

Quantumoptica met spins in halfgeleiders

Om quantuminformatieverwerking te realiseren hebben we systemen nodig die kunnen worden opgeschaald naar een grotere complexiteit (meerdere qubits). Dit vraagt om vaste-stofdevices die compatibel zijn met nanofabricage, maar waarin de quantum-vrijheidsgraden zeer homogeen zijn. Ook moet het mogelijk zijn een meting uit te voeren die echt een projectie op een quantumtoestand realiseert. Hiervoor zijn quantum-optische meettechnieken een sterke kandidaat. Optische manipulatie van ensembles van donor-elektronspins in galliumarseen voldoet aan deze eisen. Juist het gebruik van een ensemble van donor-elektronen kan een grotere betrouwbaarheid geven voor de overdracht van quantuminformatie tussen fotonen en spins. Sander Onur en Caspar van der Wal

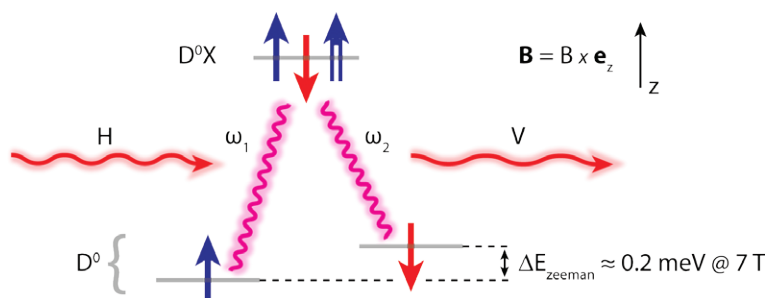
231

Het galliumarseen dat wij gebruiken is extreem zuiver en is als een éénkristal gegroeid. Op de micronschaal is het materiaal vervolgens bewerkt tot optische golfgeleiders. Om de optische polarisaties zuiver te houden, zijn de wanden hiervan gecontroleerd op de nanoschaal. Aan het materiaal is een zeer kleine hoeveelheid donoratomen toegevoegd (silicium), die zonder roosterverstoring in het éénkristal zitten. De siliciumatomen, met vier valentie-elektronen, nemen in het kristalrooster de plaats in van een galliumatoom dat drie valentie-elektronen heeft. De extra elektronen bezetten toestanden die gelokaliseerd zijn rond de positief geladen siliciumatomen, waaraan ze zijn gebonden door een Coulomb-aantrekkingskracht van ongeveer 6 meV. Omdat het siliciumatoom hier dienst doet als elektrondonor en de combinatie van gebonden elektron en positief geladen atoom elektrisch neutraal is, wordt dit systeem vaak aangeduid met de afkorting D^0 . Doordat de elektronen losjes gebonden zijn, strekt de elektronenwolk zich uit over vele roosterpunten en vormt deze

een bol met een straal van ongeveer 10 nm. In ons materiaal is er een lage concentratie silicium ($3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) zodat de afstand tussen siliciumatomen ongeveer 200 nm is. Hierdoor zijn de elektronen van elkaar geïsoleerd en lijkt het systeem veel op een gas van waterstofachtige atomen, opgesloten in de vaste stof. De spintoestand van deze elektronen is robuust omdat er geen elektrische dipoolovergang tussen de twee spintoestanden mogelijk is. Bovendien beschermt lokalisatie de

systemen voor elektron-fooninteractie. De levensduur van de spintoestand met hogere energie, de spinrelaxatietijd, bedraagt ongeveer 1 ms.

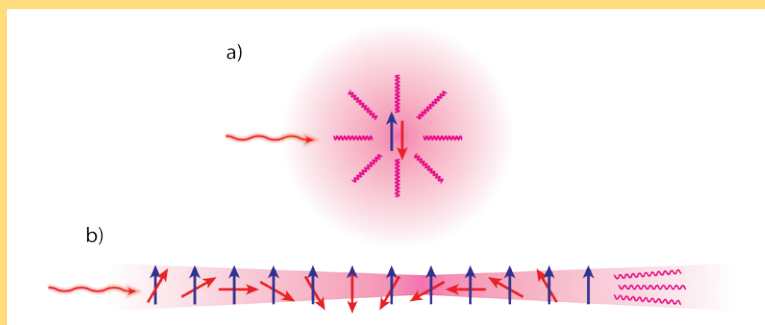
Naast het elektron dat met het toevoegen van een siliciumatoom wordt geïntroduceerd, kan er een tweede elektron optisch geëxciteerd worden vanuit de valentieband naar de geleidingsband van het materiaal. Dit aangeslagen elektron laat een gat achter in de valentieband, zo'n elektron-gatpaar heet een exciton. Wanneer deze excita-



