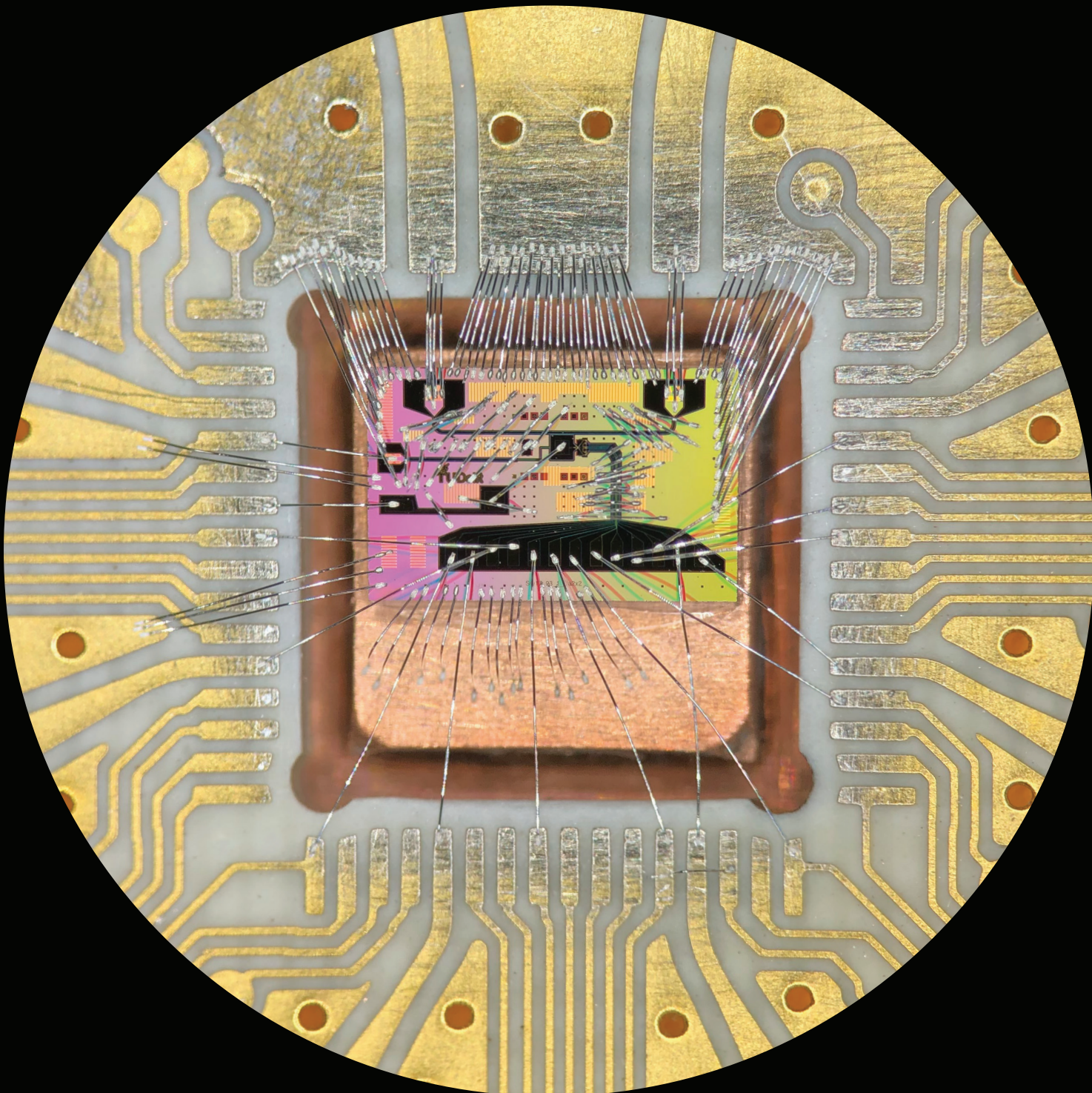


EERSTE PRIJS NTVN-PRIJSVRAAG

VAN ELEKTRONEN EN FOTONEN NAAR QUANTUMPROCESSOREN

HET MODERNE FOTO-ELEKTRISCH EFFECT OP EEN CHIP



Je hebt er ongetwijfeld van gehoord: het foto-elektrisch effect. Dit is het verschijnsel dat een elektron van een metaal los kan komen wanneer het een foton met voldoende energie absorbeert. Ruim een eeuw na de observatie van deze wisselwerking tussen licht en materie zijn we in staat om een enkel elektron op een chip te vangen en een coherente interactie aan te laten gaan met een enkel foton. Ik neem je mee in mijn promotieonderzoek, waar we dit dagelijks doen met als doel deze deeltjes te gebruiken als bouwstenen voor een toekomstige quantumprocessor gebaseerd op spinqubits.

Licht-materiewisselwerking

Het fenomeen dat een enkel lichtdeeltje (een foton) een enkel elektron kan losmaken van een metaal, mits dat lichtdeeltje meer energie bevat dan de bindingsenergie van het elektron (figuur 1a), komt tegenwoordig als heel vanzelfsprekend over. Ruim een eeuw geleden was dit echter een van de cruciale ontdekkingen die hebben geleid tot de ontwikkeling van de quantummechanica, de fysica op (sub)atomaire schaal. Voorheen werd gedacht dat licht alleen maar een elektromagnetische golf is die wordt beschreven door de Maxwellvergelijkingen. De observatie van het foto-elektrisch effect was belangrijk, want het bewijst dat licht ook uit discrete energiepakketjes (quanta) kan bestaan, zoals Albert Einstein verklaarde in 1905 (dat leverde hem een Nobelprijs op in 1921). Dit effect is weliswaar een van de eerste observaties van licht-materiewisselwerking op quantumschaal, maar berust niet op een coherente interactie tussen licht en materie. Het proces is immers onomkeerbaar en het foton gaat verloren na absorptie door het elektron.

