

Uitlezen van een enkele elektronspin in silicium

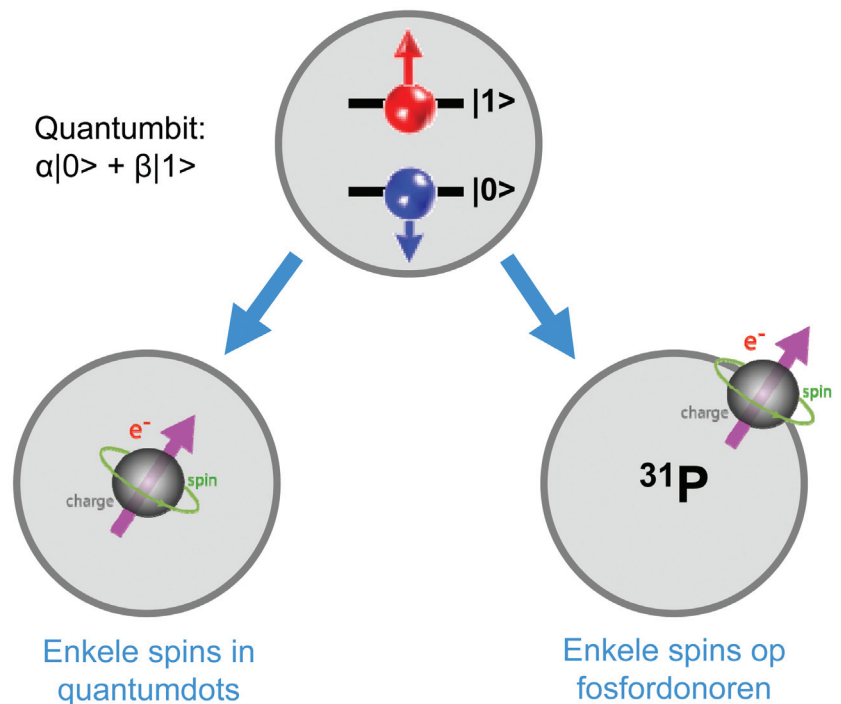
Het hart van computers bestaat uit transistoren van silicium. De enen en nullen daarin komen voort uit de lading van miljarden elektronen. Computers kunnen in de toekomst nog krachtiger worden als ze kunnen rekenen met quantummechanische superposities van enen en nullen. Spin, het archetypische voorbeeld van een twee-niveau quantumstelsel, kan dienen als basistoestand van een qubit. Het kunnen uitlezen van een enkele elektronspin is een noodzakelijke stap in de ontwikkeling van de quantumcomputer. Dat is nu voor het eerst gerealiseerd in een siliciumschakeling waarvan de fabricage eenvoudig verenigbaar is in de huidige chipindustrie.

Floris Zwanenburg en Andrea Morello

360

Si spinquantumcomputers

De afmetingen van siliciumtransistoren in microelektronica nemen steeds verder af. Veel chips worden nu gemaakt met 32nm-processen, en daar spelen quantumeffecten al een rol. Dit creëert aan de ene kant een enorme uitdaging voor de verdere miniaturisatie van microprocessors, maar schept ook mogelijkheden voor radicale uitvindingen zoals een quantumcomputer. Een quantumcomputer zou in staat zijn bepaalde berekeningen uit te voeren die voor een klassieke computer onmogelijk zijn. Dat doet hij door te rekenen met de quantummechanische superpositie $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, die de toestand van een individuele qubit beschrijft. Een enkele spin kan gebruikt worden als bouwsteen van zo'n quantumcomputer, waarbij de spin-omhoog en spin-omlaag toestanden de logische $|0\rangle$ en $|1\rangle$ vormen van het qubit, zie figuur 1. In 1998 zijn er twee voorstellen gepubliceerd voor een praktische uitvoering van een spinquantumcomputer: Loss en DiVincenzo stelden voor om individuele spins op geïsoleerde eilandjes in een halfgeleiderstructuur op te sluiten [1],



Figuur 1 De toestand van een qubit beschrijven we als een quantummechanische superpositie van $|0\rangle$ en $|1\rangle$: $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$. De spin van een enkel elektron is een natuurlijk twee-niveausysteem dat kan dienen als qubit, bijvoorbeeld geïsoleerd op een quantumdot of op een fosforatoom.

