

University of Groningen

## Electrical spin injection in metallic mesoscopic spin valves

Jedema, Friso

**IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.**

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2002

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Jedema, F. (2002). *Electrical spin injection in metallic mesoscopic spin valves*. s.n.

### Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

### Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

# Samenvatting

Dit proefschrift behandelt fundamentele aspecten van elektrische spin injectie, transport en detectie van elektronspins in een niet-magnetisch metaal. Centraal hierin staat de experimentele waarneming van een ophoping van spin in een niet-magnetisch metaal. Deze waarneming geeft inzicht in wat er gebeurt met de spin van een elektron, wanneer het zich door een elektrische geleider verplaatst.

Gedurende het onderzoek zijn innovatieve 'spintronische' devices ontwikkeld en gefabriceerd, waarvan het uitgangssignaal alleen gevoelig is voor de spin van het elektron. Hiermee was het mogelijk om het signaal ten gevolge van de spinophoping volledig te isoleren van diverse parasitaire effecten. Het is mogelijk gebleken om bij kamertemperatuur de elektrisch geïnjecteerde spins in het niet-magnetische metaal te laten draaien (precederen) en vervolgens de resulterende spininformatie elektrisch te detecteren. Met simpele theoretische modellen, waarbij de elektronen worden beschouwd als vrije elektronen, zijn de verkregen resultaten kwantitatief te verklaren.

Het onderzoek is relevant voor het vakgebied van de spintronica, waar gezocht wordt naar een rol voor de spin als informatiedrager in elektronische schakelingen. Hierbij gaat het zowel om verbetering van huidige elektronische functies, zoals bijvoorbeeld energie zuinige geheugens en kleinere magnetische bits, als wel om de bestudering van nieuwe fysische concepten, zoals bijvoorbeeld een - op spin gebaseerde - kwantumcomputer.

## De elektronspin

Het elektron is een elementair deeltje met een eindige hoeveelheid elektrische lading. Deze lading maakt het elektron gevoelig voor de Coulomb en Lorentz krachten. Dit gecombineerd met de mogelijkheid om zich in meer of mindere mate 'vrij' te kunnen bewegen in metalen en halfgeleiders, maakt het elektron tot drager van elektrische stroom. Het elektron heeft echter nog een eigenschap. Het beschikt over een intrinsieke draaiing ('spin'), aangeduid met een impulsmomentum  $\mathbf{S}$ , en rechtstreeks hier aan gerelateerd een magnetisch moment  $\mu$ . Wanneer  $\mathbf{S}$  gemeten wordt langs een bepaalde richting (b.v. de z-richting), dan schrijft de kwantummechanica voor dat  $\mathbf{S}$  slechts

twee gekwantiseerde waarden kan aannemen:  $S_z = \pm \frac{1}{2} \hbar$ . Elektronen komen dus in twee smaken voor: 'spin-up' en 'spin-down'. Klassiek gezien gedraagt het elektron zich als een klein magneetje, zoals bijvoorbeeld een kompasnaald. Hiervan kan het magneetveld in twee tegenovergestelde richtingen wijzen, met het magneetveld mee of er tegen in.

### **De ferromagneet als spin-bron**

In een niet-magnetisch metaal komen even veel spin-up- als spin-down-elektronen voor en dus blijft er netto geen magnetisch veld over. In een metallische ferromagneet is dat niet het geval. Hier veroorzaakt de 'exchange-interactie' een verschil in de totale aantallen spin-up- en spin-down-elektronen, hetgeen resulteert in een eindige magnetisatie. De voorkeursrichting van de magnetisatie en dus ook de spinrichting van het elektron wordt bepaald door de vorm van het magnetische metaal. Een tweede gevolg van de exchange-interactie is dat deze de geleidbaarheid van een ferromagnetisch metaal voor de spin-up en spin-down elektronen verschillend maakt. Behalve een ladingsstroom  $I = (I_{\uparrow} + I_{\downarrow})$  in de ferromagneet verwacht men dan ook een 'spinstream'  $(I_{\uparrow} - I_{\downarrow})$ , waarbij magnetisatie getransporteerd wordt in de richting van de stroom (of er tegen in). Dit maakt een ferromagnetisch metaal geschikt als bron voor het leveren van een spinstream bij temperaturen onder de Curie temperatuur.

