

# Een elektronspin omdraaien met elektrische velden

**Controle over de spin van een elektron is essentieel wanneer deze als bouwsteen van een toekomstige quantumcomputer wordt gebruikt. Onlangs is het gelukt om met elektrische velden de spin van één enkel elektron te controleren. Hiermee is de weg vrijgemaakt voor een veel eenvoudiger besturing van een elektronspin.** Katja Nowack, Frank Koppens, Yuli Nazarov en Lieven Vandersypen

126

Controle over de spintoestand van één enkel elektron maakt het mogelijk om allerlei boeiende eigenschappen van de quantumfysica bloot te leggen, zoals het bestaan van quantummechanische superpositietoestanden en de mechanismen die deze superpositietoestanden weer doen verdwijnen. Deze fundamentele inzichten zijn tevens van groot belang op de weg naar de ont-

wikkeling van quantumbits, de bouwstenen van een mogelijk te realiseren quantumcomputer. In zo'n computer kan een bit in quantummechanische superposities van '0' en '1' zijn. Een actie op deze superpositietoestand werkt dan tegelijk op de '0' en op de '1' toestand van de quantumbits en dit zogenaamde quantumparallelisme leidt tot een potentieel krachtigere computer dan een die met klassieke bits werkt. De spinrichting van een elektron vormt een aantrekkelijke realisatie van zo'n quantumbit of qubit.

De gebruikelijke methode voor het omdraaien van elektronspins is elektronspinresonantie, waarbij gebruik gemaakt wordt van een wisselend magnetisch veld loodrecht op een sterker statisch magnetisch veld. Op resonantie komt de frequentie van het wisselend magnetisch veld overeen met de Larmorprecessiefrequentie van de spin in het statisch magnetisch veld en voert de spin een spiraalbeweging uit die hem van spin-op naar spin-neer en weer terug kan brengen. In 2006 is het voor het eerst gelukt om met deze techniek de spin van één enkel

elektron gecontroleerd rond te draaien [2,3]. Echter, wisselende magnetische velden zijn moeilijk op kleine lengteschaal (pakweg < 100 nm) op te wekken, waardoor het moeilijk wordt om selectief één spin aan te sturen uit een rijtje dicht bij elkaar gelegen spins. Elektrische velden kunnen wel erg lokaal gegenereerd worden; bovendien zijn ze veel gemakkelijker op te wekken, namelijk door middel

Katja Nowack (1979) studeerde 2005 aan de Universiteit RWTH Aken af. Sindsdien doet zij promotieonderzoek aan de Technische Universiteit Delft naar de elektrische manipulatie van enkele elektronspins.



Frank Koppens studeerde aan de Technische Universiteit Eindhoven en promoveerde aan de Technische Universiteit Delft (cum laude) op zijn onderzoek naar de coherente manipulatie van enkele elektronspins. Nu is hij als IQSE postdoctoral fellow werkzaam aan Harvard University.



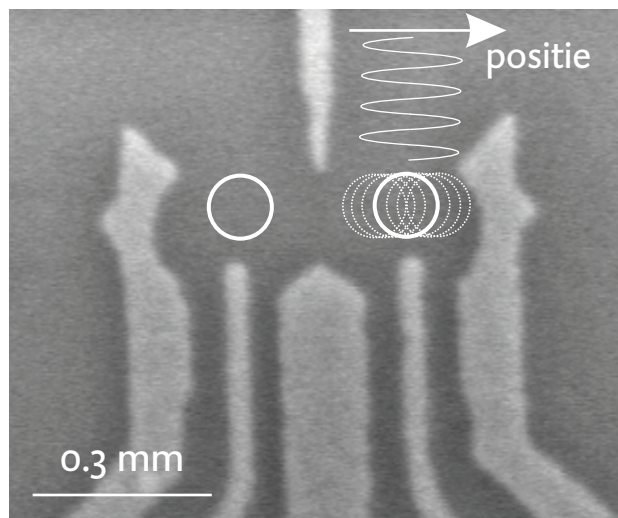
K.C.Nowack@tudelft.nl

Yuli Nazarov (1960) is een theoreticus die sinds 1993 aan de TU Delft werkt. Zijn onderzoek op het gebied van quantumtransport wordt ondersteund door FOM en NWO.



Lieven Vandersypen (1972) is Antoni van Leeuwenhoek hoogleraar aan het Kavli Institute of Nano-Science van de TU Delft. Hij deed zijn studies in Leuven en is gepromoveerd aan de Stanford Universiteit. Zijn werk wordt ondersteund door FOM, NWO en de ERC.