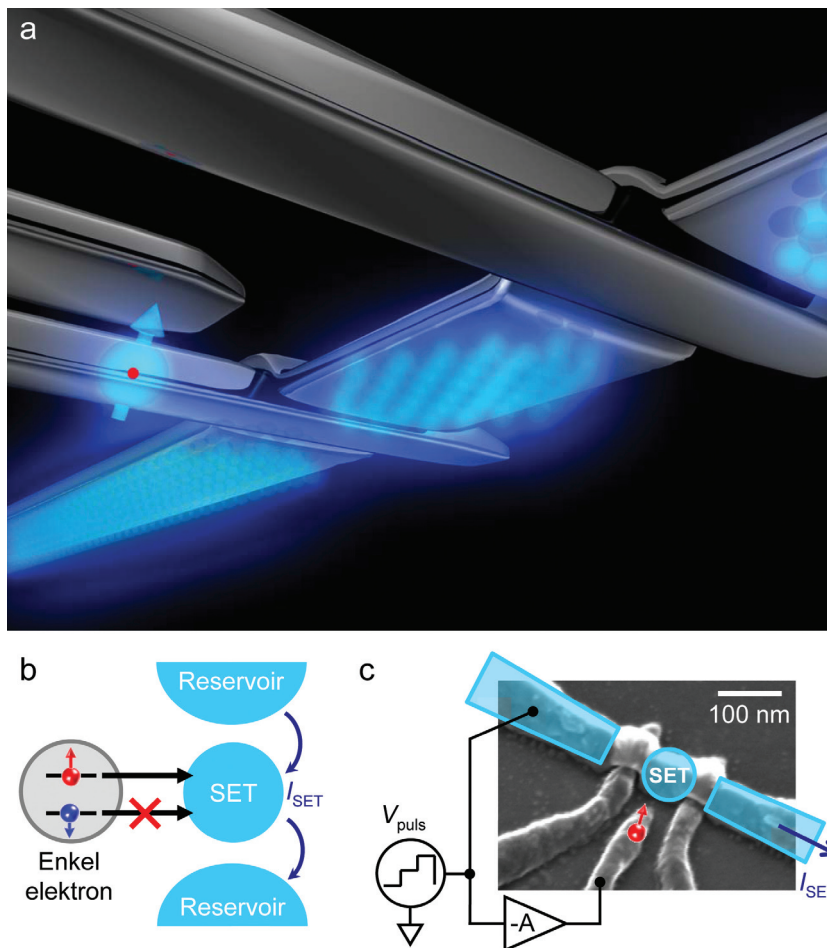
en tegelijkertijd kwam Kane met de idee om daarvoor een geïsoleerde spin aan een enkel fosforatoom in silicium te gebruiken [2].

Om daadwerkelijk quantumoperaties uit te voeren op spinquantumbits is een lange coherentietijd cruciaal. Decoherentie is het microscopische proces waarbij een quantumsuperpositie vervalt naar een klassiek mengsel van toestanden. Juist in silicium verwacht men dat de spincoherentietijd zeer lang is, omdat de veroorzakers van decoherentie erg zwak zijn. Eén daarvan, de hyperfijninteractie tussen kernspins en elektronspins, kan zelfs geëlimineerd worden door het siliciumkristal isotopisch puur te maken. Men verwijdert dan de vijf procent ^{29}Si die aanwezig is in natuurlijk silicium, waardoor alleen de kernspinvrije isotoop ^{28}Si overblijft. De controle over individuele elektronen in Si is echter lastig, en heeft tot nu toe de observatie en manipulatie van een enkele spin belemmerd.

