

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/43299> holds various files of this Leiden University dissertation

Author: Voltan, Stefano

Title: Inducing spin triplet superconductivity in a ferromagnet

Issue Date: 2016-09-29

SAMENVATTING

Het combineren van ferromagnetisme en supergeleiding kan leiden tot de ontwikkeling van een hele nieuwe generatie van technologie, met unieke en krachtige eigenschappen (laag stroomverbruik, snel schakelen, niet-vluchtig), zogenoemde *supergeleidende spintronica*. De ontwikkeling hiervan is echter een uitdaging omdat supergeleiding en ferromagnetisme op microscopisch niveau intrinsiek onverenigbaar zijn. In een conventionele supergeleider bestaat de (super)stroom uit elektronen gekoppeld in zogenoemde *Cooper-paren*, met hun spins antiparallel aan elkaar uitgelijnd. In een ferromagneet echter zijn de spins parallel, vanwege de zogenaamde *exchange wisselwerking*. Wanneer een superstroom (een stroom van Cooper-paren) in een ferromagneet wordt geïnjecteerd, dwingt de wisselwerking de spins parallel, en de superstroom verdwijnt snel, binnen enkele nanometers. Dat gebeurt niet als een ongewoon type superstroom wordt gegenereerd: de zogenaamde *spin triplet* superstroom. In de triplettoestand staan de spins van de elektronen van de Cooper-paren parallel aan elkaar, en daarom worden ze niet “verstoord” door de exchange wisselwerking: als de triplet superstroom in de ferromagneet wordt geïnjecteerd, kan die veel langer overleven, tot honderden nanometers, in een toestand waar ferromagnetisme en supergeleiding coëxisteren. Het resultaat is een superstroom, dus zonder dissipatie, die bovendien spin-gepolariseerd is. De vraag is hoe men een dergelijke triplettoestand kan genereren. Het antwoord werd meer dan tien jaar geleden voorgesteld: als de magnetisatie van de ferromagneet inhomogeen is aan het grensvlak met de supergeleider, kan de standaard superstroom in de triplet worden omgezet. Hoewel het theoretische beeld eenvoudig is, is een experimentele uitvoering van de vereiste voorwaarden niet triviaal. In de afgelopen tien jaar hebben verschillende experimenten indirect het bestaan van lange-dracht supergeleiding in ferromagnetische lagen aangetoond, maar vele nog onbeantwoorde vragen stonden een volledige beheersing van het mechanisme in de weg. Het werk beschreven in dit proefschrift heeft tot doel om dit mechanisme te onderzoeken, voor een beter begrip en om het opwekken van triplet superstromen verder te optimaliseren.

In **Hoofdstuk 1** en **2** introduceren we de lezer in het onderzoeksonderwerp, geven de motivatie voor dit werk en een kort overzicht van de fundamentele theoretische concepten die de fysica van supergeleiding, ferromagnetisme en de interactie tussen beide beschrijven. In de volgende hoofdstukken bestuderen we de elektrische eigenschappen van kleine hybride structuren die voornamelijk bestaan uit supergeleidende en ferromagnetische lagen. Door het meten van de elektrische weerstand van deze structuren als functie van parameters zoals de temperatuur of het aangelegde magnetische veld, kan belangrijke informatie worden verkregen over de toestand van de (super)geleiding

in de verschillende lagen. In dit proefschrift onderzoeken we drie verschillende soorten structuren, om verschillende aspecten die verband houden met de tripletgeneratie te adresseren.

In **Hoofdstuk 3** en **4** richten we ons op de studie van permalloy, als een mogelijke generator van triplet supergeleiding. Permalloy is een legering van nikkel en ijzer ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) en is een “zachte” ferromagneet. Bij depositie van een dunne metaal film onder specifieke experimentele omstandigheden, kan permalloy een bijzondere vorm van magnetisatie laten zien, die sterk inhomogeen is. In **Hoofdstuk 3** bestuderen we in detail de magnetische eigenschappen van permalloy, met verschillende experimentele technieken. Drie verschillende regimes worden geïdentificeerd, als functie van de laagdikte: homogeen (H; voor de dunste films), *emerging stripe domain* (ESD; voor gemiddelde dikte) en het *stripe domain* regime (SD; dikste films). Terwijl het eerste en het laatste regime welbekend en gekarakteriseerd zijn in de literatuur, heeft het *emerging stripe* regime bijzondere kenmerken, en het is nog niet eerder bestudeerd. In **Hoofdstuk 4** laten we zien dat deze tussenliggende en ongrijpbare magnetische toestand de beste voorwaarden voor tripletgeneratie biedt, als deze in contact wordt gebracht met een supergeleider. We bestuderen hoe het kritische magneetveld afhangt van de temperatuur voor dubbellagen niobium/permalloy en tripellagen niobium/permalloy/niobium. De resultaten tonen aan dat, wanneer permalloy in het ESD regime is, de supergeleidende toestand over langere afstanden kan doordringen in de ferromagneet, omdat hij in de triplettoestand wordt omgezet. In deze structuren is het mechanisme voor tripletgeneratie intrinsiek aanwezig in de ferromagneet, zonder de noodzaak van extra lagen. Dat is van belang voor toepassingen, hoewel de nog niet goed begrepen aard van de magnetische toestand het moeilijk maakt hier goed controle over te hebben. Dat vereist verder onderzoek.

