

Stroom sturen door een isolator: magnonen maken het mogelijk

Door een isolerend materiaal kan geen elektrische stroom lopen. In ons onderzoek hebben we ontdekt dat we in een speciaal type isolator, namelijk een *magnetische* isolator, wel een ander soort stroom kunnen laten lopen: een *spinstroom*. Dat doen we door gebruik te maken van magnonen (spingolven), de aangeslagen toestanden van een magnetisch systeem. Omdat we een elektrische stroom kunnen omzetten in een spinstroom en vice versa, kunnen we op die manier tóch een signaal door een isolator sturen. De isolator die we gebruiken blijkt namelijk een goede spingeleider te zijn.

Ludo Cornelissen

104

Ons experiment

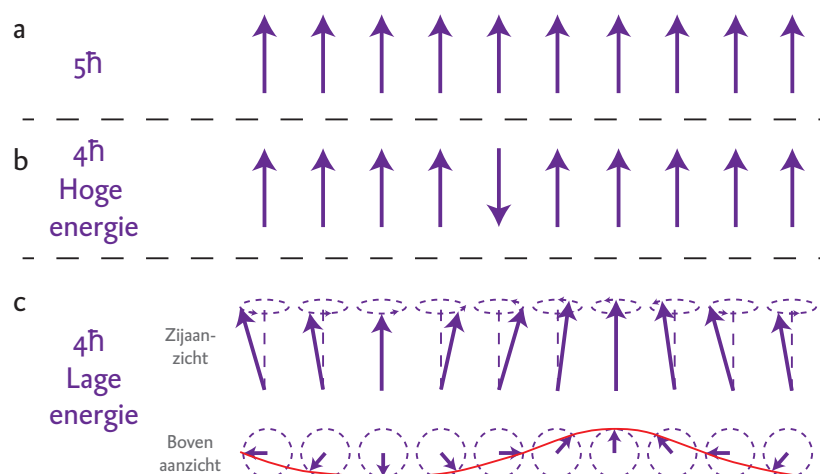
We leggen twee dunne metalen strips boven op een magnetische isolator. De strips raken elkaar nergens en door de isolator kan geen elektrische stroom lopen. Toch zien we dat, wanneer we een stroom (wisselstroom of

gelijkstroom) sturen door een van de twee strips, er een spanning over de andere strip ontstaat. Er wordt dus wel lading verplaatst in deze strip, terwijl er geen elektrisch contact tussen de strips is! Hoe kan dat? De verklaring die wij vonden is dat er spin-

golven ontstaan in de isolator, zodat er een spinstroom door dit materiaal gaat lopen. Waarom we dit denken en wat spinstromen en spingolven precies zijn, lees je in dit artikel.

Spingolven en magneten

Spin is een quantummechanische eigenschap van deeltjes die het intrinsieke magnetisch moment van een deeltje, zoals een elektron, beschrijft. Ferro- of ferrimagneten hebben een netto magnetisch moment doordat (de meerderheid van) de elektronenspinnen in het materiaal dezelfde richting op wijzen. Een simpel model hiervan is de spinketen van Heisenberg: we stellen een magneet voor als een keten van elektronenspinnen die, in de grondtoestand, allemaal dezelfde kant op wijzen (figuur 1a). De eerste aangeslagen toestand van het systeem ontstaat door één spin om te draaien (figuur 1b). Doordat de wisselwerking tussen twee naburige spins (de *exchange*-interactie) sterk is, is het energetisch gunstiger om de netto



Figuur 1 Heisenberg spinketen. a) Grondtoestand van de ferromagneet, alle spins parallel. De netto spin van het systeem is $5\hbar$. b) Aangeslagen toestand: één spin is omgekeerd. De netto spin is nu $4\hbar$. c) Aangeslagen toestand met een lagere energie: de spinreductie wordt uitgesmeerd over het hele systeem. Dit is een spingolf.

spinreductie ‘uit te smeren’ over het hele systeem (figuur 1c). De spins zullen dan rond hun evenwichtspositie gaan draaien (spinprecessie). Deze uitgesmeerde excitatie noemen we een spingolf, voor het eerst beschreven door Felix Bloch [1].