Spinafhankelijk tunnelen dankzij de Zeemanenergie

In dit artikel beschrijven we de eerste experimentele demonstratie van de uitlezing van een individuele elektronspin in silicium. Het kunnen uitlezen van een enkele elektronspin is een cruciale stap op weg naar de spinquantumcomputer. Tot nu toe was dat alleen nog gelukt in GaAs-structuren, als eerste aan de TU Delft in 2004 [3]. De spinuitlezing werd daar bewerkstelligd door spinafhankelijk tunnelen, waarbij het elektron zich wel of niet kon verplaatsen afhankelijk van de spintoestand. Een meting van de lading in de structuur stelde vervolgens vast of het elektron was verplaatst en onthulde zo de spin.

In Sydney hebben wij iets vergelijkbaars gedaan in een nanostructuur die bestaat uit een minuscule siliciumtransistor, zie figuur 2. De transistor heeft precies dezelfde opbouw als MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors), waarbij een spanning op een metallische gate-elektrode een elektronenlaag induceert aan het grensvlak van Si en SiO_2 , zie figuur 2a. Deze nanoMOSFET kan dus gemaakt worden met de huidige standaardtechnologie voor micro-elektronica. Wij passen een nieuwe benadering toe op de ladingsdetectie, waarbij de detector niet alleen een



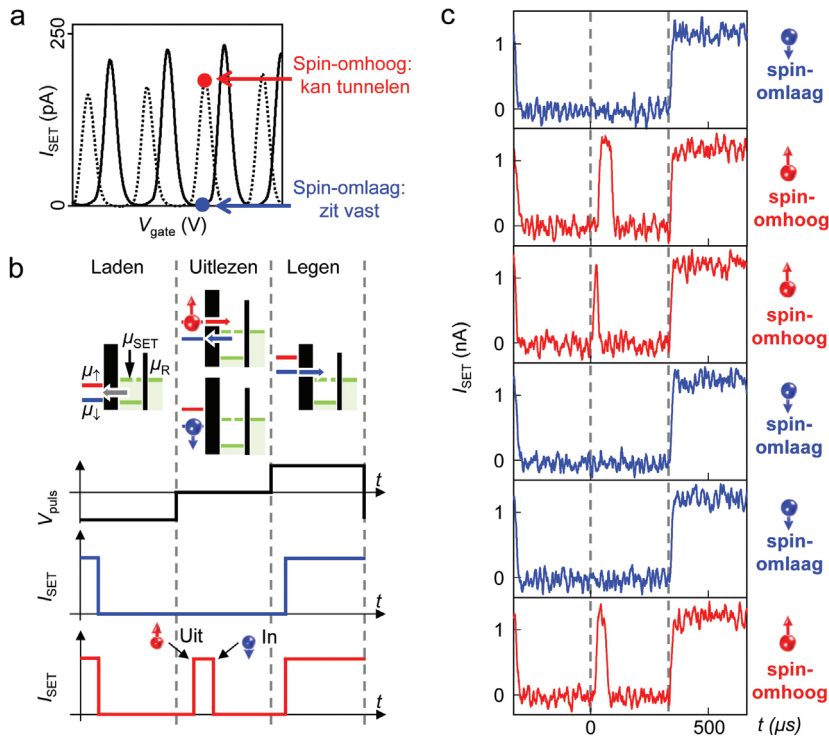
Figuur 2 Spinafhankelijk tunnelen dankzij de Zeemansplijting. a) Artistieke weergave van een fosforatoom naast een Silicium nano-MOSFET. Aluminium gate-elektrodes liggen bovenop een siliciumchip die afgedekt is met siliciumoxide. Een positieve spanning op de gates induceert een laag elektronen aan het Si/SiO₂ grensvlak (lichtblauw). We willen de spin uitlezen van een elektron gebonden aan een geïmplanteerd fosforatoom (rode stip). b) Schematische weergave van de configuratie voor het spinafhankelijk tunnelen: we meten de stroom I_{SET} door de MOSFET die hier werkt als een Single-Electron Transistor (SET). Alleen een elektron met spinomhoog kan tunnelen naar de SET, terwijl een elektron met spin-omlaag vastzit. c) Elektronenmicroscopieplaatje van de schakeling. Gelijkspanningen en spanningpulsjes worden aangebracht op de aluminium gate-elektrodes. Blauwe vlakken stellen de elektronen onder het SiO₂ voor die door de gate-elektrodes worden gecreëerd. De fosforatomen zijn ongeveer 10-20 nm onder het oxide geïmplanteerd (rode pijl). Illustratie gemaakt door William Algar-Chuklin, College of Fine Arts, UNSW.

