

A scanning electron microscope (SEM) image of a superconducting material. The image shows a complex, porous structure with a central, elongated elliptical feature. The material has a textured, crystalline appearance with various facets and edges. The color is a deep purple, likely due to the lighting or post-processing of the image. The overall structure is interconnected, forming a network of channels and voids.

Supergeleidende ellipsen voor een groene toekomst

Als we het hebben over het verminderen van ons energiegebruik in verband met klimaatverandering, gaat de discussie hoofdzakelijk over minder vliegen of het installeren van warmtepompen. Vaak wordt echter een steeds grotere groep energiegebruikers vergeten. Als gevolg van onze almaar toenemende honger naar dataopslag en -verwerking (zoals door de opkomst van kunstmatige intelligentie), zijn datacenters nu al verantwoordelijk voor 1% van het wereldwijde energiegebruik en volgens de ernstigste voorspelling zal dit aandeel nog tijdens dit decennium vertienvoudigen [1]. Het is dan ook van het grootste belang dat we zoeken naar nieuwe energiezuinige computertechnieken. Supergeleiders kunnen wellicht uitkomst bieden.

Tijdens de ontwikkeling van de computer in de tweede helft van de twintigste eeuw waren er twee scholen te onderscheiden [2]. De eerste baseerde zich op halfgeleiders en de andere op supergeleiders. Aangezien we tegenwoordig allemaal met een stukje silicium op zak lopen, behoeft het geen uitleg welke van de twee kampen 'gewonnen' heeft op het gebied van de consumptienelektronica. Bij de computers die je vindt in datacenters, die rekenen op de grootst mogelijke schaal, is de strijd echter nog niet beslecht. Hier kunnen supergeleidende computers, met elementen die geen energie aan warmtedissipatie verliezen, wellicht een oplossing vormen voor de enorme en snel groeiende energiebehoefte. Zelfs als we de hoeveelheid energie die het kost om de circuits af te koelen in beschouwing nemen, kan rekenen op grote schaal efficiënter zijn met supergeleidende logica dan met conventionele technieken [3]. Het knelpunt bij de ontwikkeling van computers op basis van supergeleiders is echter op dit moment het ontbreken van goede geheugenelementen voor het opslaan van de gigantische hoeveelheid data die we verzamelen.

Supergeleidende geheugenelementen

Er zijn twee manieren om informatie op te slaan in een supergeleider. De eerste berust op het feit dat de stroom in een supergeleidende ring, de superstroom, gekwantiseerd is. Je zou dus de '0'-toestand kunnen toekennen aan de afwezigheid van een superstroom, en de '1'-toestand aan een eindige superstroom. Hoewel dit een schaalbare en energiezuinige methode is, is dit soort geheugencellen vluchtig: zodra de supergeleider wordt opgewarmd boven de kritische temperatuur, verdwijnt de

supergeleiding en daarmee de opgeslagen informatie. Desastreus in het geval van een calamiteit!

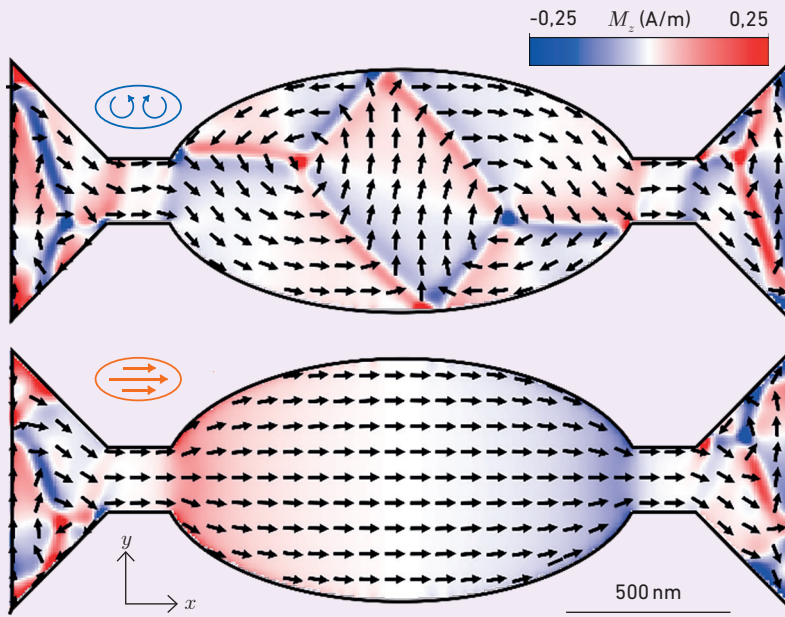
Dit probleem wordt opgelost door supergeleiders met ferromagnetisme te combineren. Informatie wordt dan opgeslagen in de relatieve magnetische oriëntatie van meerdere ferromagnetische lagen. Hoewel deze elementen niet vluchtig en schaalbaar zijn, komen er vaak grote magneetvelden bij kijken om dit soort elementen te schakelen (soms wel van één tesla!). Het genereren van deze velden kost weer veel energie en daarmee zijn we terug bij af.

