

University of Groningen

Magnon spintronics in non-collinear magnetic insulator/metal heterostructures

Aqeel, Aisha

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:

2017

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

Citation for published version (APA):

Aqeel, A. (2017). *Magnon spintronics in non-collinear magnetic insulator/metal heterostructures*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. Rijksuniversiteit Groningen.

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

Het beheersen van de generatie, de verspreiding en de detectie van pure spinstromen is de essentie van het onderzoeksgebied van magnonspintronica. In dit proefschrift onderzoek ik pure spinstromen die worden opgewekt in een normaal metaal en spinstromen die getransporteerd worden door thermisch gegenereerde magnonen in magnetische isolatoren. Ik onderzoek deze spintronische fenomenen in verschillende systemen: een tweelaags systeem bestaande uit een laag yttriumijzergranaat (YIG) en een laag platina (Pt) (Hoofdstuk 3) en verschillende non-collineaire magnetische tweelaagse isolator|PT-systemen (Hoofdstuk 4, 5). Spinstromen worden gedreven door zowel de ladingstroom en temperatuurgradinten. Ik bestudeer ook de groei van de niet-collineaire magnetische isolatoren (Hoofdstuk 7). Bovendien onderzoek ik de rol van de altijd aanwezige achtergrondbijdragen in deze spintronische experimenten door gebruik te maken van een magnetische sensor op basis van een muonspectroscopietechniek (Hoofdstuk 6).

Het elektron kan worden beschouwd als een deeltje met lading en de magnetische eigenschap "spin". Het gedraagt zich als een kleine magneet met een intrinsiek magnetisch moment. De stroom elektronen (laadstroom) gaat dus automatisch samen met een stroom van spins, d.w.z. een spinstroom. In paramagnetische metalen is het aantal elektronen met spin in een bepaalde richting (bijvoorbeeld "spin-up" elektronen) gelijk aan het aantal elektronen met spin in de tegengestelde richting ("spin-down" elektronen). Hierdoor transporteren deze laadstromen geen netto spinstroom. In ferromagnetische (ferrimagnetische) materialen wijzen de meeste elektronspins in n richting, wat het materiaal magnetisch maakt. Daardoor draagt een laadstroom in een magnetisch materiaal tegelijkertijd een spinstroom. Deze spinstroom kan worden genjecteerd in een direct aangrenzend niet-magnetisch metaal. Het meest complexe aspect van het werken met spinstromen is dat deze genjecteerde spinstromen door interactie met hun omgeving kunnen vervallen over zeer korte afstanden (in de orde van enkele honderden nanometers). De relatie tussen laad- en

spinstroomtransport heeft geleid tot op spin-gebaseerde elektronica, beter bekend als spintronica. Recente ontwikkelingen op het gebied van de spintronica laten zien dat pure spinstromen loodrecht op een laadstroom kunnen worden gegenereerd.

Dit effect staat bekend als het spin-Hall-effect (SHE). In het SHE wordt een bewegend elektron in een paramagnetisch metaal afgebogen van zijn oorspronkelijke baan (langs de stroomrichting van de laadstroom) door de spin-baaninteractie (een interactie van de spin (intrinsieke impulsmoment) met zijn baanimpulsmoment). De afbuigingsrichting is tegengesteld voor elektronen met spin up en spin down. Wanneer er in materialen met een sterke spin-baankoppeling (zoals zware metalen als Pt) een laadstroom stroomt, buigen hierdoor de elektronen met tegengestelde spins in verschillende richtingen af, wat resulteert een spinstroom loodrecht op de richting van de laadstroom. Het omgekeerde effect bestaat ook (ISHE), waarin een spinstroom wordt omgezet in een laadstroom die er loodrecht op staat.

Spinstromen kunnen ook door magnetische isolatoren stromen, waarin de spinstroom getransporteerd wordt door magnetische excitaties bekend als magnonen. De relatie tussen spinstromen in metalen en spinstromen in isolatoren heeft geleid tot een nieuw onderzoeksgebied, bekend als "magnonspintronica". In dit proefschrift wordt de overdracht van spinstromen over het grensvlak van metaal|magnetische isolator onderzocht door twee effecten: het spin-Hall-magneetweerstandseffect (SMR) en het spin-Seebeckeffect (SSE). In het SSE wordt een temperatuurgradient aangebracht over een niet-magnetisch (NM)-ferromagnetische (FM) stapeling die thermische magnonen genereert in de FM-laag. Deze magnonen dragen een spinstroom met spin die gepolariseerd is langs de gemiddelde magnetisatierichting van de FM-laag. Vervolgens wordt deze spinstroom overgedragen aan de aangrenzende NM-laag en door het ISHE omzet in een laadstroom - bekend als het SSE-signaal. Omdat de spinstroom van de FM-laag naar de NM-laag gaat via het grensvlak, speelt de kwaliteit van het grensvlak een belangrijke rol.