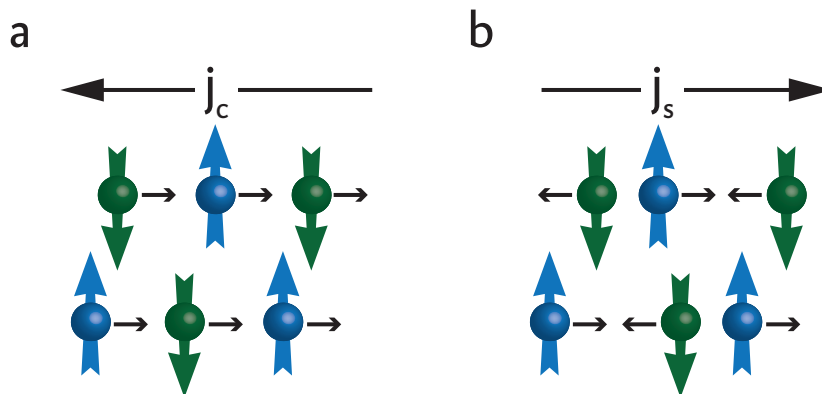
De meeste magnetische materialen zijn ook elektrisch geleidend, wat het lastig maakt om spingolven te bestuderen: effecten ten gevolge van elektrontransport domineren de gemeten signalen. In magnetische isolatoren zijn deze elektronische effecten echter afwezig omdat er geen elektrische stroom kan lopen! Yttriumijzergranaat ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, kortweg YIG) is zo’n magnetische isolator en wordt vaak gebruikt voor onderzoek naar spingolven omdat het een lage magnetische demping heeft: eenmaal in precessie gebracht bewegen de spins maar langzaam naar hun evenwichtspositie terug. Spingolven kunnen zich in YIG daarom goed voortbewegen.

Magnonen

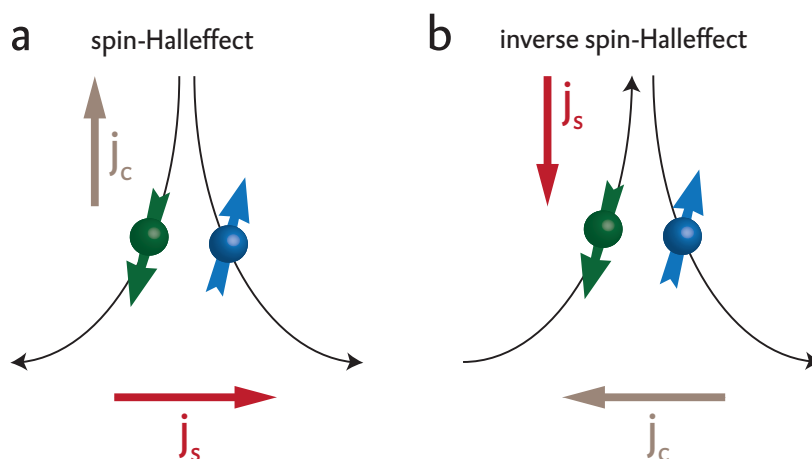
Uit het spinketenmodel wordt al duidelijk dat niet alle golfengten (en dus energieën) van spingolven zijn toegestaan. De kortst mogelijke golf heeft een golfengte gelijk aan de roosterafstand, de afstand tussen twee spins. Verder is de hoeveelheid spin die een spingolf draagt gelijk aan de netto spinreductie door één spinomkering: \hbar . Volgens de quantummechanica zijn zowel de spin als de energie van een spingolf gequantiseerd (ze kunnen alleen discrete waarden aannemen). Deze quanta staan bekend als magnonen en zijn de deeltjesrepresentatie van een spingolf.

