

University of Groningen

Controlled magnon spin transport in insulating magnets

Liu, Jing

DOI:
[10.33612/diss.97448775](https://doi.org/10.33612/diss.97448775)

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:
2019

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

Citation for published version (APA):

Liu, J. (2019). *Controlled magnon spin transport in insulating magnets: from linear to nonlinear regimes*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen. <https://doi.org/10.33612/diss.97448775>

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

Magnons zijn quasiparticle representaties van spin-golven, die collectieve excitaties van een magnetisch systeem beschrijven. Ze kunnen zich verplaatsen en dragen informatie in elektrisch isolerende en magnetisch geordende materialen, d.w.z. magnetisch isolatoren. Een van de bekendste voorbeelden is yttrium-ijzer-granaat (YIG) door zijn unieke kleine magnetische demping en lange magnon-levensduur. Magnons dragen integer spin, dus het zijn bosondeeltjes en gehoorzamen de Bose-Einstein statistieken. Als gevolg hiervan wordt het transport van magnonen beïnvloed door het hele spectrum, van het magnon-band minimum tot het energieniveau dat overeenkomt met de thermische energie $\sim k_B T$.

Afhankelijk van de golflengte wordt het magnonspectrum gedomineerd door twee soorten energien: In het regime met lange golflengten is dipolaire energie dominant, waarbij dipolaire magnonen, meestal met GHz-frequenties, kunnen worden opgewekt door microgolfvelden. Ter vergelijking, in het kortegolflengtere regime domineert uitwisselingsenergie: Uitwisselingsmagnons hebben typisch THz-frequenties. Gedurende de hele thesis, om de transporteigenschappen van magnonen te bestuderen, wordt een elektrische methode gebruikt om magnonen te genereren met energien tot $k_B T$. Alle experimenten werden uitgevoerd bij kamertemperatuur, hetgeen overeenkomt met frequenties van ~ 6 THz.

De magnon-transportopstelling bestaat uit twee strips van een zwaar metaal (HM) zoals platina (Pt) of tantaal (Ta) bovenop een monokristallijne YIG-film, die op een gadolinium gallium granaat (GGG) wordt gegroeid, doormiddel van vloeistofepitaxie (LPE). Een kleine wisselstroom wordt door de eerste HM-strip (de magnon-injector) gestuurd, waar het spin Hall-effect (SHE) de elektrische stroom omzet in een dwarse spinstroom. Dit leidt tot een elektrische spinaccumulatie op de HM-grensvlak die in contact staat met de YIG film. Op de HM|YIG-grensvlak interacteren de binnenkomende mobiele s-orbitale elektronen van de HM zich met de gelocaliseerde d-orbitale elektronen van de YIG. Vanwege het verschil in geleid-

baarheid op het grensvlak kunnen de mobiele elektronen zelf niet diep in de isolator gaan. De spins kunnen echter worden overgedragen, waardoor in YIG magnons worden gegenereerd. De resulterende magnons verplaatsen zich in de YIG en kunnen worden opgepikt door de tweede HM-strip (de magnondetector), waar de gedetecteerde spinstromen worden teruggeleid naar een elektrische stroom via het inverse spin Hall-effect (ISHE), dat het omgekeerde proces van de SHE is. Onder een open circuit wordt een ISHE-spanning gemeten. Aangezien de stroomtoevoer en de spanningsmeting op twee verschillende HM-strips worden uitgevoerd, wordt dit experiment aangeduid als niet-lokale meting, wat verschillend is met een "lokaal" experiment waarbij het injecteren en detecteren van elektrische signalen op dezelfde plaats plaatsvindt. Deze niet-lokale geometrie wordt ook gebruikt in het spintransport-experiment voor geleidende systemen. Samenvattend zijn deze elektrische magnon-injectie- en detectieprocessen de belangrijkste methoden om de magnon-spintransporteigenschappen in dunne YIG-films in dit proefschrift te karakteriseren.

Naast de uitwisseling-gekoppelde elektrische magnoninjectie op de HM|YIG-grensvlak, creëert de Joule-opwarming door de elektrische stroom door de magnoninjector een temperatuurgradiënt, die een magnonstroom binnen de YIG aanstuurt vanwege het spin Seebeck-effect (SSE). De temperatuurgradiënt strekt zich voorbij de YIG-film uit naar GGG, echter kunnen de resulterende magnons de GGG-paramagneet niet binnendringen maar hopen zich op op het YIG|GGG-grensvlak. Dit geeft aanleiding tot een magnon-depletierégime nabij de magnoninjector en een magnonaccumulatiegebied aan de onderkant van de YIG-film nabij de injector, die beide bijdragen aan de ISHE-spanning gemeten door de detector maar met tegengestelde tekens. Afhankelijk van de dikte van de YIG-film en de afstand tussen de injector en de detector, zijn de depletie/accumulatie van magnon-spinstromen dominant voor kleine/grote afstand tussen de injector en detector. Deze processen worden thermische magnoninjectie en elektrische detectie genoemd. In vergelijking met de elektrische injectie en detectie is de propagatieafstand van de thermisch gegenereerde magnonen minder goed gedefinieerd.