In **Hoofdstuk 5** en **6**, wordt aandacht besteed aan zogenaamde *supergeleidende triplet spin valves*. Een spin valve (“spin klep”) is in het algemeen een meerlagige structuur waar de elektrische geleidbaarheid afhankelijk is van de magnetische (spin) oriëntatie van twee verschillende ferromagnetische lagen: de *aan-* (lage weerstand, stroom vloeit) of *uit-* (hoge weerstand, stroom geblokkeerd) toestand wordt geschakeld door het veranderen van de relatieve orientaties. Een supergeleidende triplet spin valve bestaat uit een supergeleidende laag (de legering MoGe, in dit specifieke geval) naast twee ferromagnetische lagen. De twee lagen worden respectievelijk de *mixer* laag (enkele nanometers dik en gebruikt om de inhomogeniteit te verschaffen) en de *drainage* laag (veel dikker, waarin de supergeleidende toestand wordt geïnduceerd) genoemd. Hier is het aan/uit-mechanisme verbonden met de tripletgeneratie: wanneer de magnetisaties van de twee ferromagneten niet opgelijnd zijn, worden lange-afstand tripletcorrelaties

gegenereerd en geïnjecteerd in de drainage ferromagneet (*aan* toestand); als de magnetisaties parallel staan is er geen tripletgeneratie, en conventionele supergeleiding kan niet doordringen in de ferromagneet (*uit* toestand). De lange-afstand penetratie (dus de tripletgeneratie) kan worden afgeleid uit de verandering van de supergeleidende eigenschappen van de structuren, met name een verandering in de gemeten kritische temperatuur (of kritische veld). Het belang van de gepresenteerde resultaten houdt verband met de keuze van de drainage laag, chroomdioxide (CrO_2). CrO_2 is bijzonder omdat het 100 % spingepolariseerd is, waardoor een (veel) langere levensduur van de tripletcorrelaties bereikt wordt. Als gevolg daarvan is het triplet spin-valve effect, gemeten door de variatie van de kritische temperatuur, tenminste een orde van grootte sterker dan wat eerder gerapporteerd werd voor conventionele ferromagneten. Dit is het belangrijkste resultaat van **Hoofdstuk 5**, waarin we ook de cruciale rol van de interfacetransparantie tussen de lagen belichten. In **Hoofdstuk 6** bestuderen we de afhankelijkheid van de dikte van de mixer laag, het fenomeen van spinaccumulatie op de interface, en hoe de tripletgeneratie sterke invloed heeft op het supergeleidend kritisch veld. In het algemeen tonen de resultaten duidelijk de effecten van de generatie van tripletsuperstromen en benadrukken ze de mogelijkheden die CrO_2 kan bieden voor de ontwikkeling van spintronische toepassingen.

In **Hoofdstuk 7** zijn *Josephson-juncties* de onderzochte structuren. Een Josephson-junctie bestaat uit twee supergeleiders gescheiden door een ander materiaal, met verschillende dikte of lengte. Als de superstroom, die aan de ene zijde van de junctie wordt gegenereerd, door de tussenlaag kan stromen zonder te worden onderdrukt, zijn de twee supergeleiders gekoppeld. Hierdoor heeft de hele structuur nul weerstand en zijn bijzondere kwantummechanische effecten zichtbaar. In dit hoofdstuk bekijken we niet direct de tripletgeneratie, maar bestuderen we meer in het algemeen het effect van een ferromagneet op de Josephson koppeling. In de gemeten structuren is de tussenlaag tussen de supergeleiders (niobium) een dubbellaag van een normaal metaal (koper) en een veel dunnere ferromagneet (kobalt). Wanneer alleen koper aanwezig is, kan de superstroom door het normale metaal vloeien en is er koppeling over lengtes tot enkele honderden nanometers. Enigszins verrassend, wanneer de dunne ferromagnetische laag wordt toegevoegd *onder* het normale metaal, wordt de koppeling sterk beïnvloed. De studie geeft een beter inzicht in de rol van de ferromagneet op de supergeleiding en verschaft nuttige informatie over de specifieke geometrie, die ook in experimenten wordt gebruikt waarin tripletsupergeleiding wordt bestudeerd. Dit hoofdstuk samen met het voorgaande, vormt een bijdrage aan het bevorderen van kennis, op de weg naar de ontwikkeling van een nieuwe, betrouwbare en krachtige technologie, supergeleidende spintronica.