Spinstream en ladingsstroom

Een elektrische ladingsstroom ontstaat door een spanning over een geleidend materiaal aan te leggen. Daardoor verplaatsen de vrije elektronen zich en wordt er lading getransporteerd. De wet van Ohm zegt dan dat de ladingsstroom gelijk is aan de spanning gedeeld door de weerstand van het materiaal. Maar ieder elektron heeft behalve lading ook spin en het blijkt mogelijk om behalve lading, ook spin te verplaatsen. In een ladingsstroom bestaat de helft van de elektronen uit spin-up en de andere helft uit spin-down. Dit levert geen spinstream op, omdat de spin van up en down elkaar precies opheffen



Figuur 2 Ladings- en spinstromen. a) Een ladingsstroom, j_c . Omdat zo’n stroom evenveel spin-up-(blauw) als spin-down-(groen) elektronen bevat, wordt er geen spin getransporteerd. b) Bij een pure spinstream, j_s , bewegen spin-up- en spin-down-elektronen in tegengestelde richting. Nu wordt er alleen spin en geen lading getransporteerd.



Figuur 3 Het spin-Hall- en inverse spin-Halleffect. a) Een ladingsstroom j_c veroorzaakt een spinstream j_s . De spinstream ontstaat loodrecht op de stroomrichting van de ladingsstroom en ook loodrecht op de stand van de elektronenspins, die hier het papier uit (blauw) en in (groen) staan. b) Bij het ISHE gebeurt precies het tegenovergestelde: een spinstream door het materiaal veroorzaakt een loodrechte ladingsstroom j_c .

(figuur 2a). Als echter de spin-up-elektronen naar rechts bewegen en de spin-down-elektronen naar links, wordt er netto geen lading getransporteerd. Er wordt nu juist wel spin verplaatst, dus spreken we in dit geval van een spinstream (figuur 2b).

Behoud van lading, niet van spin

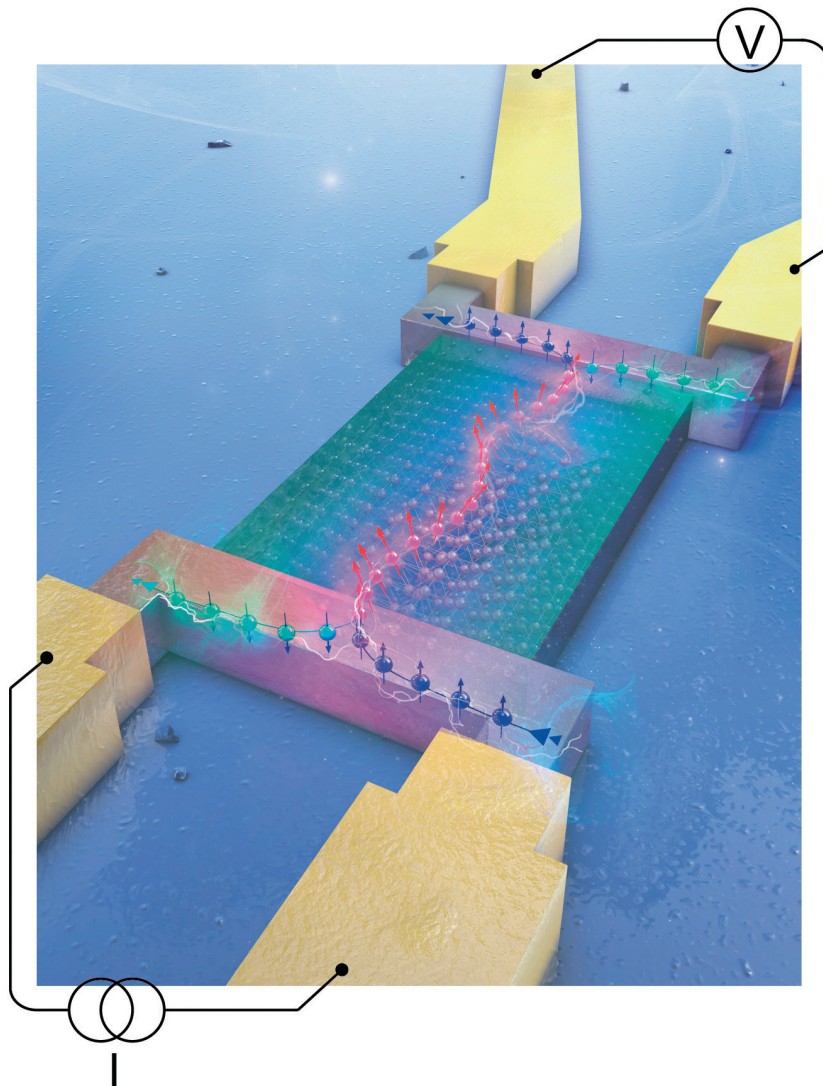
Lading is een behouden grootheid, dus alle ladingsstromen die we in een materiaal stoppen moet er ergens anders weer uit komen. Voor spin in een vaste stof geldt dit echter niet: spin kan bijvoorbeeld verloren gaan naar het kristalrooster door interactie tussen elektronen en roostertrillingen. Op die manier kan de hoeveelheid spin in een spinstream afnemen, spinrelaxatie genoemd. Wanneer een spinstream door een materiaal loopt, zal de grootte daarvan door spinrelaxatie uiteindelijk exponentieel