In *holte-quantumelektrodynamica* wordt gepoogd deze coherente wisselwerking tussen licht en materie te krijgen op het niveau van enkele atomen [1]. Door licht te schijnen in de holte tussen twee gebogen spiegels weerkaatst het foton tussen de spiegels en blijft het binnen een klein volume gevangen (figuur 1b). Als gevolg kan de interactie tussen het foton en het atoom in de holte versterkt worden tot op het punt waarbij een enkel energiequantum coherent uitgewisseld kan worden tussen de holte en het atoom. Met andere woorden: wanneer het energieverval tussen de grondtoestand en een van de aangeslagen toestanden van het atoom gelijk is aan de fotonenergie in de holte, zal het atoom het foton absorberen. Hier

komt het verschil met het foto-elektrisch effect: het atoom zendt vervolgens het energiequantum uit als foton. Dit proces herhaalt zich totdat het energiequantum verloren gaat, door bijvoorbeeld imperfecte spiegels. Dit wordt doorgaans de sterke atoom-fotonkoppeling genoemd. In *circuit-quantumelektrodynamica* wordt de quantumfysica gereproduceerd op een chip zodat dit toegepast kan worden in een toekomstige quantumprocessor (figuur 1c). In plaats van een holte met spiegels komt een elektrische LC-resonantiekering en wordt een quantumbit (qubit) gebruikt [2]. Dit is een door de mens ontworpen nanostructuur met idealiter twee verschillende energietoestanden. In mijn promotieonderzoek wordt de spin van een elektron in een quantumdot gebruikt als qubit.