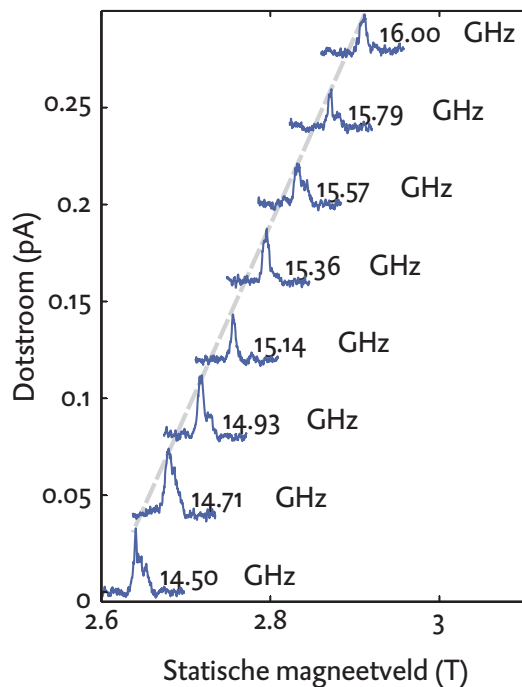
**Figuur 1** Het scanning elektronenmicroscopisch plaatje laat de metalen elektroden bovenop de GaAs/AlGaAs-heterostructuur (lichtgrijze structuren) zien. Met negatieve spanningen op de elektroden kunnen quantumdots gevormd worden in het tweedimensionale elektronengas, circa 90 nm onder het oppervlak. De witte cirkels geven aan waar de twee quantumdots worden gevormd. Op de meest rechtse elektrode staat naast de vaste negatieve spanning ook een wisselspanning. Deze wekt een elektrisch veld op dat de positie van (vooral) de rechterdot periodiek verandert (witte stippellijnen).

van een wisselspanning in plaats van een wisselstroom. Een wisselspanning kunnen wij op een lokale elektrode aanbieden, terwijl we voor een wisselstroom een aparte metaaldrad nodig hebben. Het zou daarom erg voordelig zijn als de spin met elektrische velden aangestuurd kan worden en dat was precies het doel van dit onderzoek.

Sinds enkele jaren is het mogelijk om één enkel elektron op te sluiten in een zogenaamde quantumdot, een elektrische val voor elektronen in een halfgeleider. De quantumdots in dit experiment worden gevormd in een tweedimensionaal elektronengas in een GaAs/AlGaAs-heterostructuur, door vaste negatieve spanningen aan te bieden op metalen elektroden bovenop de heterostructuur (zie figuur 1). Op één van de elektroden leggen we bovendien een wisselspanning aan, waardoor het elektron in (vooral) de dichtstbijgelegen dot periodiek heen en weer beweegt langs de richting van het elektrisch veld. Door de spin-baanwisselwerking voelt het bewegende elektron ook een effectief magneteveld (zie kader), waardoor de richting van zijn spin in principe kan veranderen.

Om de spintoestand van het elektron

uit te kunnen lezen, sluiten wij een tweede elektron op in een quantumdot (links in figuur 1) naast de eerste (rechts in figuur 1). De dots zijn zo ingesteld dat de stroom door de twee dots afhangt van de overgang van het linker elektron naar de rechter dot (daarna verlaat een elektron de rechter dot en tunnelt een nieuw elektron in de linker dot, waarna het proces zich herhaalt). Het Pauli-uitsluitingsprincipe staat echter alleen elektronen met tegengesteld gerichte spins toe de grondtoestand van dezelfde dot te bezetten. Zodra de twee dots tevens bezet worden door elektronen met gelijkgerichte spins is de overgang dus verboden en wordt verdere stroom geblokkeerd (dit noemen we spinblokkade). Maar wanneer we even een wisselend elektrisch veld aanbieden, draait (vooral) de rechter spin en wordt de blokkade opgeheven. Dit principe kunnen wij gebruiken om tot een stroom te komen waarvan de amplitude een maat is voor de hoek waarover de spin wordt gedraaid (zie [2,3] voor meer details). In figuur 2 is de stroom zichtbaar als functie van het statische magneteveld. Als de frequentie van het elektrisch wisselveld gelijk is aan de Larmor-precessiefrequentie van de spin in dit magneteveld, wordt