### **Spin-injectie en spinophoping: het magnetiseren van een niet-magnetisch metaal**

In de uitgevoerde experimenten wordt met behulp van een ferromagnetische strip (F) een spinstream in een niet-magnetische strip (N) geïnjecteerd. Als ferromagnetische metalen zijn nikkel (Ni), kobalt (Co) en een legering van nikkelijzer ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) gebruikt en als niet-magnetische metalen zijn koper (Cu) en aluminium (Al) gebruikt. Omdat de geleidbaarheid voor de spin-up- en spin-down-elektronen in N even groot is, ontstaat er een ophoping (accumulatie) van spin gepolariseerde elektronen aan het F/N grensvlak: de geïnduceerde magnetisatie. Dit is als volgt te verklaren. De drijvende kracht voor een elektrische stroom is een verschil in de elektrochemische potentiaal ( $\mu$ ) tussen twee punten. Omgedraaid betekent dit dat wanneer er verschillende spin-up- en spin-down-stromen geïnjecteerd worden, ook de spin-up en spin-down elektrochemische potentiaalgradiënten moeten verschillen. Hierdoor ontstaat er een niet-evenwichtssituatie, waarbij op de positie van het F/N grensvlak verschillende elektrochemische potentialen bestaan voor de spin-up ( $\mu_{\uparrow}$ ) en spin-down elektronen ( $\mu_{\downarrow}$ ). Het verschil tussen  $\mu_{\uparrow}$  en  $\mu_{\downarrow}$  betekent dat er een overschot aan spin-up-elektronen aanwezig is en een tekort aan spin-down (of vice versa) en gaat dus gepaard met een (geïnduceerde) magnetisatie.

## Spin-injectie via tunnelbarrières of transparante contacten?

In het onderzoek is gebleken dat een grotere spinpolarisatie van de geïnjecteerde stroom aan het F/N grensvlak wordt gehaald via een  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tunnelbarrière. Met een tunnelbarrière tussen de F en N strips bedraagt de spinpolarisatie  $P \approx 11\%$ , daarentegen bedraagt de spinpolarisatie met een transparant F/N grensvlak slechts  $P \approx 1\%$ . De reden hiervoor is gevonden in het feit dat de spinafhankelijk weerstand van de ferromagneet met tunnelbarrière voor de spin-up- en spin-down-elektronen veel groter is dan de spinafhankelijk weerstand van de ferromagneet met transparante contacten. De spinpolarisatie  $P$  wordt niet alleen bepaald door de spinpolarisatie van de bulk ferromagneet, maar ook door de spinafhankelijke weerstand van de niet-magnetische strip over een spinrelaxatielengte. De spinrelaxatielengte is de afstand die een elektron kan afleggen, voordat het zijn oorspronkelijke spinrichting verliest.