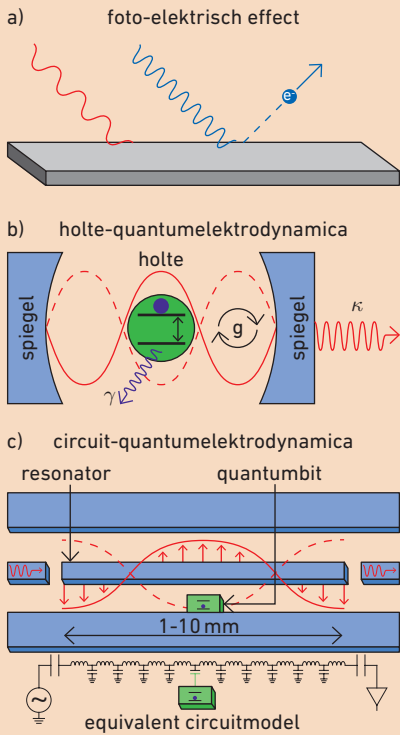
Halfgeleiderquantumdot en supergeleidende resonator

Dankzij technologische vooruitgangen in de nanofabricage kunnen we tegenwoordig enkele elektronen vangen en manipuleren op een chip (figuur 2a). Het substraat bestaat uit de halfgeleiders silicium/silicium-germanium, met bovenop metallische elektroden die geïsoleerd zijn met een laag diëlektricum ertussen (figuur 2b). Een positief voltage op de elektroden trekt elektronen aan in de siliciumlaag. Met de juiste combinatie van voltages creëren we eilandjes van elektronen die we quantumdots noemen. Deze nanostructuren kunnen beschouwd worden als moderne transistoren, maar dan op het niveau van enkele elektronen! Door de voltages te variëren kunnen we een exact aantal elektronen in een quantumdot plaatsen. Onze chip bevat een dubbele quantumdot, twee quantumdots naast elkaar waarbij elektronen van de ene naar de andere dot kunnen ‘springen’ (tunnellen).

Links: foto van de halfgeleider-supergeleiderquantumchip die elektrisch verbonden is aan een printplaat met aluminium draden. De kleuren op de chip komen grotendeels door interferentie van licht op de supergeleidende laag met gaten.

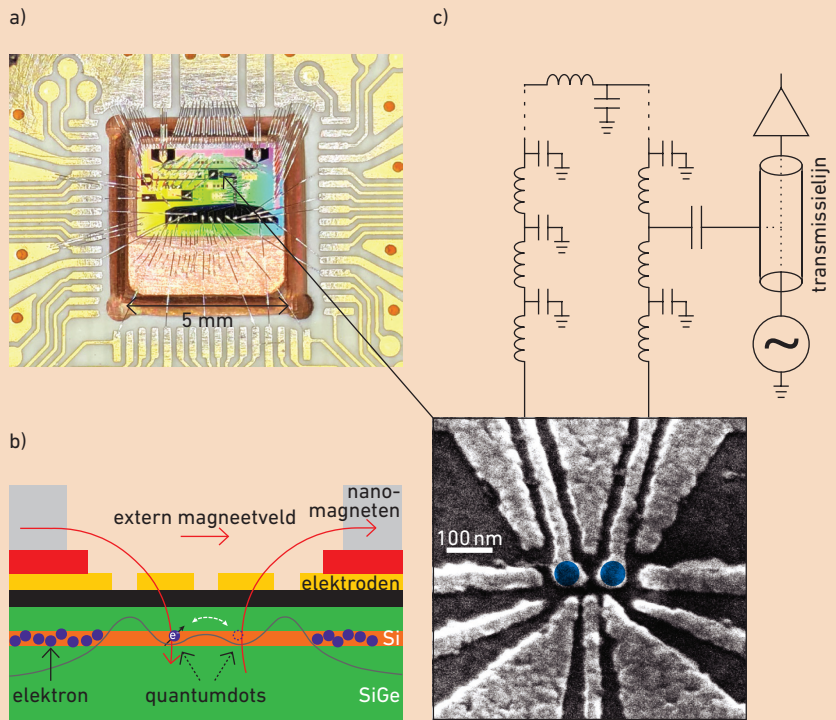


Guoji Zheng studeerde technische natuurkunde aan de TUD. Na een project aan de University of Wisconsin-Madison in de Verenigde Staten, is hij een promotieonderzoek gestart naar quantumcomputers op basis van spinqubits bij QuTech onder leiding van Lieven Vandersypen.
G.Zheng@tudelft.nl



