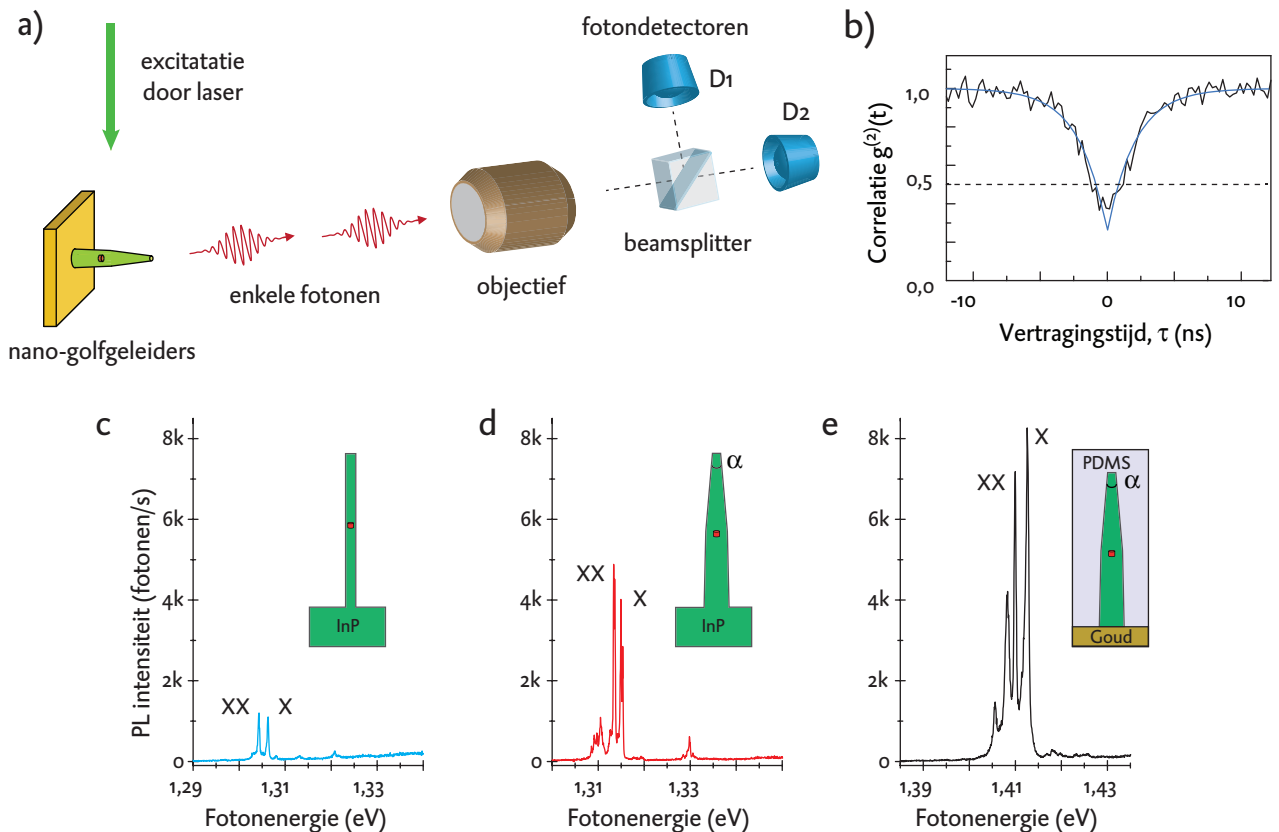
tumdot bevatten, waardoor het niet mogelijk is één enkele quantumdot te exciteren[8]. Een ander nadeel is dat de hoek,  $\alpha$ , niet kleiner kan worden gemaakt dan  $5^\circ$  door praktische beperkingen van het etsproces.