Figuur 1 De relevante energieniveaus van siliciumdonoren in galliumarseen in een magnetisch veld. D^0 representeert de twee elektronspintoestanden, die door de aanwezigheid van een magnetisch veld opgesplitst zijn. D^0X representeert de triontoestand, met twee elektronen en één gat. De spin van het gat bedraagt $3/2$, deze toestand is dus ook opgesplitst in het magnetisch veld. Deze opsplitsing is echter niet weergegeven in het diagram omdat wij slechts één (de laagstgelegen) toestand van dit complex gebruiken. De optische overgangen zijn gevoelig voor respectievelijk horizontaal (H) en verticaal (V) gepolariseerd licht.

Sterke licht-materiekoppeling in homogene ensembles

De koppeling tussen licht en een deeltje met dipoolmoment μ wordt gegeven door het product van dipoolmoment en elektrische veldsterkte van het licht, E . De mogelijkheden om deze koppeling te versterken zijn hierdoor goed te overzien. Aan de ene kant is het mogelijk de lokale elektrische veldsterkte te verhogen, dit heet het Purcell-effect. Voor significant sterkere koppeling vereist dit de fabricage van een resonator met een hoge kwaliteitsfactor waarin de dipool geplaatst moet worden. Anderzijds is het mogelijk om het dipoolmoment te vergroten. Voor een enkel deeltje wordt dit moment grofweg bepaald door het product van de lading en de afmeting van het deeltje. Dit verklaart de toegenomen interesse om in de optica te werken met quantumdots of Rydbergatomen, waar de golf functie van het elektron zich over grote afstand uitspreidt. Een laatste alternatief is om de enkele dipool te vervangen door meerdere waarbij deze dan staan in een langwerpige configuratie zoals getekend in figuur 2. Dit ensemble vergroot het effectieve dipoolmoment en versterkt zo de koppeling tussen licht en materie zonder dat hiervoor complexe fabricagetechnieken vereist zijn. Bovendien heeft het werken met het ensemble als voordeel dat er een voorkeursrichting voor absorptie en emissie is [2]. Doordat het voorspelbaar is in welke richting fotonemissie plaats zal vinden, is het eenvoudiger om dit uitgaande foton te detecteren. In een quantumnetwerk heeft dit tot gevolg dat er minder fotonen verloren gaan. Een elektronspिनexcitatie in een dergelijk ensemble wordt collectief gedragen als een spingolf, zoals in figuur 2b.



Figuur 2 Absorptie en emissie van licht door een enkele elektronspin vergeleken met een ensemble. a) Situatie voor een enkel elektronspin. b) Situatie voor een ensemble. Blauw zijn spins in de grondtoestand, rood in de geëxciteerde toestand. De enkele spin flipt na excitatie, in het ensemble wordt de excitatie collectief gedragen. De emissie bij verval van een dergelijke spingolf is langs de lange as van het ensemble gericht, wat detectie van dit foton eenvoudiger maakt.

tie met precies de juiste energie plaatsvindt dan zullen de twee elektronen en het gat niet vrij door het materiaal kunnen bewegen, maar ook door Coulomb-aantrekkingskracht in de buurt van het siliciumatoom blijven. Deze toestand van drie gebonden deeltjes wordt een trion genoemd (en wordt vaak aangeduid met D^0X , zie ook figuur 1). De sterke spin-baankoppeling in GaAs maakt dat de twee verschillende elektronspin-grondtoestanden beide aan dezelfde gebonden triontoestand kunnen koppelen via optische overgangen. Op deze manier wordt

het mogelijk om optisch te ‘schakelen’ tussen de twee elektronspintoestanden. Met meer geavanceerde, quantum-optische technieken is het ook mogelijk om een willekeurige superpositie van de elektronspintoestanden te creëren. Zo’n toestand is, in meest algemene zin, van de vorm: $\alpha|\uparrow\rangle + e^{i\phi}\beta|\downarrow\rangle$, waar α , β nader te bepalen getallen zijn en ϕ een te bepalen faseverschil is. Wanneer dit faseverschil nauwkeurig bekend is spreken we van een coherente elektronspintoestand. Een vervelende eigenschap van quantumtoestanden is echter dat onze ken-

nis over een dergelijk faseverschil vaak snel verloren gaat, dit noemen we decoherentie. Vooral bij systemen in de vaste stof is het een uitdaging om dit proces van decoherentie te bestrijden zodat we dit soort quantumtoestanden voor toepassingen kunnen gaan gebruiken.