Figuur 1. Verschillende varianten van licht-materiewisselwerking. a) Blauw licht bevat fotonen met genoeg energie om een elektron los te krijgen van een metaal hier, maar rood licht niet. b) Een foton blijft in de holte tussen twee spiegels en gaat een coherente interactie (g) aan met een atoom. In werkelijkheid treden er verliezen op via de spiegels (κ) of via het atoom (γ). c) Chipvariant van (b) waarbij een foton zich in de resonator bevindt en koppelt aan de quantumbit. Illustraties: Liwen Zhang.

Elk elektron heeft een spin, een fundamentele quantummechanische eigenschap die lijkt op het magnetisch dipoolmoment. In een magnetisch veld splitsen de twee spintoestanden door het Zeeman-effect en vormt de spin met tegengestelde richting (ten opzichte van het magnetisch veld, *spin-down*) de lagere energietoestand. Het energieverval tussen de grondtoestand en de aangeslagen toestand, *spin-up*, hangt af van de sterkte van het magnetisch veld. We gebruiken de spin van een enkel elektron in de dubbele quantumdot als quantuminformatiedrager. De LC-resonantiekring die fotonen vasthoudt op de chip bestaat uit een nanodraad van supergeleidend



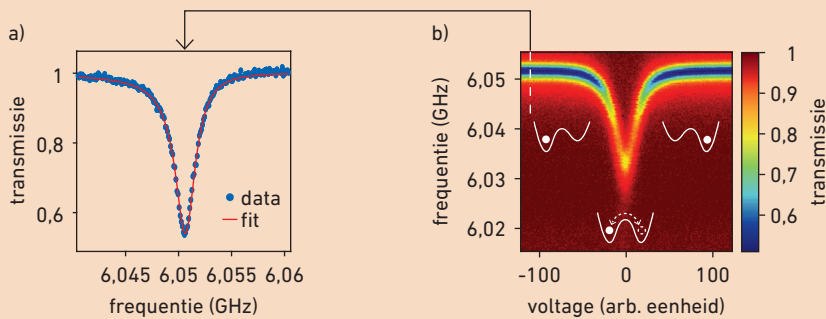
Figuur 2. a) Foto gemaakt door een optische microscoop van de quantumchip verbonden aan een printplaat. b) Schematische dwarsdoorsnede van de chip. c) Rasterelektronenmicroscopieplaatje van de elektroden (lichtgrijs) zonder nanomagneten. De blauwe cirkels geven de plaatsen van de quantumdots aan. De nanodraadresonator is weergegeven als een serie van spoelen en condensatoren.

materiaal (niobiumtitaniumnitride). Door supergeleidend materiaal te gebruiken, treden er minder verliezen op, waardoor fotonen langer behouden blijven. De eigenschappen van de nanodraadresonator worden gemeten door te kijken naar de transmissie van een microgolfsignaal door de transmissielijn, die capacitief gekoppeld is aan de nanodraad. De uiteinden van de nanodraad zijn verbonden met twee elektroden waaronder quantumdots worden gevormd (figuur 2c). Door een foton in de resonator genereren die elektroden een oscillerend elektromagnetisch veld dat het elektron in de dubbele quantumdot beïnvloedt.