Elliptische geheugencellen

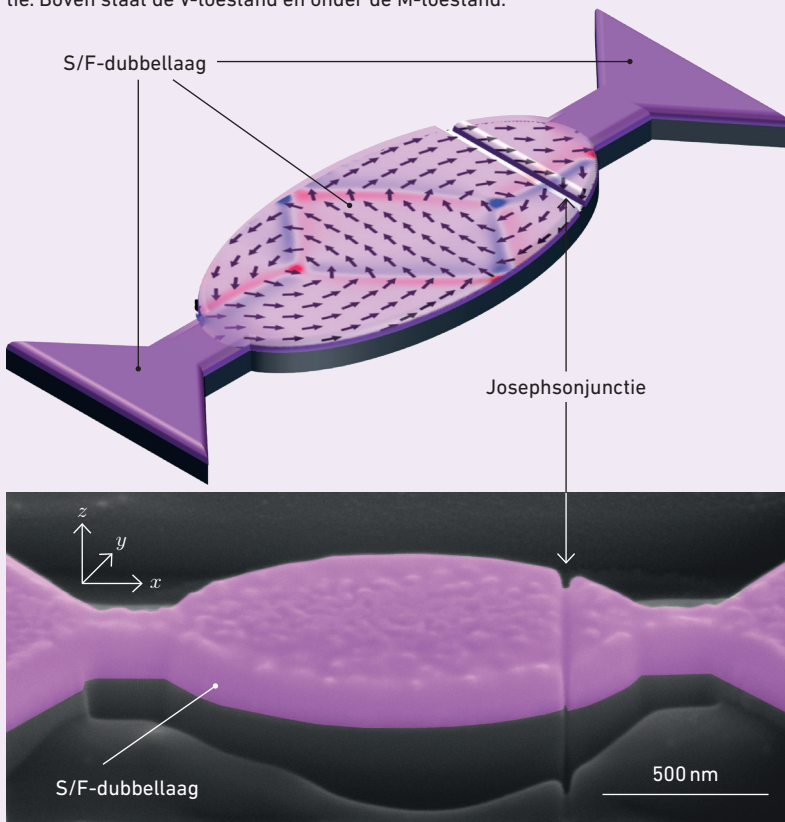
Onze aanpak voor het maken van geheugenelementen is anders: we maken Josephsonjuncties (zie kader *De Josephsonjunctie*) met speciale geometrieën op de microschaal om zo verschillende magnetische toestanden te realiseren waarin we informatie coderen [4]. Door slim om te gaan met de vorm van de geheugenelementen kunnen we de complexiteit drastisch verminderen. Het element bestaat enkel uit twee dunne lagen: een ferromagneet onder en een supergeleider boven. Zodra de dimensies van een ferromagneet gereduceerd worden tot de microschaal, wordt de magnetische ordening namelijk geheel bepaald door de geometrie; computersimulaties geven ons inzicht in de magnetische toestand van de ferromagneet die de geometrie afdwingt. Deze noemen we een spintextuur. We varieerden dus de geometrie van de ferromagneet en zochten zo naar een dubbelstabiele toestand van de magneet. De ene spintextuur kennen we dan de toestand '0' toe, de andere '1', en zo coderen we informatie in de ordening van de magneet op de microschaal. De meest veelbelovende geometrie bleek