De oplossing voor deze problemen is door de draden vanuit een gouddruppel te laten groeien (figuur 3). De gouddruppel dient als katalysator voor de groei (1). Als de gouddruppel verzadigd is, begint er een draad te groeien met een diameter ongeveer gelijk aan die van de gouddruppel (2). Door tijdens de groei de samenstelling van de aanwezige gassen te veranderen, kan een ander materiaal gegroeid worden en ontstaat een quantumdot (3). De draad die op deze manier gegroeid is, is te dun om als golfgeleider te dienen. Daarom wordt na het groeien van de quantumdot de temperatuur verhoogd. Hierdoor ontstaat er een schil om de draad (4). Ook krijgt de draad hierdoor een taps vorm. De hoek  $\alpha$  hangt af van de temperatuur: hoe hoger de temperatuur, hoe groter de hoek  $\alpha$  is. De dikte van de draad neemt toe met de groeitijd. Op deze manier kan dus zowel de dikte van de draad als de hoek  $\alpha$  worden



**Figuur 3** a) Schematische weergave van de groei van een nanodraad. (1) De gouddruppel werkt als katalysator. (2) De reactor wordt gevuld met een reactief gas en als de gouddruppel is gesatureerd begint de draad te groeien. (3) Door het reactieve gas te veranderen kan de quantumdot worden gegroeid. (4) Door verhoging van temperatuur groeit de draad radiaal en krijgt hij een taps toelopende punt. b) Een SEM-afbeelding van een typische draad die we hebben gebruikt om de collectie-efficiëntie te verbeteren.

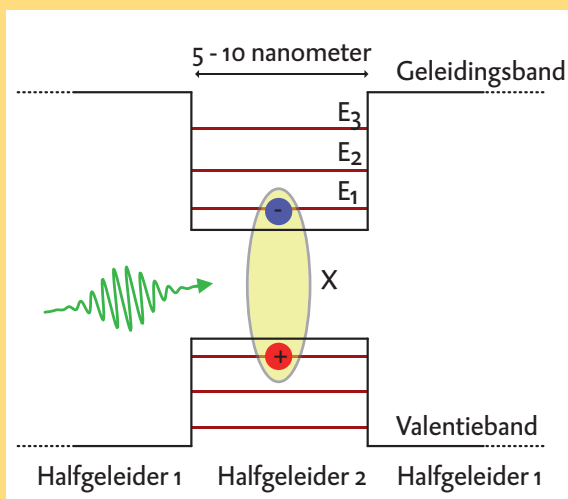
414



**Figuur 4** a) De opstelling voor het Hanbury Brown-Twiss-experiment. b) Omdat de correlatie tussen de twee detectoren bij  $\tau=0$  ns onder de 0,5 gaat, laten we zien dat we een enkele-fotonenbron hebben. c - e) De intensiteit voor enkele fotonen met een bepaalde energie uitgezonden voor c) een draad zonder taps toelopende top en zonder golfgeleidende eigenschappen, d) een nanogolfgeleider en e) dezelfde soort nanogolfgeleider als in d) maar nu op een gouden spiegel. De intensiteit is 24 keer zo groot in e) als in c).

## Quantumdots

Quantumdots worden gemaakt van halfgeleidende materialen. Deze worden gekenmerkt door een valentieband en een geleidingsband die worden gescheiden door een bandkloof. De valentieband en geleidingsband geven aan welke energieën voor elektronen toegestaan zijn in het materiaal. Dit verschilt per materiaal, waardoor ook de bandkloof per materiaal verschilt. Door de halfgeleidende materialen goed te kiezen en van één van de materialen een heel klein doosje te maken in het andere materiaal, ontstaat een potentiaalput waar elektronen in kunnen worden opgesloten. Door de kleine dimensies van het doosje zijn er alleen discrete energieniveaus beschikbaar voor het elektron, net als bij een atoom. Een quantumdot wordt daarom ook wel een kunstmatig atoom genoemd. Met een laser kan een elektron in de dot worden aangeslagen uit de valentieband naar de geleidingsband. Er blijft dan een gat (een ontbrekend elektron) over in de valentieband van de quantumdot. Na enige tijd, typisch nanoseconde, recombineren het elektron en het gat weer waarbij een foton wordt gegenereerd.