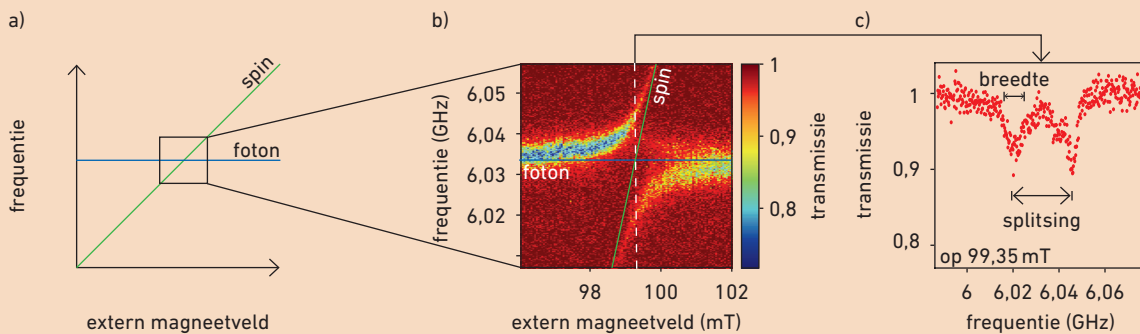
Spin-baankoppeling

Het creëren van een coherente wisselwerking tussen de elektronspin en het foton is niet vanzelfsprekend aangezien de directe (inductieve) koppeling tussen spin en magnetisch veld van het foton onpraktisch klein is. Om dit

knelpunt te omzeilen wordt gebruikgemaakt van het elektrisch veld van het foton, dat vele malen sterker is dan zijn magnetische component. Echter, dat koppelt weer niet direct aan de spin, aangezien de spin een magnetische eigenschap is. Er moet dus een manier bedacht worden om de spin te koppelen aan de positie (baan) van het elektron, die wel direct reageert op het elektrisch veld via de elektronlading. Dit wordt de spin-baankoppeling genoemd. Deze koppeling kan op een elegante manier aangelegd worden door nanomagneten te introduceren. Deze worden boven op de chip geplaatst en produceren een transversale magnetischveldgradiënt (figuur 2b). Dat wil zeggen dat het nanomagnetisch veld loodrecht staat op het externe magnetisch veld én het in elke dot in een andere richting wijst. Wat hebben we hiermee bereikt? Het oscillerende elektrisch veld van het foton duwt het elektron heen en weer, en dankzij de



Figuur 3. a) Resonatorrespons als functie van de frequentie van het microgolfsignaal. De data is een doorsnede van (b) langs de gestreepte lijn. b) Resonantieverschuiving door lading-fotonkoppeling als functie van het voltage op een elektrode [3].



Figuur 4. a) Het energieverschil tussen spin-down en spin-up schaalt lineair met magnetveld (groene lijn), maar de fotonenergie blijft gelijk (blauwe lijn). b) Door een sterke spin-fotonkoppeling kruisen de spin en foton elkaar niet. c) De data zijn een doorsnede van (b) op 99,35 mT (gestreepte lijn). De splitsing wordt de vacuüm Rabisplitsing genoemd. Data van [3].

magneetveldgradiënt ervaart het elektron in zijn referentiekader een oscillerend magnetveld waardoor de spin roteert. Dus een oscillerend elektrisch veld kan nu de spin beïnvloeden! Hoewel dit spin-fotonkoppelmingsmechanisme indirect werkt via de elektronlading, hebben theoretici voorspeld dat dit een sterkere koppeling moet bieden dan de directe magnetische koppeling.

Vacuüm Rabisplitsing

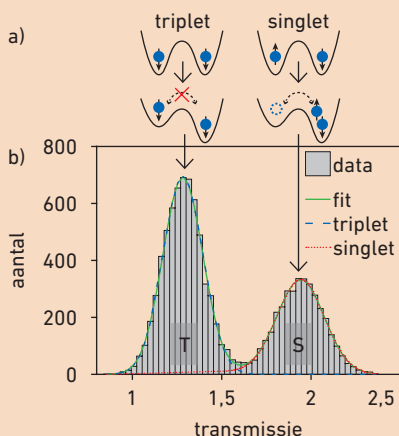
We moeten eerst bewijzen dat het foton de elektronpositie beïnvloedt en dat de resonator hierop reageert. De chip wordt gekoeld tot 10 millikelvin om thermische fluctuaties te onderdrukken. Figuur 3a laat de transmissie van het microgolfsignaal door de supergeleidende resonator zien. De positie van het dal geeft de resonantiefrequentie van de resonator aan, en ook de fotonenergie (op de constante van Planck na). Wanneer het elektron zich