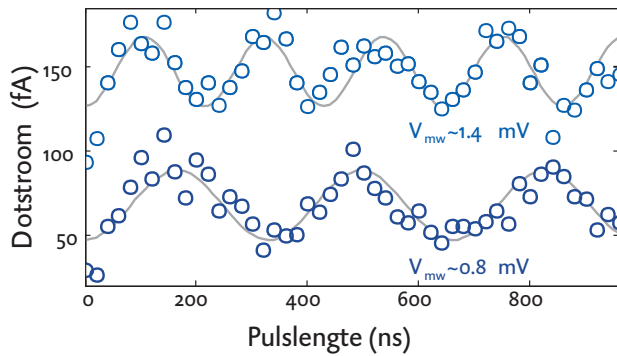


**Figuur 2** Stroom door de twee quantumdots als functie van het statische magneteveld voor acht verschillende waarden van de frequentie van het elektrisch wisselveld (de metingen zijn verticaal ten opzichte van elkaar verschoven). De resonantiepiek verschuift lineair met de excitatiefrequentie, zoals verwacht voor een spin- $\frac{1}{2}$  deeltje in GaAs (zie de grijze stippelijnen).

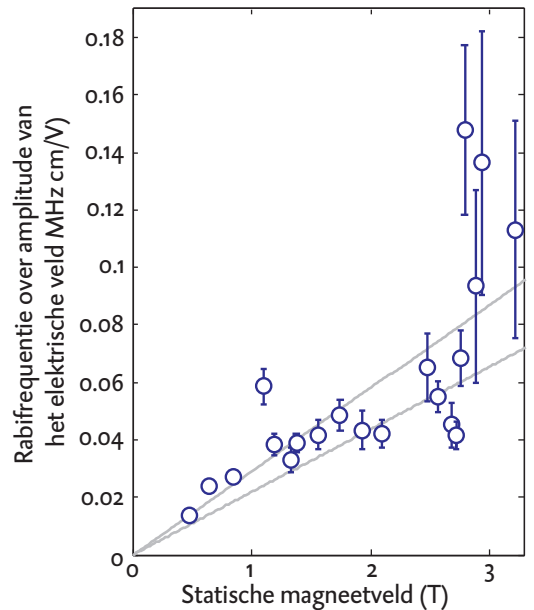
de spin omgedraaid en loopt er dus een stroom. Naast de resonantie blijft het systeem in spinblokkade en loopt er geen stroom. De positie van de resonantiepiek verandert zoals verwacht met de frequentie van het elektrisch wisselveld.

Door de amplitude en/of de tijdsduur van het elektrisch veld te veranderen kunnen we bepalen over welke hoek de spin draait. In figuur 3 is te zien dat de spintoestand periodiek ronddraait als functie van de tijdsduur waarover het elektrisch veld aanstaat (de pulslengte). Voor een grotere amplitude van het elektrisch veld wordt de frequentie van de oscillatie hoger, zoals verwacht voor zogeheten Rabi-oscillaties. Hiermee is aangetoond dat we de quantummechanische toestand van de spin met behulp van een elektrisch veld kunnen aansturen [4].

Zoals gezegd kan in principe een spin met elektrische velden rondgedraaid worden door de spin-baanwisselwerking (zie kader). Om te verifiëren dat dit inderdaad het mechanisme is dat verantwoordelijk is voor de spinrotaties in het experiment, gebruiken we een resultaat van de theorie van de spin-baaninteractie in een quantumdot. Deze voorspelt namelijk dat het effectieve wisselende magneteveld dat



**Figuur 3** Stroom door de twee quantumdots als functie van de pulslengte van het elektrisch veld. De oscillatie toont aan dat we via de pulslengte kunnen controleren over welke hoek de spin draait. De twee oscillaties zijn gemeten bij verschillende amplitudes van het elektrisch veld. Hoe sterker het elektrisch veld en daarmee het effectieve magnetisch veld, hoe sneller de oscillatie.  $V_{mw}$  geeft de geschatte amplitude van de wisselspanning op de elektrode weer.



**Figuur 4** De frequentie van de Rabi-oscillaties gedeeld door de amplitude van het elektrische veld, als functie van het statische magnetveld. Wanneer het elektrische veld met de spin koppelt via de spin-baanwisselwerking, is de theoretische voorspelling dat de frequentie van de Rabi-oscillatie evenredig moet zijn aan het product van het statische magnetveld en de amplitude van het elektrische veld. Om de afhankelijkheid van het statische magnetveld afzonderlijk te laten zien, delen we de gemeten Rabifrequentie door de geschatte amplitude van het elektrische veld.