afvallen als functie van de afstand. De karakteristieke lengteschaal waarover dit gebeurt wordt de spin-diffusielengte λ genoemd. De grootte van λ verschilt per materiaal, in goud geldt bijvoorbeeld $\lambda \approx 30$ nm, terwijl in grafen een λ van enkele micrometers gemeten is.

Ludo Cornelissen (1988) studeerde technische natuurkunde aan de TU Delft. Tijdens zijn afstudeerproject deed hij onderzoek naar het induceren van supergeleiding in netwerken van halfgeleidende nanoraden. Sinds maart 2014 werkt hij aan spintransport in magnetische isolatoren als promovendus in de vakgroep Physics of Nanodevices van Bart van Wees aan de Rijksuniversiteit Groningen.



l.j.cornelissen@rug.nl



Figuur 4 Artistieke impressie van het experiment. Door de ladingsstroom I in platina ontstaat een spinstroom richting het grensvlak met YIG (de blauwe spin-up-elektronen worden afgebogen door het SHE). Aan het grensvlak kaatsen de elektronen terug, omdat YIG een isolator is. Daarbij kan ook spinomkering vinden, zodat spin-up (blauw) terugkaatst als spin-down (groen). Het verschil in spin tussen up en down (\hbar) wordt doorgegeven in het YIG en genereert daar een magnon. Als dit magnon op het grensvlak met de platina detector botst, wordt het geabsorbeerd en geeft het zijn spin door aan een spin-downelektron. Dit keert daardoor om van spin (groen naar blauw), wat een spinstroom het platina in veroorzaakt. Door het ISHE genereert dit een spanning V , die we meten.

Het (inverse) spin-Halleffect

Voor de omzetting van een elektrische stroom naar een spinstroom (en vice versa) maken we gebruik van twee effecten, het spin-Hall- en inverse spin-Halleffect (respectievelijk SHE en ISHE). Beide effecten treden op in materialen met een sterke spin-baankoppeling (de wisselwerking tussen de spin en de impuls van een elektron), bijvoorbeeld zware metalen zoals platina.

Het SHE houdt in dat wanneer een ladingsstroom door platina loopt, er eveneens een spinstroom ontstaat die loodrecht op de oorspronkelijke ladingsstroom staat (figuur 3a). Door de sterke spin-baankoppeling in

platina hangt de verstrooiing van de elektronen namelijk af van hun spinrichting. De verschillen in verstrooiing tussen spin-up en spin-down bij een enkele botsing zijn maar klein, maar doordat een elektron zo veel botsingen ondergaat tijdens zijn beweging door het materiaal (de vrije weglengte in platina is ongeveer een nanometer) levert dit toch een bruikbaar effect op.