maar in één van de dots bevindt, zal de resonator zich niets van het deeltje aantrekken (figuur 3b, linker- en rechterkant). Maar wanneer we zorgen dat het elektron vrij kan ‘springen’ van de ene naar de andere dot, geeft dit een extra capaciteit aan de resonator waardoor de resonantiefrequentie naar een lagere frequentie verschuift (figuur 3b, midden). Dit laat zien dat er daadwerkelijk een elektronlading-fotonwisselwerking plaatsvindt. Wat is het kenmerk van een sterke spin-fotonwisselwerking? Dat is een splitsing in de energie van het foton en de spin wanneer deze twee in resonantie zijn. De Zeemansplitsing van de spintoestanden schaalt lineair met het externe magnetveld (figuur 4a). Daarentegen blijft de fotonenergie constant. We bestuderen het gebied nader waarin de spin in resonantie komt met het foton (vierkant). Door naar de respons van de resonator te kijken, kunnen we zien wat er met de

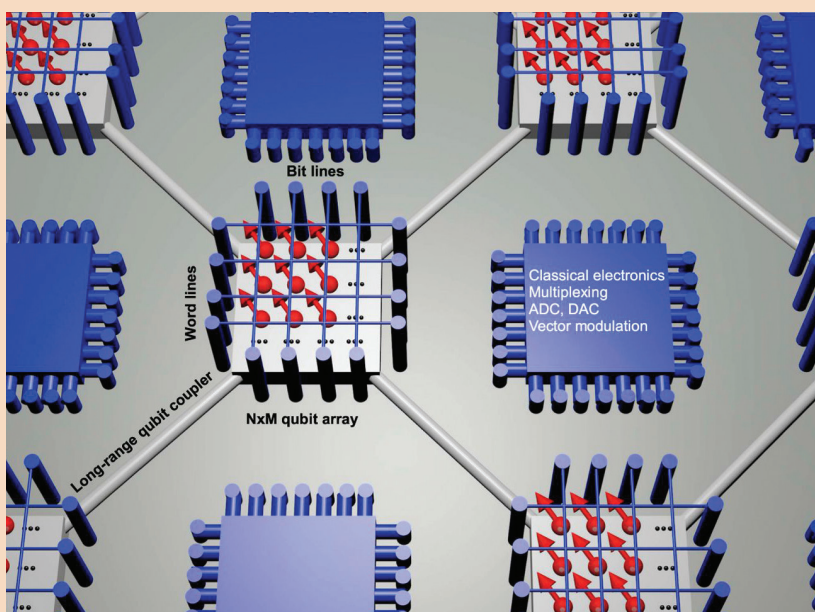
fotonenergie gebeurt. Figuur 4b laat een duidelijke splitsing zien, genaamd de vacuüm Rabisplitsing. Figuur 4c laat de doorsnede van de data op resonantie zien (gestreepte lijn in 4b). De splitsing tussen de dalen wordt bepaald door de grootte van de wisselwerking. Een grotere splitsing is dus gewenst. De breedte van de dalen wordt bepaald door verliezen van energiequanta via de resonator en de spin. Een duidelijke splitsing tussen de dalen, groter dan de breedte van de dalen, is hier te zien en bewijst dat we voor het eerst een coherente wisselwerking tussen spin en foton kunnen genereren op een chip. Hierdoor zijn we in staat om quantuminformatie van de spin over te dragen aan het foton en vice versa.

Spins uitlezen

Een andere toepassing van de resonator is het meten van de spin-toestand. De resonantiefrequentie



Figuur 5. a) Singlets en triplets geven verschillende transmissiewaarden. Als een van de spins bekend is, bijvoorbeeld de rechterspin, dan kan de toestand van de andere spin, in dit geval de linkerspin, achterhaald worden. b) De pieken hebben een eindige breedte door elektrische ruis. Data van [4].