**Figuur 2** De bandstructuur van een quantumdot gedefinieerd door twee verschillende halfgeleidende materialen. Elektron-gatparen kunnen optisch geëxciteerd worden.

gecontroleerd. Doordat eerst de draad wordt gegroeid en vervolgens de schil, bevindt de quantumdot zich altijd precies in het midden van de draad op de verticale symmetrie-as.

We gebruiken deze methode om een InAsP-quantumdot in InP-nanodraden te groeien. Een afbeelding gemaakt met een scanning-elektronmicroscop (SEM) is te zien in figuur 3b. De draden zijn ongeveer 9 tot 11  $\mu\text{m}$  lang, de dikte is ongeveer 160 tot 220 nm en de hoek  $\alpha$  is typisch  $2^\circ$ .

### De quantumdot is een één-fotonbron: het bewijs

We tonen aan dat de quantumdot een één-fotonbron is met een Hanbury Brown-Twiss-experiment. De opstelling voor dit experiment is te zien in

figuur 4a. Met een laser wordt in de quantumdot een elektron-gatpaar geëxciteerd. Het foton dat na recombinatie van dit elektron-gatpaar weer wordt uitgezonden, wordt naar een beamsplitter gestuurd. De beamsplitter, een half doorlatende spiegel, zorgt ervoor dat met 50% kans het foton door D1 wordt gedetecteerd en met 50% kans door D2. Als een bron individuele fotonen uitzendt, kunnen detector D1 en D2 niet tegelijkertijd een foton detecteren. In figuur 4b is een meting van dit experiment te zien. Er is een duidelijke dip te zien in de meting bij  $\tau=0$  ns, waarbij  $\tau$  de vertraging is tussen de twee detectoren. Voor een één-fotonbron geldt dat de dip onder 0,5 moet gaan. De meting in figuur 4b bewijst dat de quantumdot inderdaad een één-fotonbron is.

In figuur 4c, d en e is te zien hoe de collectie-efficiëntie stapsgewijs verbetert als we eerst de diameter van de draad vergroten en de uitkoppelhoek optimaliseren, en daarna een spiegel onder de draad introduceren. De meting toont het aantal fotonen dat per seconde met een bepaalde energie wordt uitgezonden door de quantumdot. In figuur 4c is het resultaat te zien van een meting voor een dunne draad zonder golfgelei-

dende eigenschappen en zonder taps verloop aan het uiteinde. In figuur 4d is een dikkere draad gemeten die taps toeloopt. Deze draad gedraagt zich als een nanogolfgeleider. In figuur 4e is een gelijksoortige draad te zien als in figuur 4d. Echter, deze draad is met PDMS, een flexibele transparante polymeer, van het groeisubstraat verwijderd en er is een goudlaag gedeponeerd aan de onderkant van de draad. Deze goudlaag fungeert als spiegel. Het aantal fotonen dat wordt gecollecteerd van deze nanogolfgeleider op de goudspiegel is 24 keer groter dan de dunne draad uit figuur 4c. De totale collectie-efficiëntie van de golfgelei-

Gabriele Bulgarini (1985) studeerde af in de natuurkunde aan de Politecnico di Milano in Italië in 2009. Sindsdien is hij promovendus aan de TU Delft in de groep Quantum Transport onder begeleiding van Val Zwiller. Gabriele doet zijn promotieonderzoek naar het realiseren van bronnen en detectoren voor enkele fotonen door gebruik te maken van halfgeleidende nanodraden.



Erik Bakkers studeerde scheikunde aan de Universiteit Utrecht. In 2000 promoveerde Erik op het gebied van ladingsoverdracht tussen colloïdale quantumdots. Hierna is hij direct begonnen bij Philips research en heeft hij gewerkt aan diverse toepassingen van halfgeleidende nanodraden. Sinds 2010 werkt hij bij de TU/e (80%) en doet hij onderzoek naar de groei van nanodraden, zonnecellen, en thermo-electriciteit. Bij de TUD (20%) werkt hij samen met Leo Kouwenhoven en Val Zwiller aan quantumtransport en optica.



der is 42% [2].

