

Quantumcircuitjes bouwen in een elektronenmicroscop

De uitzonderlijke eigenschappen van defecten in minuscule diamantjes maken het mogelijk om quantummechanische fenomenen te bestuderen en te gebruiken. Met een nieuwe techniek kunnen we nu deze diamantjes met een nauwkeurigheid van een paar nanometer positioneren, en zo verschillende quantumelementen aan elkaar koppelen op een chip.

Toeno van der Sar, Erwin Heeres, Tjerk Oosterkamp en Ronald Hanson

408

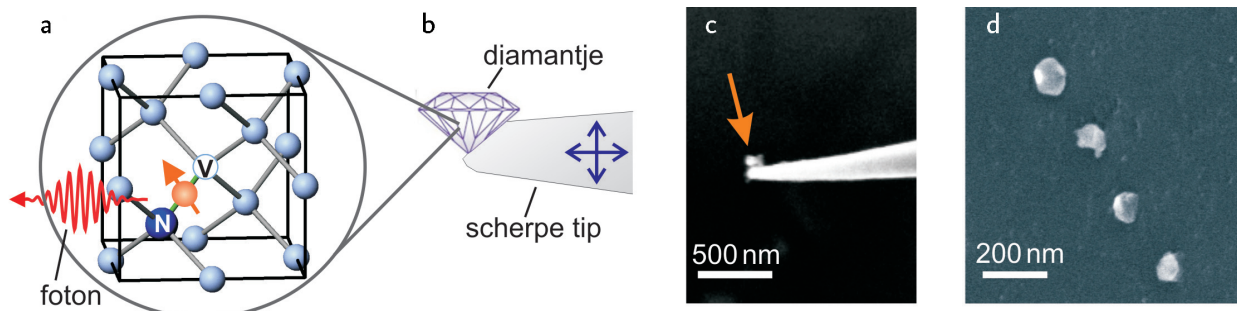
Diamant staat bekend om zijn extreme eigenschappen, zoals de uitzonderlijke hardheid, warmtegeleiding en duurzaamheid, die op grote schaal worden gebruikt in de industrie. Daarnaast heeft diamant zich de laatste jaren ontpopt tot een populair materiaal onder quantumfysici. Defecten in diamant hebben namelijk interessante quantummechanische eigenschappen die sterk lijken op die van enkele atomen. Maar de ingewikkelde technieken die nodig zijn om enkele atomen op hun plaats te houden zijn niet nodig om deze defecten te bestuderen: ze zitten vast in het kristalrooster.

Eén van de meest bijzondere defecten is

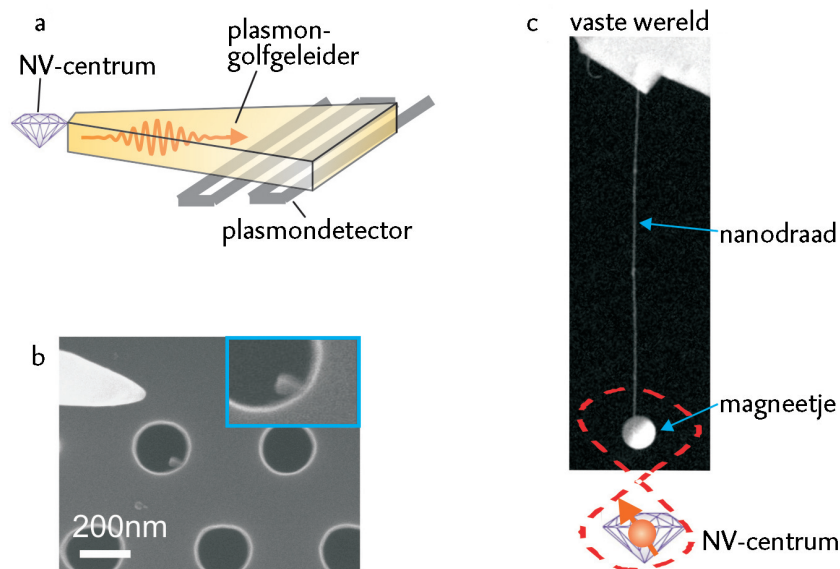
het NV (nitrogen-vacancy) centrum (zie figuur 1a). De sterkte waarmee het NV-centrum fluoresceert, hangt namelijk af van de richting van zijn intrinsieke magnetische moment ('spin'). Daardoor kunnen we de spinrichting van een individueel NV-centrum bepalen met behulp van fluorescentiemicroscopie. Daarnaast zijn spintoestanden in diamant uitzonderlijk stabiel. Dit stelt ons in staat om met hoogfrequente straling elke gewenste quantummechanische superpositie van spintoestanden te creëren en manipuleren, zelfs op kamertemperatuur. Deze eigenschappen maken het NV-centrum een aantrekkelijke kandidaat voor toepassingen in de quantuminformatica [1].