## Spin-baanwisselwerking

Spin-baanwisselwerking is een relativistisch effect dat bekend is uit de atoomfysica en bijvoorbeeld mede verantwoordelijk is voor de fijnstructuur van het waterstofspectrum. Het elektron in een waterstofatoom beweegt in het elektrische veld van het proton in de kern. Als we vanuit het ruststelsel van het elektron kijken, voelt het elektron niet alleen een elektrisch veld maar ook een magnetisch veld  $\vec{B} = -\vec{p} \times \vec{E} / m_e c^2$  met  $\vec{B}$  het magnetisch veld in het ruststelsel,  $\vec{p}$  de impuls van het elektron,  $\vec{E}$  het elektrische veld,  $m_e$  de elektronmassa en  $c$  de lichtsnelheid. In een kristalrooster is de situatie anders, omdat daar het elektrische veld van alle kernen komt. Hier is de symmetrie van het rooster van belang voor de vorm van de spin-baanwisselwerking, omdat deze de symmetrie van het elektrische veld bepaalt. De inversie-asymmetrie in GaAs leidt tot de zogeheten Dresselhaus-spin-baanwisselwerking. Daarnaast is er ook nog een extra effect omdat de quantumdot wordt gevormd in een tweedimensionaal elektrongas, wat op zijn beurt gevormd wordt door elektrische velden loodrecht op de GaAs/AlGaAs-heterostructuur. Dit leidt tot de zogenaamde Rashba-spin-baanwisselwerking:  $H^R = \alpha(p_x s_y - p_y s_x)$  waarbij  $s_i$  de respectievelijke componenten zijn van de spin. De Dresselhausinteractie heeft dan de volgende vorm  $H^D = \beta(-p_x s_x + p_y s_y)$  ( $x$  ligt vast langs de [100] kristalassen van GaAs). Voor beide bijdragen is aan de vorm van de Hamiltoniaan te zien dat de impuls van het elektron aan de spin is gekoppeld.

de spin voelt, lineair toeneemt met het statische magnetveld [1]. Daarom hebben we Rabi-oscillaties gemeten bij diverse waarden van het statische magnetveld (zie figuur 4). Een stijgende trend is duidelijk zichtbaar, in overeenstemming met de theoretische voorspelling (de aangegeven meetfout komt voornamelijk door de onzekerheid in de schatting van het elektrische veld). Als extra controle hebben we uitgerekend dat de gemeten Rabifrequenties inderdaad realistisch zijn, gegeven de sterkte van de spin-baan-

wisselwerking in GaAs en de geschatte amplitude van het elektrische veld. In combinatie met een eerder experiment waarbij de evolutie van twee-elektrontoestanden was gecontroleerd door middel van elektrische velden [5], is hiermee aangetoond dat volledig elektrische controle van spin-qubits mogelijk is. In de toekomst zou het met elektrische velden ook mogelijk moeten zijn meerdere spins onafhankelijk van elkaar aan te sturen, wat nodig is om een quantumcomputer te kunnen bouwen.

## Referenties

- 1 V. N. Golovach, M. Borhani and D. Loss, *Electric Dipole Induced Spin Resonance in Quantum Dots*, *Phys. Rev. B* **74** (2006) 165319
- 2 F. H. L. Koppens, C. Buizert, K. J. Tiel-rooij, I. T. Vink, K. C. Nowack, T. Meunier, L. P. Kouwenhoven and L. M. K. Vandersypen, *Driven coherent oscillations of a single electron spin in a quantum dot*, *Nature* **442** (2006), 766-771
- 3 F. H. L. Koppens, L. P. Kouwenhoven and L. M. K. Vandersypen, *Grip op de spin van één enkel elektron*, *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* (Jan. 2007), 12
- 4 K. C. Nowack, F. H. L. Koppens, Yu. V. Nazarov and L. M. K. Vandersypen, *Coherent control of a single electron spin with electric field*, *Science* **318** (2007), 1430-1433
- 5 J. R. Petta, A. C. Johnson, J. M. Taylor, E. A. Laird, A. Yacoby, M. D. Lukin, C. M. Marcus, M. P. Hanson and A. C. Gossard, *Coherent manipulation of coupled electron spins in semiconductor quantum dots*, *Science* (2005), 2180-184