elektrostatische koppeling maar ook een tunnelkoppeling met het elektron heeft – het elektron dat we willen uitlezen kan dus tunnelen van en naar de detector. Daardoor vormt het geheel een zeer compacte structuur, en produceert een groot stroomsignaal wanneer het elektron van en naar de detector tunnelt [4].

Donorimplantatie naast een silicium nano-MOSFET

In ons experiment functioneert de silicium nano-MOSFET als ladingsdetector, waarbij we hem instellen als enkele-elektronentransistor (Single-Electron Transistor, SET). Een SET is een niet-lineaire nano-elektronische

schakeling die bestaat uit een klein eiland en twee elektronenreservoirs, zie figuur 2. Door de Coulombinteractie kan er alleen een stroom door de schakeling lopen wanneer de elektrochemische potentiaal van het SET-eiland μ_{SET} specifieke waarden heeft, wat tot uiting komt in een karakteristiek patroon van scherpe stroompieken als functie van de gate-spanning V_{gate} , zie figuur 3a. Naast de SET hebben we in een klein oppervlak van $90 \cdot 90 \text{ nm}^2$ enkele fosforatomen geïmplanteerd, die we individueel kunnen ioniseren. Fosforatomen in silicium gedragen zich als waterstofatomen in vacuüm. Dat wil zeggen, ze kunnen een enkel elektron aan zich binden. We brengen



Figuur 3 Uitlezen van een enkele elektronspin. a) De stroom door de SET vertoont Coulombpieken als functie van de gatespanning V_{gate} . We stellen de gates zodanig in dat een elektron met spin-omlaag vastzit en resulteert in $I_{\text{SET}}=0$, terwijl een elektron met spin-omhoog kan tunnelen en leidt tot een eindige I_{SET} . b) Pulsschema voor enkele spinuitlezing en bijbehorende respons van de SET. De schematische weergave bovenaan toont de positie van de elektrochemische potentialen van het elektron ($\mu_{\text{L,R}}$), van de SET (μ_{SET}) en van een reservoir (μ_{R}). In de laad-fase tunnelt een elektron in een onbekende spintoestand van de SET naar de donor, aangezien $\mu_{\text{SET}} > \mu_{\text{L}}, \mu_{\text{R}}$. In de uitlees-stap is $\mu_{\text{L}} < \mu_{\text{SET}} < \mu_{\text{R}}$, waardoor een spin-omlaag elektron vastzit op de donor, en dus de stroom nul blijft. Een spin-omhoog elektron kan echter wel op het SET-eiland tunnelen. De stroompuls in I_{SET} tijdens de uitleesfase is het verwachte signaal van een spin-omhoog elektron. c) In het gebied waar voldaan wordt aan de voorwaarde $\mu_{\text{L}} < \mu_{\text{SET}} < \mu_{\text{R}}$ voeren we de meting van de spintoestand van een enkel elektron uit. We herhalen de driestapspulsssequentie meerdere malen terwijl we I_{SET} meten. Iedere keer laden we een elektron met willekeurige spin, en bepalen vervolgens of de oriëntatie daarvan spin-omhoog of spin-omlaag is.