Als de diamant klein genoeg is, van de orde van enkele tientallen nanometers, is het mogelijk dat het slechts één enkel NV-centrum bevat. Dit NV-centrum is dan bovendien veel minder dan een optische golflengte verwijderd van het oppervlak van het diamantje. In dat geval worden zowel de optische eigenschappen als de spintoestand van het NV-centrum sterk beïnvloed door de directe omgeving van het nanokristal, wat interessante mogelijkheden biedt.

Aan de ene kant kan het NV-centrum dienst doen als ultragevoelige sensor om een onbekende omgeving in kaart te brengen. Een goed voorbeeld is de recente wereldwijde inspanning om



Figuur 1 Nanopositioneren van diamantjes met één NV-centrum. a) Structuur van het NV-centrum, bestaande uit een stikstofatoom (N) naast een missend koolstofatoom (V) in het diamantrooster. Dit NV-centrum is een stabiele enkel-fotonbron. De spin van het NV-centrum is zeer stabiel en kan gebruikt worden als quantumbit. b) Door middel van een zelfgemaakte manipulator met scherpe tip kunnen we kleine diamantjes verplaatsen. c) Elektronenmicroscopieplaatje van de tip waarmee een diamanten nanokristal is opgepakt. d) Vier diamantjes die netjes op een rij zijn gelegd.



Figuur 2 Experimenten die mogelijk worden met de nanopositioneringstechniek. a) On-chip-detectie van de lichtemissie van een NV-centrum: het NV-centrum zendt preferentieel plasmonen uit die direct gedetecteerd kunnen worden met een enkel-plasmondetector (samenwerking met Val Zwiller en Leo Kouwenhoven). b) Koppeling van een NV-centrum aan een fotonisch kristal. Links is de tip zichtbaar waarmee het nanokristal in het gat is geplaatst (samenwerking met Dirk Bouwmeester). c) Macroscopische superpositie: een klein bolvormig magneetje ondervindt een kracht van een enkele spin in een nanodiamant. De magneet is (met behulp van dezelfde manipulator die voor het positioneren van de nanodiamant is gebruikt) bevestigd aan een lange dunne nanodraad (50 micrometer, 50 nm diameter).

met een NV-centrum een magneetveldmeter te bouwen, waarbij de evolutie van de spin de magnetische veldsterkte verradt. De hoop is dat zo'n sensor zo gevoelig kan worden gemaakt dat het zelfs de nucleaire structuur van moleculen kan ontrafelen [2].

Andersom kunnen we ook het gedrag van het NV-centrum veranderen door een specifieke omgeving te ontwerpen, en het diamantje dan in deze omgeving te plaatsen. Met zulke quantum engineering kan dan de sterkte, de golflengte en de richting van de fotonemissie van het NV-centrum worden gecontroleerd. De moeilijkheid tot nu toe was echter dat er geen manier was om een diamanten nanokristal met een enkel NV-centrum gecontroleerd

te kunnen positioneren met de benodigde precisie.

Wij hebben een techniek ontwikkeld waarmee we diamanten nanokristallen kunnen oppakken, en met nanometer-precisie kunnen herpositioneren [3]. Hiervoor maken we gebruik van een zelfgebouwde nanomanipulator binnenin een scannende-elektronenmicroscop (SEM). De nanomanipulator bestaat uit twee beweegbare onderdelen: op de één is een plaatje met diamantjes gemonteerd, op de ander een scherpgeëte wolfram tip (figuur 1b). De tip kan met subnanometer-precisie worden bewogen door middel van een piëzosysteem. Door de tip zacht tegen een diamantje te duwen, blijft het onder invloed van vanderwaalskrachten plakken en kan het worden opgepakt. Het diamantje kan vervolgens op een willekeurige locatie weer worden neergelegd.

Het mooie is dat we met behulp van de SEM het positioneren 'live' kunnen zien (zie [4] voor online filmpjes). We kunnen diamantjes zo klein als 30 nanometer oppakken, en met een precisie van enkele nanometers positioneren (figuur 1c).

De diamantjes worden voor het positioneren optisch gekarakteriseerd, zodat we precies weten

welke er één NV-centrum bevatten. Vervolgens stellen we de positie van gewenste diamantjes vast ten opzichte van vooraf gefabriceerde markers, zodat we ze kunnen terugvinden en verplaatsen met de nanomanipulator. Door het NV-centrum zowel vóór als ná het positioneren te karakteriseren, hebben we aangetoond dat de unieke eigenschappen van het NV-centrum behouden blijven.