De D^0 -systemen zijn optisch te manipuleren door creatie van een excitontoestand. Dan bestaat de totale ladingsconfiguratie uit twee elektronen en één gat. Deze drie deeltjes blijven door Coulombinteractie gelokaliseerd rond het silicium, aangeduid met de afkorting D^0X (figuur 1). De figuur laat zien hoe de gebonden excitontoestand de twee elektronspintoestanden verbindt via optische dipoolovergangen, die sterk zijn (spontane emissie in 1 ns) en goed voldoen aan fundamentele selectieregels voor polarisatie [1].

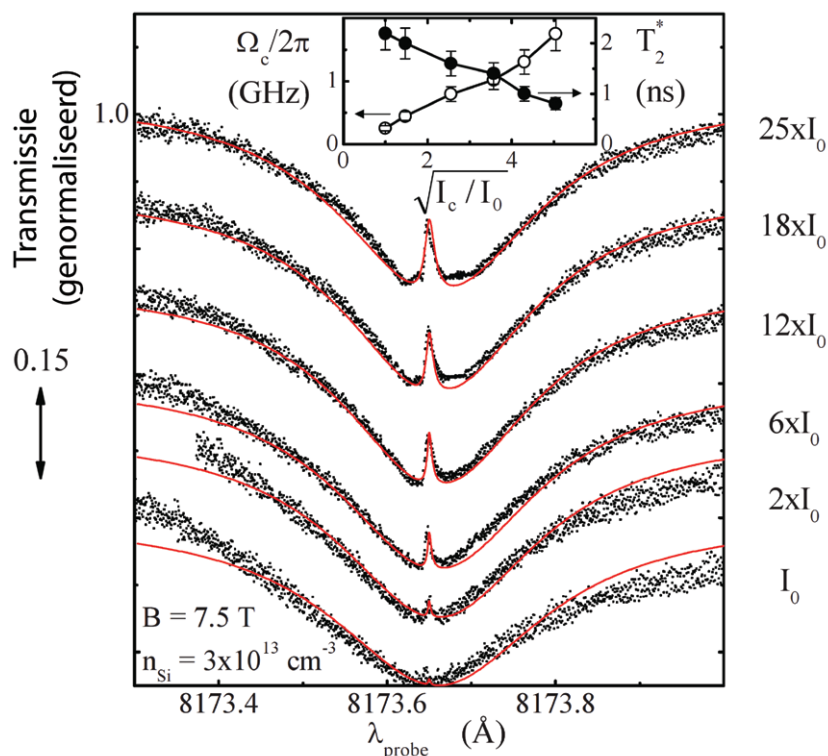
Sterkere koppeling met ensembles

Het bijzondere is nu dat wij niet de intentie hebben om een van deze D^0 -systemen te isoleren maar om een ensemble van deze systemen te gebruiken voor het creëren van een enkel foton met goed gedefinieerde energie én voor het opslaan van een coherente elektronspintoestand. Dankzij de sferische symmetrie en de afwezigheid van grote spanningen in het materiaal is er een hoge mate van homogeniteit binnen het ensemble van D^0 -systemen en is dit materiaal een goede kandidaat om sterke licht-materiekoppeling te verwezenlijken in een vastestofstelsel (zie kader).

Spincoherentie in silicium-gedoteerd galliumarseen

Een belangrijk resultaat van ons werk is te zien in figuur 3 [1]. In deze meting is de elektronspinoherentietijd bepaald door te kijken naar elektromagnetisch geïnduceerde transparantie van het medium. Bij dit experiment worden twee lasers met verschillende frequentie en polarisatie door het medium gestuurd (zie figuur 1). Door de ene laser veel sterker te maken dan de andere kan nu de transmissie van de zwakkere laser door het medium beïnvloed worden door de aanwezigheid van de sterkere laser. De specifieke energieniveaustructuur maakt dat het medium dienst doet als een bemiddelaar in de interactie tussen de twee lasers (dit is opmerkelijk omdat in-