Het eerste experiment (hoofdstuk 3) onderzoekt de rol van de kwaliteit van het grensvlak bij het SSE. In dit experiment werd een collineaire magnetische isolator yttriumijzergranaat (YIG) onderzocht. In dit systeem kunnen alle magnetische momenten gemakkelijk worden uitgelijnd in de richting van een aangebracht magnetisch veld (met magnetische veldsterkte van enkele millitesla).

Voordat de Pt-lagen op de YIG films werden aangebracht, werden verschillende oppervlakken van YIG voorbereid door deze te polijsten met grove of zachte polijstdeeltjes van verschillende grootte. Het aanbrengen van een temperatuurgradient over de Pt|YIG stapelingen wordt gedaan door externe verwarmingselementen. Interessant is dat het SSE-signaal (dat waargenomen wordt in de NM-laag) afhangt van de oppervlakteruwheid van de YIG-laag en het type polijstmateriaal (d.w.z., grove of zachte polijstdeeltjes).

Een tweede experiment omvat het gelijktijdig detecteren van de SMR- en SSE-

signalen in de NM|FM stapelingen. Bij SMR verandert de weerstand van de NM-laag afhankelijk van de magnetisatierichting van de FM-laag eronder. In dit effect spelen het SHE en het ISHE beide een rol. Dit effect wordt gemeten door het NM|FM-systeem te draaien in een magnetisch veld, terwijl de weerstand van de NM-laag parallel aan (of loodrecht op) de aangebrachte stroomrichting gemeten wordt. Belangrijk is dat dit effect gevoelig is voor de oppervlaktemagnetisatie van de magnetische laag, wat het mogelijk maakt om de magnetisatierichting van deze isolerende laag elektrisch te detecteren. Door Jouleopwarming als gevolg van de laadstroom die door de NM-laag gezonden wordt, ontstaat in het NM|FM-systeem een temperatuurgradint. Deze gradint leidt tot een SSE-signaal dat van het SMR-signaal kan worden gescheiden door middel van een techniek genaamd Lock-Indetectie. Dit is mogelijk doordat het SMR-signaal lineair schaalt met de aangelegde stroom, terwijl het SSE-signaal kwadratisch schaalt. Door gelijktijdig (maar los van elkaar) het SMR-signaal en het SSE-signaal te meten, wordt gedetailleerde informatie verkregen over de magnetisatie van het oppervlak en van de bulk van de magnetische laag. Dit experiment werd uitgevoerd op de Pt|YIG stapeling (hoofdstuk 4).

In de literatuur is vooral de collineaire magneet YIG onderzocht. Echter, magnetische isolatoren vertonen een grote verscheidenheid aan magnetische ordeningen, variërend van collineaire magnetische toestanden, waarin alle magnetische momenten uitlijnen langs n as, tot niet-collineaire toestanden, met magnetische momenten in complexe spinordeningen. In niet-collineaire magnetische isolatoren is meestal een groot magnetisch veld van verscheidene Tesla nodig om alle magnetische momenten uit te lijnen langs het aangelegde veld. In zulke magneetsystemen leiden de concurrerende magnetische interacties (spinfrustratie) tot complexe ordeningen, zoals driehoeken of spiralen, omdat een parallelle rangschikking van magnetische momenten energetisch ongunstiger is. Een voorbeeld van een dergelijk systeem is CoCr_2O_4 (CCO) (besproken in hoofdstuk 4) waarin bij lage temperaturen de spinfrustratie leidt tot een conische spiraalordering van magnetische momenten. Zelfs een magnetisch veld van 30T is niet voldoende om alle magnetische momenten volledig in de aangelegde veldrichting te laten wijzen. Om de gevoeligheid van het SMR en het SSE voor de magnetisatie van het oppervlak en de bulk van een magnetische isolator, heb ik experimenten uitgevoerd op het systeem bestaande uit een laag Pt en een laag CCO (hoofdstuk 4). Ik heb waargenomen dat de SMR en SSE beide grote onregelmatigheden tonen bij de magnetische overgangen waar de collineaire magnetisatie van de CCO-laag verandert in de conische spiraaltoestand. De grote veranderingen in de SMR- en SSE-signalen hebben betrekking op de niet-collineaire magnetisatie van de magnetisch isolerende CCO-laag. Dit experiment stelt dat metingen aan zowel het SMR en het SSE krachtige gereedschappen zijn die technieken als ferromagnetische resonantie en neutronenverstrooiing aanvullen om de magnetisatie dynamica van complexe oxides als CCO te analyseren.