Met een lock-in techniek kunnen de elektrisch en thermisch gegenereerde magnons gelijktijdig worden gedetecteerd. Ze worden gemeten als de eerste en tweede harmonische signalen, die respectievelijk lineair en kwadratisch schalen met de wisselstroom door de injector. In een typisch experiment bevindt de te meten nanostructuur tussen een paar statische magnetische dipolen. Een statisch veld wordt toegepast om de magnetisatie van de YIG in het vlak van de film te oriënteren. Aangezien de elektrische injectie en detectie afhangen van de hoek van de YIG-magnetisatie ten opzichte van de HM-strip, wordt de nanostructuur geroteerd zodat de YIG-magnetisatie roteert ten opzichte van de HM-strip. In het bijzonder heeft de elektrische magnon creatie/absorptie de hoogste efficiëntie wanneer de YIG-

netmagnetisatie parallel/antiparallel is aan de SHE-gegenereerde elektronspinpolarisatie op de HM|YIG-grensvlak, die is georiënteerd langs het grensvlak en loodrecht op de HM-strip. Met andere woorden, wanneer de YIG-magnetisatie in het vlak loodrecht op de HM-strip staat, wordt de hoogste elektrische magnon injectie efficiëntie bereikt. Dit is ook het geval voor de elektrische detectie van magnonen: alleen de magnonspins loodrecht op de HM-strip kunnen bijdragen aan de ISHE-spanning gemeten langs de HM-strip. De hoek tussen het statische veld en de richting loodrecht op de HM-strip wordt gedefinieerd als α . Op basis van de hierboven beschreven relaties hebben elektrische magnon injectie en detectie beide een hoekafhankelijkheid van $\cos \alpha$. Daarom heeft het eerste harmonische signaal een hoekafhankelijkheid van $\cos^2 \alpha$ vanwege de elektrische injectie en detectie, terwijl het tweede harmonische signaal een hoekafhankelijkheid van $\cos \alpha$ vertoont, sinds de thermische injectie vanwege Joule-verwarming niet gevoelig voor de richting van de YIG-magnetisatie is. Deze niet-lokale spanningen worden genormaliseerd door de rms-amplitudes van de wisselstroom en wisselstroom in het kwadraat als respectievelijk eerste en tweede harmonische niet-lokale weerstanden. Hun amplitudes worden geëxtraheerd uit de veldhoekafhankelijke modulaties van respectievelijk $\cos^2 \alpha$ en $\cos \alpha$. Bovendien wordt het veld onder een vaste hoek vergroot en verkleint in metingen gecombineerd met een RF-opstelling.

De transporteigenschappen worden bestudeerd door het afstandsafhankelijke gedrag van de niet-lokale signalen: De HM|YIG|HM niet-lokale nanostructuren worden vervaardigd met verschillende afstanden tussen de injector en de detector, van tientallen nanometers tot tientallen micrometers. Voor Pt-nanostructuren, met toenemende afstanden, vervallen de niet-lokale signalen eerst geometrisch, d.w.z. als een functie van één over afstand, vervolgens exponentieel. Dit afstandsafhankelijke gedrag kan worden beschreven door een spin-diffusie-relaxatiemodel, dat ook is gebruikt om het spin-transport in metalen te verklaren. In het korteafstandsregime domineert het diffusieproces terwijl in het langeafstandsregime het relaxatieproces het overneemt. Uit de helling van het exponentiële verval kan een lengteschaal worden geëxtraheerd, die de afstand van magnon-spin-diffusie karakteriseert voordat relaxatie begint te domineren, wat wordt aangeduid als de magnon-diffusielengte λ_m . Bij kamertemperatuur is deze magnondiffusielengte ongeveer $10 \mu\text{m}$ voor 210 nm dik LPE monokristallijne YIG.

Het afstandsafhankelijke gedrag hangt niet alleen af van de geleidbaarheid van de magnonspin en de relaxatie-eigenschappen van de magnonspin, maar ook van de spinweerstand van de grensvlak, die voor metalen is aangetoond door toepassing van het spin-diffusie-relaxatiemodel. In *Hoofdstuk 5* wordt voor magnon-spin-transport de invloed van de grensvlak-weerstand op de HM|YIG-grensvlaken, of spin-mix-geleidbaarheid, bestudeerd met behulp van verschillende HM's: Pt en Ta. Ta|YIG-grensvlak heeft naar verluidt een hogere grensvlak-spinweerstand dan

de Pt|YIG-grenzvlak. Als gevolg hiervan vertoont het afstandsafhankelijke gedrag van Ta|YIG|Ta-apparaten alleen exponentieel verval in plaats van zowel geometrisch als exponentieel verval, wat kwalitatief consistent is met de voorspelling van het spin-diffusie-relaxatiemodel. Bovendien is een vergelijkbare magnondiffusielengte van $\sim 10 \mu\text{m}$ geëxtraheerd uit de resultaten van de Ta|YIG|Ta-apparaten. Bovendien hebben Pt en Ta spin-Hall-hoeken met tegengestelde tekens. Dit geeft aanleiding tot dezelfde en tegengestelde tekens van respectievelijk de eerste en tweede harmonische signalen. De reden is dat zowel elektrische injectie- als detectieprocessen betrekking hebben op de spin-Hall-hoek voor de eerste harmonische signalen, terwijl alleen de elektrische detectie dat doet voor de tweede harmonische signalen.