Met deze nieuwe techniek kunnen we nu bottom-up quantumcircuitjes bouwen met verschillende nano-elementen naar keuze. Eén van de experimenten waar wij momenteel aan werken is het on-chip detecteren van het uitgezonden licht van een NV-centrum, zie figuur 2a. Als een NV-centrum binnen pakweg dertig nanometer van een metalen golfgeleider is geplaatst, zal de lichtemissie van het NV-centrum hoofdzakelijk bestaan uit oppervlakteplasmonen (ladingsgolven aan het oppervlak van het metaal), die door de golfgeleider rechtstreeks naar een elektrische enkel-plasmondetector kunnen worden geleid. Op deze manier denken we meer dan 10%, en misschien wel 50% van de lichtemissie van het NV-centrum te kunnen detecteren: een ordegrrootte verbetering ten opzichte van de confocale lichtmicroscop, ons huidige standaardgereedschap voor het bestuderen van enkele defecten. Deze elektrische detectie is ook een opmaat naar experimenten waarbij we de optische eigenschappen van het NV-centrum volledig elektrisch bestuderen: dark optics.

Om de golflengte en de sterkte van de lichtemissie te beïnvloeden, willen we (in samenwerking met de groep van Dirk Bouwmeester) het NV-centrum in een optische trilholtte plaatsen (figuur 2b). De trilholttes van onze keuze worden gefabriceerd in fotonische kristallen. De verhoogde lichtopbrengst van fotonen van een

Toeno van der Sar (1982) studeerde in 2008, na een onderzoeksstage op Harvard, af aan de TU Delft op supergeleidende fase-slip-juncties. Sindsdien doet hij promotieonderzoek in Delft naar interacties tussen enkele defecten in diamant en fotonen en plasmonen.



Erwin Heeres (1977) studeerde in 2003 af aan de TU Delft op een onderzoek aan qubits van Josephson-juncties. Zijn promotieonderzoek in Leiden richt zich onder meer op de veldemissie-eigenschappen van koolstof nanobuizen.



Tjerk Oosterkamp (1972) studeerde aan de TU Delft en promoveerde daar in 1999 cum laude bij J. Mooijen L. Kouwenhoven. Na twee jaar postdoc bij C. Lieber aan Harvard is hij in Leiden doorgedaan met het toepassen en ontwikkelen van atomaire-krachtmicroscopie ten behoeve van biologische en biomedische toepassingen. Het hier gepresenteerde werk is gesteund door STW.



goed gedefinieerde energie is een opmaat naar het overbrengen van quantuminformatie van één spin naar één foton, en voor het quantum-verstrengelen van NV-centra die ver uit elkaar liggen en dus geen directe interactie hebben. We gaan ook proberen met ons trilhaute-NV-centrumsysteem het interessante *strong coupling*-regime van licht-materie-interacties te bereiken, waarbij één quantum van energie coherent en omkeerbaar wordt uitgewisseld tussen de trilhaute en het NV-centrum.

In een derde, zeer uitdagend experiment willen we een klein bolvormig

magneetje in de buurt van de nanodiamant brengen (figuur 2c). De magneet is (met behulp van dezelfde manipulator die voor het positioneren van de nanodiamant is gebruikt) bevestigd aan een lange dunne nanodraad (50 micrometer lang, 50 nanometer in diameter). Door de richting van de elektronspin in het NV-centrum periodiek om te keren is het mogelijk om de resonator te exciteren [5]. De vraag is of, wanneer de spin in een quantummechanische superpositie gebracht wordt, de resonator ook in een superpo-

sitie zal komen: zal de resonator, een macroscopisch object, twee verschillende kanten tegelijk op bewegen? Een belangrijke uitdaging van dit experiment is het afkoelen van de hefboom naar temperaturen lager dan 1 milliKelvin. De koppeling met de fononen in de omgeving kan een superpositie van de hefboom namelijk in de weg staan.

De drie hierboven beschreven experimenten geven een idee van de boeiende mogelijkheden die de nieuwe nanopositioneringstechniek ons biedt. Hiermee gaan we de komende tijd op ontdekkingspad.

Ronald Hanson (1976) studeerde aan de RU Groningen en bracht vervolgens met een JPP-beurs een jaar door in Japan. In 2005 promoveerde hij cum laude aan de TU Delft op zijn onderzoek naar elektronspins in quantumdots bij Leo Kouwenhoven. Na twee jaar postdoc bij David Awschalom aan UCSB, is hij in 2007 teruggekeerd naar Delft waar hij defecten in diamant gebruikt voor onderzoek in de quantum-informatica. Dit werk wordt gesteund door FOM en NWO.



R.Hanson@tudelft.nl

Referenties

- 1 D. D. Awschalom, R. J. Epstein, en R. Hanson, *The Diamond Age of Spintronics*, *Scientific American* **297**, 84-91 (2007).
- 2 C. L. Degen, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 243111 (2008).
- 3 T. van der Sar, E. C. Heeres, G. M. Dmochowski, G. de Lange, L. Robledo, T. H. Oosterkamp, en R. Hanson, *Nanopositioning of a diamond nanocrystal containing a single nitrogen vacancy defect center*, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 173104 (2009).
- 4 Ga naar www.ns.tudelft.nl/qt, en klik in de linkerkolom door naar 'Research' – 'Quantum Science and Technology in Diamond'.
- 5 D. Rugar, R. Budakian, H. J. Mamin, B. W. Chui, *Nature* **430**, 329 (2004).