## Spin-relaxatie

De grootte van de spinophoping ( $\mu_\uparrow - \mu_\downarrow$ ) aan het F/N grensvlak wordt begrensd door spin-flip-processen, waarbij een spin-up-elektron wordt omgezet in een spin-down-elektron. Hoe groter het verschil ( $\mu_\uparrow - \mu_\downarrow$ ), hoe groter de spinrelaxatiestroom. Wanneer de spinrelaxatiestroom net zo groot is als de injectie van spinstroom ( $I_\uparrow - I_\downarrow$ ), stelt zich een stationaire situatie in. Uit de experimenten blijkt dat deze stationaire situatie wordt bereikt bij een spinophoping van ongeveer  $\mu_\uparrow - \mu_\downarrow = 10 \mu\text{eV}$  met een geïnjecteerde stroom van  $I = I_\uparrow + I_\downarrow = 100 \text{ mA}$  en  $P = 11\%$ . Ter vergelijking: een typische metallische ferromagneet met een exchange-energie van 1 eV heeft een magnetisatie van  $\sim 1$  Tesla. Daarentegen 'produceert' een spinophoping van  $\mu_\uparrow - \mu_\downarrow = 10 \mu\text{eV}$  in een Cu of Al strip maar een magnetisatie van  $\sim 5 \mu\text{Tesla}$ . Dit is zelfs kleiner dan het aardmagnetisch veld van ongeveer  $60 \mu\text{Tesla}$ . De eis om een spinrelaxatiestroom te verkrijgen die gelijk is aan de geïnjecteerde spinstroom resulteert in een gevonden spinrelaxatietijd  $\tau_{sf}$  van enkele tientallen picoseconden in Cu en ongeveer 100 picoseconden in Al.

De experimenten leren dat ongeveer na 1000 verstrooiingsprocessen de elektronspin zijn oorspronkelijke richting heeft verloren. Merk op dat juist dankzij het feit dat de spin vele elastische en inelastische verstrooiingsprocessen overleeft, het überhaupt mogelijk is om in diffuse geleiders te kijken naar spintransport. De afstand die een elektron kan afleggen binnen de spinrelaxatietijd is de spinrelaxatielengte  $\lambda_{sf} = \sqrt{D\tau_{sf}}$ , met  $D$  de diffusieconstante van de Cu of Al strip. De gevonden spinrelaxatielengtes in Cu and Al bedragen 350 nm en respectievelijk 600 nm bij kamertemperatuur en  $1 \mu\text{m}$  en respectievelijk  $1.2 \mu\text{m}$  bij  $T = 4.2 \text{ K}$ . Het blijkt dat bij kamertemperatuur de spinrelaxatielengtes in Cu en Al fundamenteel gelimiteerd zijn

tot  $\approx 1 \mu m$  door phononverstrooiingsprocessen.

De fysische achtergrond van de spin-flip-processen ligt in het feit dat in metalen de spin geen goed gedefinieerd kwantumgetal is. Door de spin-baan koppeling raken de spin-up- en spin-down- Blochtoestanden met elkaar vermengd. Omdat de spin-baan koppeling een vrij kleine verstoring vormt ten opzichte van de kinetische energie, wordt maar een klein beetje van een spin-down karakter in een overwegend spin-up-eigentoestand gemengd. Hierdoor kunnen we nog steeds van 'spin-up'- en 'spin-down'-elektronen spreken. Echter, door middel van verstrooiingsprocessen kan deze vermenging worden veranderd. Dit mechanisme voor de verstrooiing van de spin in metalen wordt het Elliot-Yafet-mechanisme genoemd.

### **Elektrische detectie van de geïnduceerde magnetisatie**

De grootte van de geïnduceerde magnetisatie of spinophoping in de niet-magnetische strip (N) is elektrisch te meten. Hiertoe wordt een tweede ferromagnetische strip (F2) op een afstand korter dan een spinrelaxatielengte vanaf het spin-injectie punt (F1) aan N gekoppeld. Omdat de koppeling van F2 met de spin-up- en spin-down-elektronen in N van verschillende sterkte is - veroorzaakt door het verschil in de weerstand voor de spin-up- en spin-down-elektronen - heeft F2 een voorkeur voor of  $\mu_{\uparrow}$  of  $\mu_{\downarrow}$ , al naar gelang de magnetisatierichting van F2 ten opzichte van de geïnjecteerde magnetisatie. De gemeten spanning van F2 zal daarom verschillen met de gemeten spanning van een niet-magnetische detector strip (N). Deze laatste meet weliswaar op precies dezelfde positie, maar is in gelijke mate gevoelig voor  $\mu_{\uparrow}$  en  $\mu_{\downarrow}$ , waardoor deze precies de helft van het verschil tussen  $\mu_{\uparrow}$  en  $\mu_{\downarrow}$  weergeeft. Afhankelijk van de magnetisatieconfiguratie (parallel/antiparallel) van de F2 en F1 strips, zal F2 daarom een grotere/kleinere spanning meten ten opzichte van N.