teractie tussen verschillende optische velden normaalgesproken zeer zwak is). De oorsprong van dit effect ligt in quantuminterferentie van verschillende waarschijnlijkheidsamplitudes voor absorptie van een foton van de zwakke laser. Omdat het een quantuminterferentie-effect betreft, moet de coherentie van de twee laaggelegen toestanden, de elektronspinoherentie, mede bepalend zijn voor de sterkte van het effect. In figuur 3 zien we de toename in transparantie als een smalle piek in het midden van een absorptiedip. Deze piek wordt meer geprononceerd naarmate het vermogen van de sterkere laser wordt opgevoerd. Dit toont aan dat de transparantie daadwerkelijk door dit laserveld geïnduceerd wordt. Door de data te vergelijken met een analytische beschrijving volgens de optische Blochvergelijkingen kan de spincoherentietijd bepaald worden. De verkregen spincoherentietijd bedraagt 2 ns, waarbij bedacht moet worden dat dit in een 'rommelige' vaste-stofomgeving is waar decoherentie een belangrijke rol speelt. Dit resultaat toont aan dat het mogelijk is om in dit materiaal fotontoestanden over te dragen aan een coherente spinexcitatie. Om zo'n toestand op een later tijdstip uit te lezen of verder te bewerken is het van belang om de spincoherentietijd te verlengen. Om dit doel te bereiken is het noodzakelijk de belangrijkste bron van decoherentie te kennen en aan te pakken. De eerder genoemde fasefactor, die de coherentie van een spintoestand karakteriseert, wordt in het geval van een spinensemble beïnvloed door de relatieve precessiefrequentie van de spins. Dit is de frequentie waarmee de spins roteren om de richting van een magneetveld dat zij voelen. In galliumarseen wordt het magneetveld dat een elektronspin voelt, naast het extern aangelegde veld, nog beïnvloed door de



Figuur 3 Gemeten elektromagnetisch geïnduceerde transparantie in Si:GaAs. Langs de x-as varieert de golflengte van de (probe)laser over de resonantie van overgang 2 (uit figuur 1). De verschillende datasets, voor de duidelijkheid langs de y-as ten opzichte van elkaar verschoven, geven de transmissie weer van deze laser terwijl het vermogen van een tweede (controle)laser wordt opgevoerd met een factor 25 (labels rechts). De controlelaser is resonant met overgang 1. De sterkte van deze laser ligt rond de 1 GHz (Rabi-frequentie, zie inzet open cirkels). De spincoherentietijd wordt verkregen door een fit aan de optische Blochvergelijkingen en bedraagt voor deze meting ongeveer 1 à 2 ns (inzet, gevulde cirkels).

koppeling aan naburige kernspins. De kernspins zijn niet geordend en zorgen er zo voor dat elektronen verschillende velden voelen en dus verschillend precesseren. De fase-informatie gaat verloren door deze inhomogeniteit in precessiefrequentie.

Over deze wisselwerking tussen elektronspins en kernspins is veel bekend, dankzij het grote volume aan onderzoek naar gebonden spins in donorsystemen en quantumdots [3]. Er zijn aanwijzingen dat de fluctuaties door toedoen van de kernspins enigszins 'getemd' kunnen worden. Wij verkennen momenteel de mogelijkheid om via zogenaamde dynamische kernspinpolarisatie de fluctuaties van de kernspins te reduceren en zo de coherentietijd te verlengen. Een andere manier om dit doel te bereiken is om de overstap te maken naar een ander materiaal dat van nature minder kernspins bezit, zodat het genoemde mechanisme van decoherentie simpelweg minder sterk is. Beide opties worden in ons lab verkend en maken het,

naast de op zich interessante kennis over het mechanisme van decoherentie, hopelijk in de toekomst mogelijk om quantuminformatie te coderen in langlevende, robuuste elektronspintoestanden in de vaste stof.

Referenties

1. A. Maksym Sladkov et al., *Phys. Rev. B* **82**, 121308(R) (2010).
2. C. H. van der Wal et al., *Science* **301**, 196 (2003).
3. R. Hanson, L.P. Kouwenhoven, J.R. Petta, S. Tarucha en L.M.K. Vandersypen, *Rev. Mod. Phys.* **79**, 1217 (2007).

Sander Onur (1983) is afgestudeerd in theoretische natuurkunde aan de Rijksuniversiteit Groningen. Momenteel doet hij in Groningen als promovendus experimenteel onderzoek aan quantumoptica met spins in halfgeleiders.



a.r.onur@rug.nl

Caspar van der Wal (1971) studeerde aan de TU Delft en is daar ook promoveerd op onderzoek aan supergeleidende quantumbits. Na een postdoc op Harvard op het gebied van quantumoptica met atoomdampen is hij sinds 2003 verbonden aan het Zernike Institute for Advanced Materials van de Rijksuniversiteit Groningen. Zijn team doet onderzoek aan quantumcoherentie in vaste-stofdevices.