spanningspulsen aan op twee gates: de ene gate controleert het elektron dat gebonden is aan de donor, maar beïnvloedt tegelijkertijd de SET. Die verandering maken we ongedaan met de andere gate. Door deze gecompenseerde spanningspulsen hebben we volledige elektrostatische controle over zowel de SET als de donor. Wanneer nu een elektron tunnelt van een donor naar het SET-eiland, verandert de respons van de SET van nul naar het maximum van een Coulombpiek. Ons doel is de spin van het donorelektron uit te lezen door het meten van deze grote stroomverandering. Het tunnelen van donor naar eiland maken we spinafhankelijk door een extern magnetisch veld aan te leggen. De Zeemanplitsing zorgt er dan voor dat de elektrochemische potentiaal van de spin-omhoog toestand (μ_{\uparrow}) hoger is dan die van de spin-omlaag toestand (μ_{\downarrow}). De Zeemanenergie moet groter zijn dan de thermische energie, die een spreiding van energie van de elektrontoestanden op het SET-eiland veroorzaakt. Daartoe voeren we dit experiment uit bij magnetisch velden groter dan 1 tesla, en bij een extreem lage elektronentemperatuur van ongeveer 200 mK.

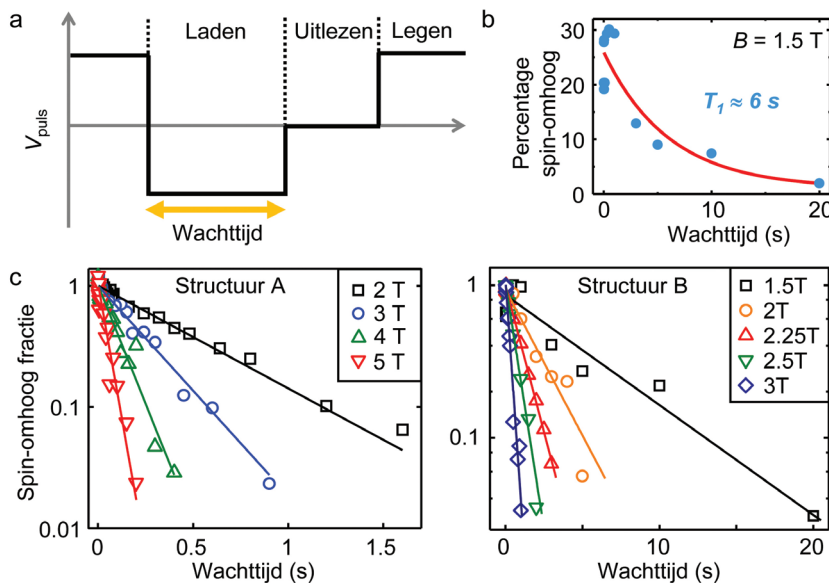
Uitlezing van een enkele elektronspin

Om de spin uit te kunnen lezen stellen we de spanningen op de gate elektrodes zodanig in dat de stroom door de SET, I_{SET} , nul is wanneer het elektron op de donor verblijft, terwijl $I_{\text{SET}} \neq 0$ wanneer de donor geïoniseerd is. Het uitleesprotocol bestaat uit een cyclus van drie stappen, afgebeeld in figuur 3b.

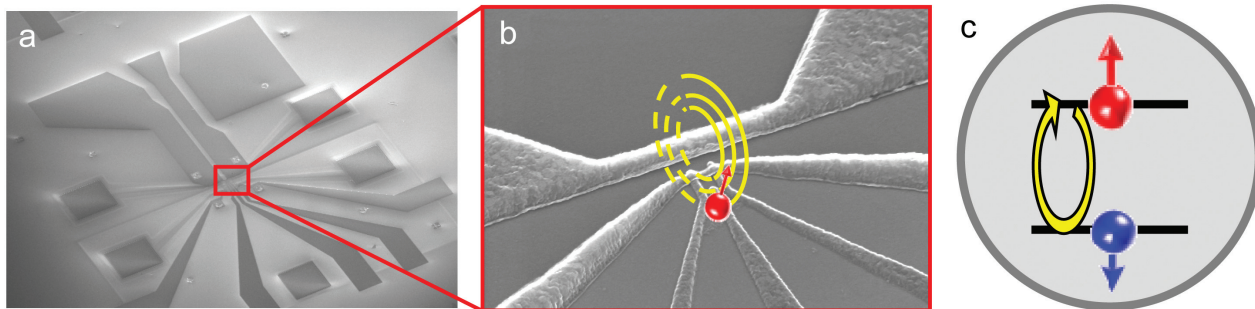
(i) Een laad-stap, waarin een elektron in een onbekende spintoestand tunnelt van de SET naar de donor. Het laden kenmerkt zich doordat de stroom naar nul springt.