Figuur 6. Visie van een toekomstige quantumprocessor op basis van spinqubits [5].

van de resonator hangt af van of een elektron vrij kan tunnelen in de dubbele quantumdot (figuur 3b). We bekijken de situatie met twee elektronen in totaal; één in elke dot. De twee elektronen vormen samen een gezamenlijke spintoestand, singlet of triplet. In de singlettoestand zijn de spins antiparallel georiënteerd (spin-up en spin-down), maar in de triplettoestand zijn ze voornamelijk parallel. In de quantummechanica hebben we het uitsluitingsprincipe van Pauli dat zegt dat twee elektronen niet dezelfde quantumtoestand mogen bezetten. Dus de twee deeltjes kunnen in dezelfde dot zitten, mits ze verschillende spintoestanden hebben, oftewel in de singlettoestand zitten (figuur 5a). Tunnelen is verboden voor de triplettoestand. Door naar de resonatorrespons te kijken kunnen we achterhalen in welke gezamenlijke toestand de spins zaten. Een hogere transmissiewaarde betekent een singlettoestand en een lagere transmissiewaarde betekent een triplettoestand. Dit hebben we experimenteel laten zien door willekeurig singlets en triplets te bereiden en de transmissie door de resonator te meten. De transmissiewaarden zijn in een histogram weer-

gegeven in figuur 5b en twee duidelijk gescheiden pieken zijn te zien. We kunnen in tien microseconden zeggen om welke spintoestand het gaat met een betrouwbaarheid van maar liefst 98 procent [4]. Dit is honderd keer sneller dan voorheen doordat we een supergeleidende resonator gebruiken op dezelfde chip als de quantumdots.

Elektronspin-quantumbit

Deze resultaten hebben belangrijke implicaties voor de opschaalbaarheid van qubits op basis van elektronspins in silicium quantumdots. Dit type qubit is namelijk een veelbelovend platform voor het realiseren van een grootschalige quantumprocessor, mede dankzij het kleine formaat (~100 nm), het relatief lange behoud van hun quantumtoestand (~1 ms) en de gelijkenis met een moderne transistor, waardoor deze quantumtechnologie geïntegreerd kan worden in de huidige industrie voor chipfabricage met silicium. Het knelpunt op dit moment is dat de interactie tussen spinqubits alleen lokaal plaatsvindt, op afstanden die vergelijkbaar zijn met de grootte van de qubits zelf. Dit kan een groot probleem vormen voor het opschalen naar een functionele

quantumprocessor die duizenden tot miljoenen qubits vereist. Fotonen kunnen worden toegepast om de afstand tussen spinqubits te vergroten. Quantuminformatie van een spinqubit kan overgedragen worden aan een foton. Het foton kan deze informatie vervolgens over een veel grotere afstand dragen en overmaken aan een tweede qubit dankzij de grote afmetingen van de resonator. Op deze manier kunnen twee spinqubits dus met elkaar communiceren zonder dat ze direct naast elkaar zitten. We denken dat hiermee spinqubits kunnen worden opgeschaald naar clusters van qubits die met elkaar verbonden zijn via fotonen (figuur 6). De sterke spin-fotonwisselwerking die we hier hebben laten zien is de eerste cruciale stap in het realiseren van dit ambitieuze doel.

REFERENTIES

- 1 S. Haroche en J.-M. Raimond, *Exploring the Quantum: Atoms, Cavities, and Photons*, Oxford University Press, 2006.
- 2 A. Blais et al., *Phys. Rev. A* **69**, 062320 (2004).
- 3 N. Samkharadze et al., *Science* **359**, 1123 (2018).
- 4 G. Zheng et al., *Nature Nanotechnology* **14**, 742 (2019).
- 5 L.M.K. Vandersypen et al., *npj Quantum Information* **3**, 34 (2017).