Het derde onderzoek in mijn proefschrift is vergelijkbaar met het tweede waarin de SMR en SSE gelijktijdig gedetecteerd worden. In deze studie wordt een chirale niet-collineaire magnetische isolator gebruikt in plaats van een collineaire magneet. In chirale magneten kan de Dzyaloshinskii-Moriya interactie (DM) leiden tot een niet-collineaire magnetische ordening. In zulke magnetische systemen twist de DM-interactie de aanvankelijk collineaire rangschikking van magnetische momenten om een zekere chiraliteit. Dit leidt tot de vorming van chirale rotatieordeningen. Het voordeel van dergelijke magnetische systemen is hun rijke fase-diagram, waarin verschillende magnetische toestanden, zoals spiraalvormige, conische, skyrmionische en collineaire toestanden, (soms tegelijkertijd) bestaan bij verschillende temperaturen en aangelegde magnetische velden. Hiertoe onderzoeken we het tweelaagse systeem bestaande uit de chirale magnetische isolator Cu_2OSeO_3 (CSO) en Pt (hoofdstuk 5). Ik neem waar dat het SMR kan worden gebruikt voor de volledig elektrische detectie van verschillende magnetische overgangen van CSO, zoals de spiraalvormige en conische spiraaltoestanden. De resultaten tonen dat het SMR gevoelig is voor de oriëntatie van de golfvector van de spiraal en de grootte van de kegelhoek tussen de magnetische veldrichting en de magnetische momenten in de spiraal. Grote discontinuïteiten en afwijkingen worden waargenomen in het SMR wanneer de magnetische orde van CSO verandert van een toestand met een enkel magnetisch domein naar een multidomeintoestand. De SSE, die gegenereerd wordt door jouleopwarming, toont ook sterke gevoeligheid voor veranderingen in de magnetische ordening van CSO. In de toekomst zou het interessant zijn om deze technieken (SMR en SSE) toe te passen voor detectie van nog complexere rotatietexturen, zoals het skyrmionkristal in deze chirale magneten. Het vierde onderzoek dat in dit proefschrift (hoofdstuk 6) beschreven wordt, houdt zich bezig met de bepaling van de altijd aanwezige achtergrondbijdragen in deze spintronische experimenten. Hier gebruik ik een muonspectroscopietechniek ($\text{LE}\mu\text{SR}$) voor dit doel. De ($\text{LE}\mu\text{SR}$) is een magnetische sonde en gevoelig voor kleine magnetische velden in de orde van 0,1 mT. Deze techniek kan worden gebruikt om door stroom genduceerde velden te detecteren, bijvoorbeeld velden die veroorzaakt worden door de spins in het SHE, Oerstedvelden of velden als gevolg van nabijheidseffecten op verborgen grensvlakken. In dit experiment wordt een Au|YIG dubbellaag gebruikt om hierin de diepteafhankelijke magnetische velden te bestuderen. Ik vond dat de ($\text{LE}\mu\text{SR}$) kan worden gebruikt om de kleine magnetische velden in de orde van 0,04 mT waar te nemen die in verband staan met de achtergrondsignalen die aanwezig zijn vanwege de grensvlakruwheid en Oerstedvelden.

In het laatste hoofdstuk van dit proefschrift (hoofdstuk 7) wordt een nieuwe methode voor de groei van grote eenkristallen van de chirale magnetische isolator CSO gedemonstreerd. Ik heb ontdekt dat met deze methode zowel links- als rechtshandige kristallen van CSO verkregen kunnen worden. De kristallen hebben

een uitstekende kwaliteit, gemeten door eenkristalröntgendiffractie en geverifieerd door het waarnemen van de aanwezigheid van hogere harmonische modi in de ferromagnetische resonantiedata. Diezelfde kristallen zijn in dit proefschrift gebruikt voor de spintronische experimenten beschreven in hoofdstuk 5. Uitgebreid onderzoek naar de magnonspintronische effecten van collineaire magnetische isolatoren is reeds gepubliceerd. De experimenten in dit proefschrift bieden begrip van spintronische verschijnselen die in verband staan met de opwekking en detectie van spinstromen in niet-collineaire magnetische isolatoren met complexe magnetische spinstructuren, zoals helices en skyrmions. Daarnaast is er een nieuwe route naar het groeien van hoogwaardige eenkristallen van niet-collineaire magneten beschreven samen met spintransportexperimenten in deze kristallen. Dit onderzoek leidt tot nieuwe inzichten met betrekking tot de gevoeligheid van het SMR voor de magnetisatie van het oppervlak en de kegelhoek van spinspiralen. De combinatie van deze resultaten en het verbeterde begrip van de gerelateerde natuurkunde van spintransport in niet-collineaire spinstructuren leidt tot nieuwe mogelijkheden om nanomagnetische structuren, zoals domeinwanden en skyrmionen, elektrisch te detecteren en te manipuleren. Een techniek zoals SMR, waarmee men nano-objecten kan waarnemen door het meten van elektrische stromen, zou onmisbaar zijn voor het gebruik van skyrmionen en andere topologische defecten als informatiedragers in de volgende generatie van spintronica.