Remko Fermin studeerde natuurkunde aan de Universiteit Leiden met een afstudeerproject aan het Max Planck Instituut voor chemische vastestoffysica in Dresden. Hij promoveerde in Leiden bij Jan Aarts op de invloed van geometrie op de microschaal in Josephsonjuncties en gecorreleerde elektronmaterie en werkt nu aan de ontwikkeling van een scanning SQUID AFM in het lab van Kaveh Lahabi in Leiden. Fermin@Physics.LeidenUniv.nl



Figuur 1. Simulaties van de magnetische toestanden van een ellipsvormig geheugenelement op de submicrometerschaal. De pijlen geven de lokale magnetisatie in het vlak aan; de kleur de sterkte van de lokale z -component van de magnetisatie. Boven staat de V-toestand en onder de M-toestand.



Figuur 2. Schematische voorstelling van een elliptisch geheugenelement (boven) en een foto van een echt element gemaakt met een elektronenmicroscoop (onder). De supergeleidende (S) en ferromagnetische (F) dubbellaag is paars gekleurd en het substraat is donker gekleurd. Lokaal hebben we de supergeleider verwijderd waardoor een gleufvormige Josephsonjunctie is ontstaan. In de schets boven is de spintextuur van de V-toestand te zien.

uiteindelijk de ellips. In figuur 1 zijn simulaties van de twee spintexturen weergegeven, die bij afwezigheid van een extern magnetveld stabiel zijn in een ellips met contacten. De eerste wordt gekenmerkt door twee ferromagnetische vortices (een soort draaikolktextuur waar alle spins achter elkaar in het vlak liggen, en slechts in de kern van de vortex enkele spins uit het vlak steken). We noemen deze toestand dan ook de V-toestand. In de andere spintextuur zijn de spins gemagnetiseerd langs de lange as van de ellips, vandaar de naam M-toestand (M van *magnetized*).

Uitlezing met de supergeleider

Natuurlijk is een geheugenelement alleen maar nuttig als je het ook kunt uitlezen. Dat is waar de supergeleidende laag om de hoek komt kijken. Door de ellips te bewerken met een gefocuseerde straal hoogenergetische ionen kunnen we plaatselijk materiaal weghalen uit de supergeleidende laag. We gebruiken deze techniek om een gleuf te snijden in de ellips (zie figuur 2). Doordat we alleen de supergeleider verwijderen, dwingen we het stroompad lokaal door de ferromagneet eronder en transformeren onze ellipsvormige dubbellaag in een Josephsonjunctie. Na het afkoelen van de ellips blijkt dat de kritische stroom van de junctie (zie kader *De Josephsonjunctie*) afhankelijk is van de magnetische toestand. Dit is te zien in figuur 3, waar we de spanning over het element als functie van de aangelegde stroom plotten. Hierdoor kunnen we de toestand gemakkelijk uitlezen door de spanning over het element te meten. We sturen bijvoorbeeld een stroom van 30 microampère door het element (aangegeven met de verticale onderbroken lijn in figuur 3) en meten een eindige spanning in de M-toestand, maar juist geen spanning in de V-toestand. Hiermee hebben we niet alleen bepaald wat de geheugentoeestand is, maar doen we dat zonder de toestand te veranderen, oftewel het geheugenelement is niet-destructief bij het uitlezen.