(ii) Een uitlees-stap, waarin een spin-omlaag elektron vast blijft zitten op de donor, en dus de stroom nul blijft. Een spin-omhoog elektron kan echter wel op het SET-eiland tunnelen, waardoor de stroom zijn maximale waarde aanneemt. Daarna tunnelt een ander elektron (met spin-omlaag) terug naar de donor en is de stroom weer geblokkeerd. Het signaal voor een spin-omhoog toestand is dus een enkele stroompuls aan het begin van de uitleesfase.

(iii) Een leeg-stap, waarin de donor



Figuur 4 Extreem lange spinvervaltijden. a) Pulsschema voor het meten van de spinvervaltijd T_1 , waarin de wachttijd gevarieerd wordt. b) Waargenomen percentage spin-omhoog als functie van de wachttijd. De spinvervaltijd is hier zes seconden. c) Exponentiële afnames van de genormeerde spin-omhoogfractie in twee structuren bij verschillende magnetevelden.



Figuur 5 Toekomstig experiment: enkele elektronspinresonantie. a) Elektronenmicroscopoplaatje van een nieuwe structuur waaraan we een microgolflijn hebben toegevoegd. b) Uitvergroot beeld van a. Een wisselstroom door de microgolflijn wekt een oscillerend magneteveld op. c) Als het magneteveld de juiste frequentie heeft zal de spin gaan draaien.

geïoniseerd wordt om ervoor te zorgen dat er een nieuw elektron met een willekeurige spinoriëntatie kan worden geladen en een nieuwe cyclus start. Op het moment van legen neemt de stroom zijn maximale waarde weer aan.

In figuur 3c staan zes voorbeelden van een meting. Iedere keer laden we één enkel elektron, en meten zijn spin in de uitleesfase: spin-omhoog in het geval van een stroompuls, en spin-omlaag als de stroom nul blijft. Dit experiment is de eerste realisatie van het uitlezen van een enkele elektronspin in silicium.

Extreem lange spinvervaltijden

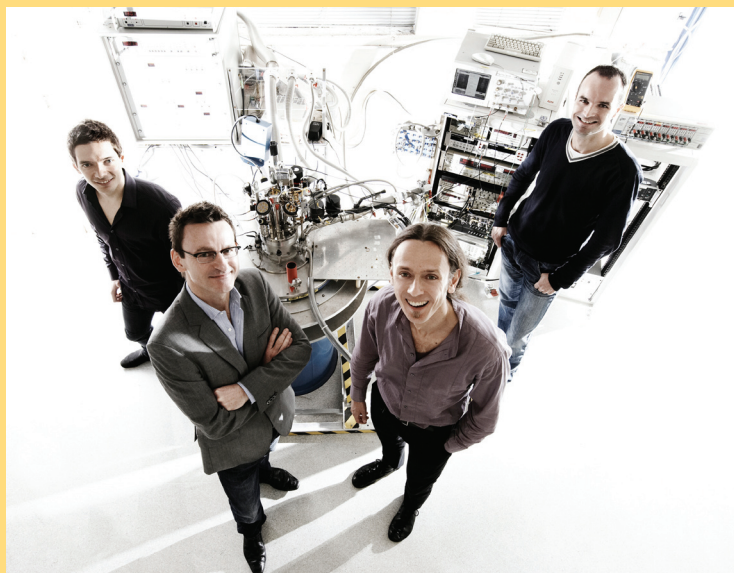
Door het uitleesprotocol vele malen te herhalen kunnen we nauwkeurig bepalen welk percentage van alle geladen elektronen spin-omhoog heeft. Wanneer we de duur van de laad-stap steeds langer maken, neemt het gemeten percentage spin-omhoog exponentieel af, zie figuur 4a en 4b. De aangeslagen toestand $|\uparrow\rangle$ kan namelijk vervallen naar de grondtoestand $|\downarrow\rangle$ vóór de uitleesfase. De gemeten spinvervaltijd T_1 van zes seconden is de langste ooit waargenomen voor een enkele spin in een vaste-stof materiaal. We hebben de spinvervaltijd gemeten in twee structuren bij verschillende magnetevelden, zie figuur 4c en 4d. De manier waarop T_1 in dit experiment afneemt als functie van het magneteveld hebben we in detail in kaart gebracht. Het vertoonde gedrag en de gemeten waarden komen overeen met theoretische voorspellingen [5], specifiek voor donoren in silicium.