Het ISHE is precies het tegenovergestelde en ontstaat wanneer we een spinstroom j_s in het platina injecteren. De spin-afhankelijke verstrooiing levert dan een ladingsstroom j_c op, loodrecht op de spinstroom (figuur 3b).

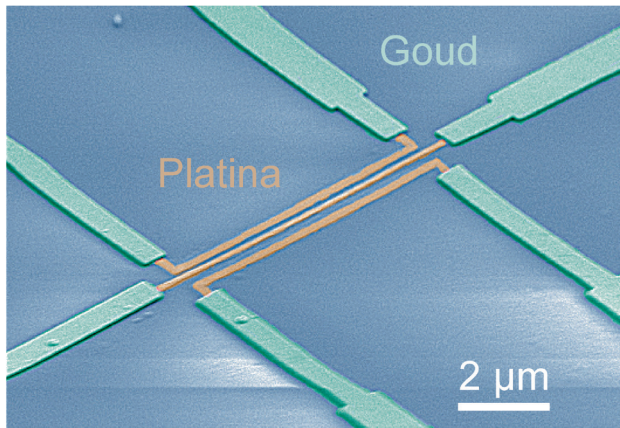
Het magnonspinstroom-experiment

Wij wilden uitzoeken of er een magnonspinstroom door YIG kan lopen en of we met behulp van de conversie tussen ladings- en spinstroom een elektrisch signaal kunnen versturen door deze isolator. Figuur 4 laat zien hoe we te werk gaan: eerst sturen we een ladingsstroom door de platina injector, die door het SHE een spinstroom naar het YIG-oppervlak maakt. Als de elektronen in de spinstroom op het platina-YIG-grensvlak botsen, kaatsen ze terug (ze kunnen immers het YIG niet in). De spin van de elektronen kan wel worden doorgegeven aan de magnonen in het YIG, zodat er een magnonspinstroom gaat lopen. Bij de platina detector worden de magnonen geabsorbeerd, wat spinomkering van elektronen in het platina tot gevolg heeft. Dit genereert een spinstroom het platina in, die met behulp van het ISHE wordt omgezet naar een spanning die gemeten kan worden.

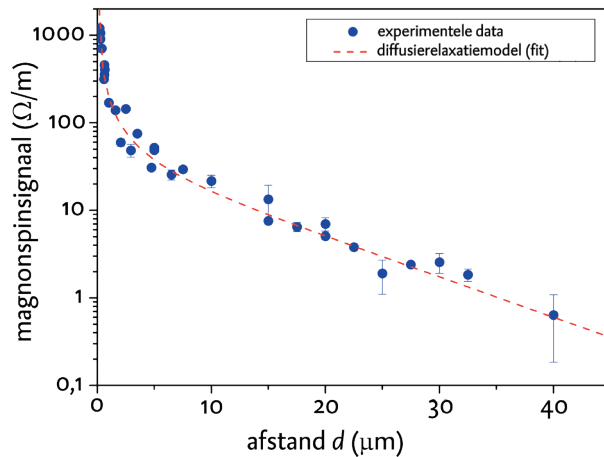
De werkelijke geometrie is iets anders dan in figuur 4: we leggen platina strips boven op een dunne (200 nm) YIG-film. Dit is namelijk makkelijker te fabriceren dan de 'sandwich' in figuur 4. Figuur 5 laat een elektronenmicroscopieplaatje zien van één van de chips die gebruikt zijn in het experiment.