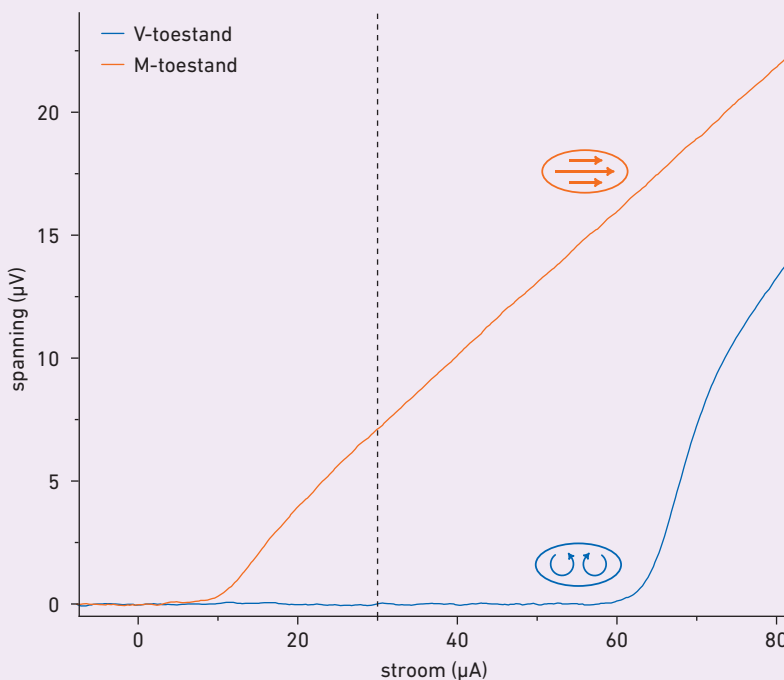
Schrijven van de toestanden

De logische vervolgvraag is dan natuurlijk: hoe schrijf je de spintextuur in de

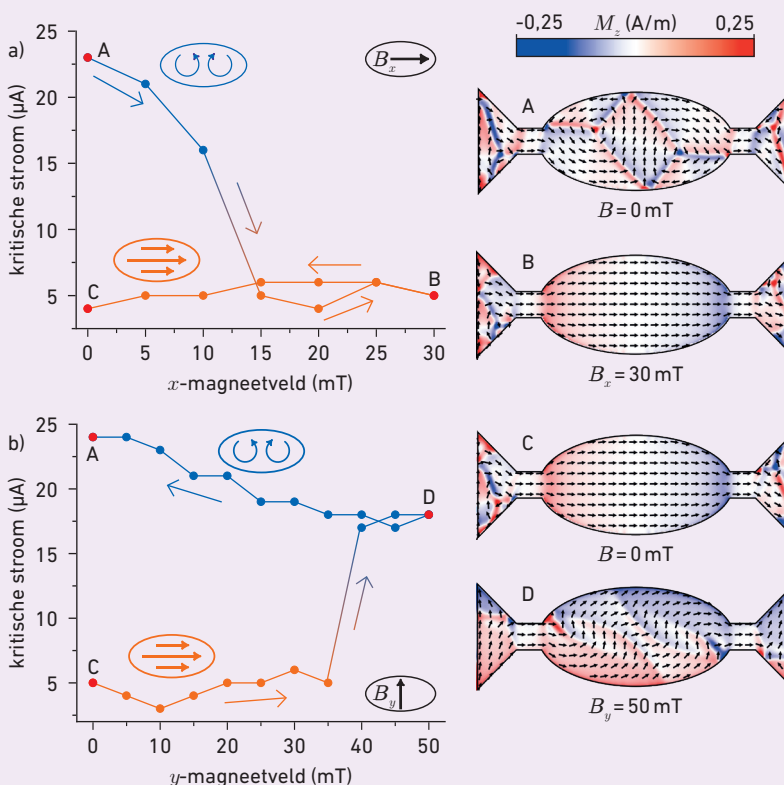
ferromagnetische laag? Het antwoord is het aanleggen van magnetische velden langs de korte of lange as van de ellips. Hoe dat in detail in zijn werk gaat, is te zien in figuur 4. Hier plotten we de kritische stroom als functie van het magnetische veld langs de twee eerdergenoemde assen. Daarnaast is voor een aantal geselecteerde velden een simulatie van de bijbehorende spintextuur weergegeven. Stel we starten in de V-toestand (A in figuur 4). Als we een veld aanleggen langs de lange as van de ellips, magnetiseren we de ferromagneet en brengen we de junctie in de M-toestand (B in figuur 4). Dit gaat gepaard met een afname in de kritische stroom. Ook na het weghalen van het veld blijft de M-toestand stabiel en de kritische stroom laag (C in figuur 4). Aan de andere kant, nadat we vervolgens een magneetveld langs de korte as aanleggen, zien we vanaf 40 mT een abrupte toename van de kritische stroom. In de simulaties gaat dit gepaard met een plotselinge ‘knik’ in de spintextuur (D in figuur 4). Vervolgens stabiliseren de twee vortices zich bij het wegnemen van het magneetveld uit deze geknikte spintextuur en is het element in de V-toestand, met bijbehorende hogere kritische stroom (A in figuur 4).