Na het vaststellen van de basis van magnon-spintransport wordt de niet-lokale methode toegepast om het anisotrope karakter van magnon-spintransport te bestuderen in *Hoofdstuk 4*. In analogie met de magnetoweerstand van het elektrontransport in magnetische metalen waar elektronen verschillende geleidbaarheden vertonen parallel en loodrecht op de richting van de magnetisatie, vertonen magnonen een soortgelijk magnetotransportgedrag. Dit karakter kan worden gemeten in zowel longitudinale geometrie waar de detector parallel is aan de injector, als transversale geometrie waarbij de injector zich aan een uiteinde van de detector bevindt en loodrecht op de detector. Ze worden respectievelijk magnon anisotropie magnetoresistentie (MAMR) en magnon planar Hall effect (MPHE) genoemd. Uit zowel MAMR- als MPHE-metingen zijn de anisotrope eigenschappen van de elektrisch gegenereerde magnonen gemeten: het verschil tussen de parallelgeleiding van de magnonen (σ_{\parallel}^m) en loodrecht (σ_{\perp}^m) voor de magnetisatie is ongeveer 5%, wat vergelijkbaar is met de magnetoweerstand van het elektrontransport in een metaal (ongeveer 2% voor Ni).

Tot nu toe vertoont magnontransport veel analoge eigenschappen met elektrontransport; als bosonische deeltjes kunnen echter magnonen alle energieën bijdragen aan het transport, maar niet in gelijke mate. De elektrische niet-lokale methode genereert thermische magnonen met energie tot 6 THz bij kamertemperatuur, waarvan is aangetoond dat deze aanzienlijk wordt beïnvloed door de populatie magnonen met GHz-frequenties die worden opgewekt door een microgolfveld in *Hoofdstuk 6*. Dit wordt bereikt door de niet-lokale nanostructuur bloot te stellen aan een rf-vermogen dat wordt geleverd door een on-chip stripline die is verbonden met een rf-voedingsbron. Bij de ferromagnetische resonantie (FMR) wordt het transport van thermische magnonen met meer dan 95% onderdrukt, terwijl bij een niet-FMR-toestand de niet-lokale signalen met meer dan 800% worden versterkt, namelijk de vier magnon interactie geeft aanleiding tot een populatie van band-minimum magnons. Bovendien wordt, wanneer de rf-frequentie samenvalt met het minimum van de magnonband, een kleine verhoging van de niet-lokale signalen waargenomen. Al deze verschijnselen geven aan dat thermische magnonen een rol spelen als een bad

voor de coherente GHz-magnonen zodat de coherente magnonen in dit bad kunnen worden gedempt en de populatie van de thermische magnonen kan vergroten. Anderzijds beïnvloedt de verdeling van de GHz-magnonen sterk de transporteigenschappen van de thermische magnonen, in het bijzonder de bezetting van de band-minimummagnonen, die zelf niet rechtstreeks bijdragen aan het transport omdat ze een groepssnelheid nul hebben. Hier is de RF-kracht al zo groot dat het de magneet in een zeer niet-lineair regime drijft, waar magnon-magnon-interactie een rol speelt.

Afgezien van het gebruik van RF-vermogen om de magnonpopulatie bij het GHz-regime te verbeteren, kan een gelijkstroom worden aangelegd op een derde elektrode (modulator) tussen de magnon-injector en de detector, zodat de thermische magnon-populatie wordt verhoogd door de elektrische magnon-generatie of verkleint. Als gevolg hiervan wordt de magnon-geleidbaarheid beïnvloed. Daarom wordt deze nanostructuur met drie aansluitingen een magnontransistor genoemd, waarbij de derde HM-strookmodulator als een poort fungeert: de magnontransporteigenschappen worden geregeld door de magnondichtheden te wijzigen. Dit "proof-of-principle" experiment is gerealiseerd op een 210 nm dikke YIG-film, waarbij het niet-lokale magnontransport van de injector naar detector is gemodificeerd door de SHE-geïnjecteerde magnons en de Joule-opwarming van de modulator. *Hoofdstuk 7* documenteert de karakteristieken van magnon-transistors op YIG-films van 10 nm: in het huidige lage gelijkstroomregime zijn vergelijkbare resultaten waargenomen, maar met veel hogere modulatie-efficiëntie dan de voorspelling gebaseerd op de resultaten van 210 nm dikke YIG-films. In het hoge gelijkstroomregime schaalde de modulatie niet meer lineair met de gelijkstroom door de modulator. Er zijn echter nog steeds open vragen over de oorsprong van deze niet-lineariteit en de oorzaak van de overgang van lineaire naar niet-lineaire regimes.