Het magnonspinsignaal

De theorie klinkt aardig, maar hoe tonen we aan dat er echt een spinstroom door YIG loopt? Zelfs als we een signaal meten, hoe sluiten we dan andere mechanismen (bijvoorbeeld warmtetransport of capacitieve koppeling tussen injector en detector) definitief uit? Daarvoor gingen we op zoek naar de karakteristieke eigenschap van iedere spinstroom: exponentieel verval van het signaal, over de eerder genoemde spindiffusielengte λ . Signalen ten gevolge van andere mechanismen zullen natuurlijk ook zwakker worden als we de afstand waarover we meten vergroten, maar vertonen geen exponentieel verval. Figuur 6 toont het bij de detector gemeten signaal als functie van de afstand tussen injector en detector, d . De rechte lijn op de logaritmische schaal laat het exponentiële verval goed zien (voor $d > 10 \mu\text{m}$), en uit deze grafiek vinden we direct de spin-diffusielengte in YIG, $\lambda \approx 9,5$



Figuur 5 Ingekleurd elektronenmicroscopieplaatje van één van onze chips. We gebruiken drie platina strips, de middelste is de injector, de buitenste de detectoren. Zo kunnen we met één injector het signaal op twee verschillende afstanden meten. De gouden banen zijn contacten die we gebruiken om onze elektrische metingen te doen.



Figuur 6 Magnonspinsignaal als functie van de afstand tussen injector en detector. De rode lijn is een fit door de data aan de hand van het magnonspin-diffusierelaxatiemodel [2].

μm [2] (bij kamertemperatuur). Dit is meer dan twee ordes van grootte hoger dan in metalen en vergelijkbaar met de langst gemeten spindiffusielengtes in grafen. Ons experiment laat dus zien dat magnonen in YIG-spin over grote afstanden kunnen transporteren.

De wet van Ohm voor magnonen

Wat ook uit figuur 6 blijkt is dat voor $d < \lambda$ het magnonspinsignaal niet exponentieel afvalt. De magnonen relaxeren op die korte afstand bijna niet. Het gedrag op deze afstanden laat zich beschrijven als diffusie: Bij de injector wordt een hoge magnondichtheid ge-

maakt, die diffundeert richting gebieden met een lagere dichtheid (zoals bij de detector). Dat betekent dat de magnonen veel verstrooiing ondergaan op hun weg door het YIG, bijvoorbeeld door botsingen met imperfecties in het materiaal. Ze ondervinden dus weerstand in het materiaal, net als elektronen in een ladingsstroom. Inderdaad blijkt dat we voor $d < \lambda$ de signaalgrootte kunnen voorspellen met de ‘wet van Ohm voor magnonen’: de spinstroom die we meten is gelijk aan de magnondichtheid bij de injector (de spinspanning), gedeeld door de spinweerstand van het stukje YIG tussen injector en detector. Op deze manier kunnen we de soortelijke

spinweerstand van YIG berekenen, die vergelijkbaar blijkt te zijn met de soortelijke weerstand van goed geleidende metalen. Kortom, hoewel YIG een isolator is voor ladingsstromen, is het een uitstekende spingeleider! Dat maakt YIG bijvoorbeeld interessant voor toepassingen in magnetische geheugenchips (MRAM), waar met behulp van spinstromen data worden weggeschreven naar, en uitgelezen van, magnetische bits.

Referenties

- 1 F. Bloch, *Zeitschrift für Physik*, **61**, 3, 206-219 (1930).
- 2 L.J. Cornelissen et al., *Nature Physics*, **11**, 1022-1026 (2015).

Nieuws

DJoP nu ook in webbrowser beschikbaar

Het Dutch Journal of Physics, de Engelstalige variant van het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde, is nu ook in een webbrowser te lezen. Ga naar www.ntvn.nl/dutch-journal-of-physics en lees het e-magazine op de computer of de laptop.

Begin april komt er weer een nieuwe editie online, het DJoP 2016-1 bevat een selectie van artikelen uit het NTvN aangevuld met extra video- en beeldmateriaal. Ook deze editie is voor iedereen gratis te downloaden en te lezen.

Spread the word!