Lokale strooivelden

De natuurkunde achter het verschil in de kritische stroom is uiteindelijk terug te voeren op de lokale strooivelden van de ferromagneet. Dat zijn de velden die lokaal de ferromagneet verlaten, vergelijkbaar met hoe de veldlijnen van een dipoolmagneet zich van de noord- naar de zuidpool krommen. We hebben dit onderzocht door het interferentiepatroon van de junctie te meten. Zoals uitgelegd in het kader, oscilleert de kritische stroom van een Josephson-junctie als functie van de totale hoeveelheid magneetveld loodrecht op de stroomrichting van de junctie (in ons geval uit het vlak). Figuur 5 is een plot van de kritische stroom als functie van een extern aangelegd magneetveld, voor de twee verschillende toestanden. De curve wordt gekenmerkt door een enkele piek rond 0 mT in de V-toestand. Deze piek verschuift naar -58 mT zodra

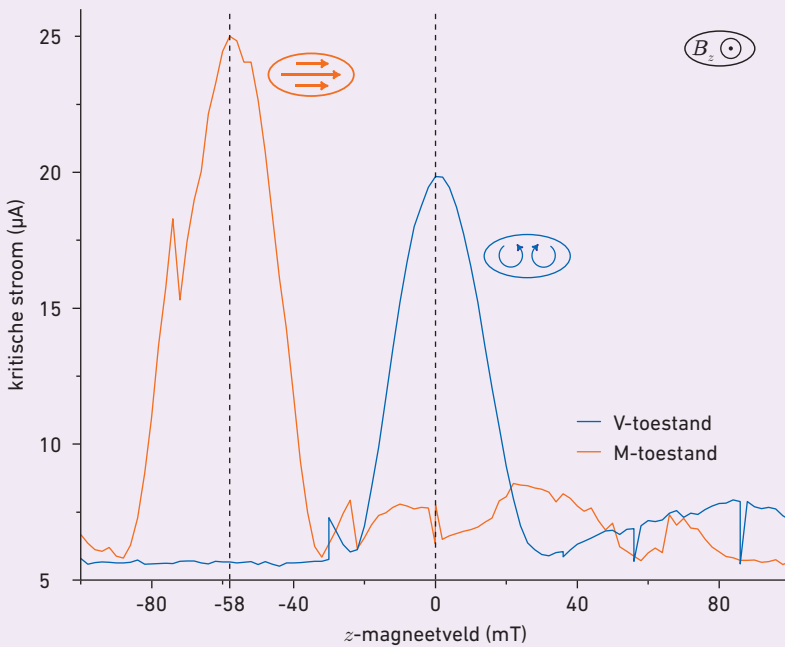


Figuur 3. Spanning als functie van stroom voor de V- en M-toestand. Doordat de M- en V-toestand een verschillende kritische stroom hebben, kunnen we het element zonder warmte-dissipatie uitlezen.



Figuur 4. Kritische stroom als functie van het magneetveld langs de lange (a) en korte (b) as van de ellips. De rechterkolom toont de spintextuur voor vier combinaties van magneetveld en kritische stroom, zoals aangegeven in (a) en (b).

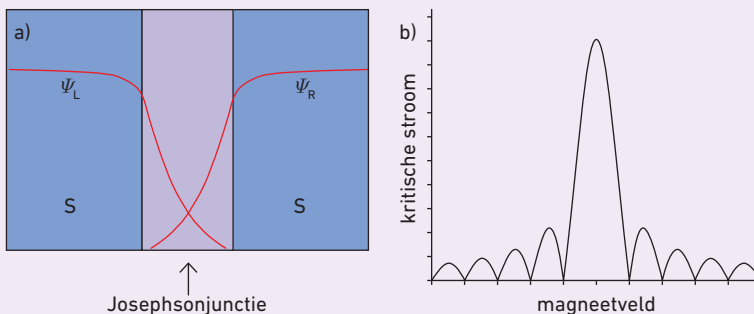
ONDERZOEK



Figuur 5. De kritische stroom als functie van magneetveld loodrecht op de stroomrichting (uit het vlak) voor de M- en V-toestand.