Voor het detecteren van de spinophoping geldt ook dat dit beter gaat via een  $Al_2O_3$  tunnelbarrière dan via transparante contacten. Door de  $Al_2O_3$  tunnelbarrière is de verstoring van de spinophoping in N geringer vanwege de hogere weerstand. De hogere weerstand voorkomt dat tegengesteld lopende spin-up- en spin-down-stromen vanuit het ferromagnetische spanningscontact de spinophoping in N doen verminderen.

Een opmerkelijk aspect van de gebruikte devicegeometrie is dat de spinophoping van F1 naar F2 wordt getransporteerd zonder dat er een netto stroom tussen F1 en F2 loopt. Dit komt omdat de in tegengestelde richting lopende spin-up- en spin-down-stromen even groot zijn. Aangezien er geen netto stroom loopt daar waar de detectie van spinophoping plaatsvindt, meet het niet-magnetisch spanningscontact (N) ook geen spanning. In de afwezigheid van spinophoping zou het ferromagnetische spanningscontact (F2) ook "nul" spanning meten. Echter in het experiment blijkt dat wel

degelijk een spanning wordt gemeten tussen F2 en N. Deze kan alleen verklaard worden door een onbalans in de spin-up- en spin-down-populaties van de niet-magnetische strip.

### **Het draaien van de magnetisatie in het aluminium: spin precessie**

De analogie tussen de elektronspin en een draaitol heeft het mogelijk gemaakt om naar spinprecessie te kijken. Een (draaiende) draaitol valt onder invloed van de zwaartekracht niet om, maar voert een langzame rondgaande beweging uit, die precessie wordt genoemd. Een soortgelijk effect treedt ook op bij de elektronspin, maar nu onder invloed van een aangelegd magnetisch veld, de zogenaamde "Larmor precessie". In het onderzoek is aangetoond dat het mogelijk is de richting van de elektronspin, op zijn weg door de niet-magnetische strip, op een gecontroleerde manier te kunnen laten draaien (precederen). Het blijkt dat de spinrichting gemiddeld 180 graden kan worden gedraaid, waardoor de oorspronkelijke richting van de geïnduceerde magnetisatie is omgedraaid. Er treedt echter ook een demping op van het oscillerende signaal. Deze wordt veroorzaakt door het diffuse karakter van de niet-magnetische strip. Er bestaan veel verschillende paden voor de elektronen om van F1 naar F2 te reizen en bij elke van deze paden behoort een andere precessiehoek. Hierdoor wordt de gemiddelde precessiehoek op den duur uitgemiddeld, hetgeen leidt tot een demping van het signaal.

### **Spinophoping aan een ferromagneet-supergeleider grensvlak**

In het laatste hoofdstuk wordt theoretisch beschreven dat spinophoping ook plaatsvindt aan een transparant grensvlak van een ferromagneet (F) en een supergeleider (S). Dit wordt veroorzaakt door de omkering van de spinrichting in het Andreev-reflectieproces. Het Andreev-reflectieproces beschrijft hoe een elektrische stroom van ongecorrleerde elektronen op een F/S grensvlak wordt omgezet in een supergeleidende stroom van Cooper paren en omgekeerd. Een inkomend spin-up-elektron kan alleen de supergeleider binnen gaan, als hij een ander spin-down-elektron met zich meeneemt. Het feit dat de spin-up- en spin-down-elektronen niet in gelijke mate voorkomen in de ferromagneet levert een bottleneck op voor het Andreev-reflectieproces. Dit uit zich in een spinophoping aan het F/S grensvlak.