We concluderen dat door van de nano-draad een nanogolfgeleider te maken die taps toeloopt, we een collectie-efficiëntie krijgen van 42%. Door de goudspiegel te verbeteren is de verwachting dat een collectie-efficiëntie van rond de theoretische waarde van 97% moet kunnen worden gehaald. Onze stap in het vergroten van de collectie-efficiëntie brengt efficiënte quantumcommunicatie steeds dichterbij.

### Referenties

- 1 N. Gisin en R. Thew, *Quantum communication*, *Nature Photonics* **1** (2007) 165-171.
- 2 A. J. Shields, *Semiconductor quantum light sources*, *Nature Photonics* **1** (2007) 215-223.
- 3 M. E. Reimer, G. Bulgarini, N. Akopain, M. Hocevar, M. Bouwes Bavinck, M. A. Verheijen, E.P.A.M Bakkers, L.P. Kouwenhoven en V. Zwiller, *Bright single-photon*

*sources in bottom-up tailored nanowires*, *Nature Communications* **3** (2012) 737.

- 4 G. Bulgarini, M.E. Reimer, T. Zehender, M. Hocevar, E. P. A. M. Bakkers, L. P. Kouwenhoven en V. Zwiller, *Spontaneous emission control of single quantum dots in bottom-up nanowire waveguides*, *Applied Physics Letters* **100** (2012) 121106.
- 5 N. Gregersen, T. R. Nielsen, J. Claudon, J.-M. Gérard en J. Mørk. *Controlling the emission profile of a nanowire with a conical taper*, *Optics letters* **33** (2008) 1693-1695.
- 6 I. Friedler, C. Sauvan, J. P. Hugonin, P. Lalanne, J. Claudon en J. M. Gerard. *Solid-state single photon sources: the nanowire antenna*. *Optics express* **17**, (2009) 2095-2110.
- 7 J. Claudon, J. Bleuse, N. S. Malik, M. Bazin, P. Jaffrennou, N. Gregersen, C. Sauvan, P. Lalanne & J.-M. Gerard, *A highly efficient single-photon source based on a quantum dot in a photonic nanowire*, *Nature Photonics* **4** (2010) 174-177.
- 8 J. Bleuse, J. Claudon, M. Creasey, N. S. Malik, J.-M. Gerard, I. Maksymov, J.-P.

Val Zwiller (1971) heeft gestudeerd aan de Universiteit van Strasbourg en haalde zij PhD aan de Universiteit van Lund in 2001 op het optisch bestuderen van quantumdots. Na postdocposities in Duitsland en Zwitserland kwam hij in 2006 bij het Kavli Institute of Nanoscience in Delft waar hij de optische eigenschappen van nanostructuren op enkel-fotonniveau bestudeerde.



Hugonin en P. Lalanne, *Inhibition, enhancement, and control of spontaneous emission in photonic nanowires*, *Physical Review Letters* **106** (2011) 103601.

Student



416

# Faseovergangen door quantumonzekerheid

Faseovergangen bieden een uitstekende context om de bestendigheid van theorieën te testen. Normaal gesproken worden faseovergangen gedreven door thermische fluctuaties. Op het absolute nulpunt kunnen echter ook quantumfluctuaties leiden tot faseovergangen. Experimenteel zijn deze onder andere waargenomen in spinvloeistoffen [1], hogetemperatuursupergeleiders en experimentele realisaties van het Isingmodel [2]. Zulke quantumfaseovergangen bevatten verrassende eigenschappen die scherp geformuleerd kunnen worden. Een project waard. Jins de Jong, Lennert van Tilburg en Erik van Loon

**D**e oorspronkelijke classificatie van faseovergangen is afkomstig van Paul Ehrenfest. Hierin is een faseovergang een discontinuïteit in een relevante (orde)parameter

of zijn afgeleiden. Inmiddels zijn er echter ook faseovergangen zonder discontinuïteiten gevonden, bijvoorbeeld de Kosterlitz-Thoulessovergang [3]. Een beschrijving van dergelijke

faseovergangen gaat niet uit van de eigenschappen van de fases zelf, maar van de manier waarop ze in elkaar overgaan. Inzichtelijker zou het zijn om aan de hand van de structuur van