DE JOSEPHSONJUNCTIE

Supergeleiders worden gekarakteriseerd door een macroscopische quantumtoestand, die te beschrijven is met één coherente golf functie. Dit resulteert onder andere in het ontbreken van elektrische weerstand. In 1962 voorspelde Brian Josephson dat er een superstroom kan tunnelen door een dunne barrière tussen twee aangrenzende supergeleiders, als er voldoende overlap is tussen de twee golf functies (zie figuur 6a). Het resulterende object wordt een Josephsonjunctie genoemd en is de centrale bouwsteen in de supergeleidende techniek. Een van de eigenschappen van een Josephsonjunctie is dat de *kritische stroom* (de maximale superstroom die door de junctie kan stromen, oftewel: de hoogste stroom waarvoor we geen spanning over de junctie meten) oscilleert als functie van het magnetisch veld dat loodrecht op de stroomrichting staat. De resulterende curve, geplotted in figuur 6b, is herkenbaar als het Fraunhoferpatroon uit het befaamde optische enkele spleetexperiment. De Josephsonjunctie is dan ook het vastestofequivalent van de optische enkele spleet en een prachtig voorbeeld van het quantummechanische karakter van supergeleiding.



Figuur 6. a) Schematische voorstelling van een Josephsonjunctie: een niet-supergeleidende laag gesandwichd tussen twee supergeleiders (S). De golf functies van de linker en rechter supergeleider zijn geplotted in rood. b) Kritische stroom als functie van magneetveld loodrecht op de stroomrichting; dit is het Fraunhoferpatroon.

we wisselen naar de M-toestand. Dit duidt op een eindig statisch achtergrondmagneetveld dat optelt bij het externe aangelegde magneetveld, in M-toestand.

Aan de hand van simulaties in figuur 4 kunnen we de strooivelden van de ferromagneet berekenen. Wat blijkt: volgens de simulaties is de sterkte van het strooiveld in de junctie nagenoeg gelijk aan de verschuiving van de curve in figuur 5. De conclusie is dat het verschil in kritische stroom veroorzaakt wordt door een verschil in lokaal strooiveld tussen de twee magnetische toestanden. Dat verklaart waarom we de junctie aan de zijkant van de ellips maken: op deze manier maximaliseren we het verschil in strooiveld tussen de toestanden.

Prestaties van het element

Terugkomend op de prestaties van onze elliptische geheugenelementen: het grote voordeel van de combinatie van supergeleiders en ferromagneten is dat we uitlezing zonder warmtedissipatie combineren met de niet-vluchtige natuur van de ferromagneet. Daarnaast is het niet-destructieve uitlezen een groot voordeel.

Maar er zijn nog een paar hordes te nemen. We maken onze ellipsen nu op microschaal, niet op nanoschaal zoals in de halfgeleiderindustrie. Hoe schaalbaar is onze techniek dus? Daarnaast hebben we nu nog tientallen millitesla nodig om van toestand te wisselen. Een grote verbetering ten opzichte van de tesla-magneetvelden die eerder nodig waren, maar nog te hoog voor industriële toepassingen. Door slim de geometrie te kiezen, kunnen we deze velden wellicht reduceren. Werk aan de winkel dus voor een groene toekomst!

REFERENTIES

- 1 N. Jones, *How to stop data centres from gobbling up the world's electricity*, Nature **561**, 163 (2018).
- 2 W. J. Gallagher, et al., *Superconductivity at IBM – a Centennial Review: Part I – Superconducting Computer and Device Applications*, IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum, No. 21 (2012).
- 3 L. Joneckis et al., *An Initial Look at Alternative Computing Technologies for the Intelligence Community*. Institute for Defense Analyses, Alexandria, Virginia, Verenigde Staten (2014).
- 4 R. Fermin et al., *Mesoscopic superconducting memory based on bistable magnetic textures*, Phys. Rev. Research **4**, 033136 (2022).