Toekomstig experiment: enkele elektronspinresonantie

Nu we de techniek hebben ontwikkeld om de spin van een enkel elektron in silicium uit te kunnen lezen,

willen we dat combineren met elektronspinresonantie, dat wil zeggen het roteren van de spin door middel van een oscillerend magnetisch veld. In onze nieuwste structuren hebben we een microgolflijn toegevoegd, die een magnetisch wisselveld produceert dat loodrecht op de elektronspin

staat, zie figuur 5a en b. Wanneer de frequentie van het wisselveld gelijk is aan de frequentie van de Zeemansplitsing begint de spin van het elektron te draaien (de zogenaamde Rabi-oscillatie). Door onze uitleesteknik, zoals hierboven beschreven, toe te passen leren we vervolgens of we de spin ge-



Het spin-uitleesteam aan UNSW in Sydney. v.l.n.r.: Jarryd Pla, Andrew Dzurak, Andrea Morello en Floris Zwanenburg ©UNSW.

Floris Zwanenburg (1976) studeerde af in de technische natuurkunde aan de TU Delft onder leiding van Hans Mooij. Na een onderzoeksstage op Harvard keerde hij terug naar Delft voor een promotie op halfgeleidende nanodraden bij Leo Kouwenhoven. Sinds 2008 werkt hij als postdoc aan de University of New South Wales in Sydney, Australië, waar hij enkele elektronspins in silicium nanostructuren bestudeert.

floriszwanenburg@gmail.com

Andrea Morello (1972) studeerde af in Turijn (Italië) als elektrotechnisch ingenieur in 1998, na een stage bij het Max-Planck Instituut in Grenoble (Frankrijk). In 1999 begon hij zijn promotie in het Kamerlingh Onnes Laboratorium in Leiden, onder leiding van Jos de Jongh. Hij promoveerde cum laude in de natuurkunde in 2004 met een onderzoek over de quantumspin-fysica van moleculaire magneten. Van 2004 tot 2006 was hij postdoc bij the University of British Columbia in Vancouver (Canada) en van 2006 tot 2008 bij de University of New South Wales in Sydney (Australië). Sinds 2008 is hij Universitair Docent op UNSW en projectleider in het Centre for Quantum Computer Technology.

a.morello@unsw.edu.au

roteerd hebben. In het komende jaar zullen we geavanceerde vervolggexperimenten uitvoeren zoals gedreven coherente oscillaties en quantumoperaties. Daarmee zetten we een kritieke stap om het volledige potentieel van een silicium quantumcomputer te ontsluiten.

Referenties

- 1 D. Loss en D. P. DiVincenzo, *Quantum computation with quantum dots*. *Phys. Rev. A* **57**, 120-126 (1998).
- 2 B. E. Kane, *A silicon-based nuclear spin quantum computer*. *Nature* **393**, 133-137 (1998).
- 3 J. M. Elzerman et al., *Single-shot read-out of an individual electron spin in a quantum dot*. *Nature* **430**, 431-435 (2004).
- 4 A. Morello et al., *Single-shot read-out of an electron spin in silicon*. *Nature* **467**, 687-691 (2010).
- 5 H. Hasegawa, *Spin-lattice relaxation of shallow donor states in Ge and Si through a direct phonon process*. *Phys. Rev.* **118**, 1523-1534 (1960).