

University of Groningen

Magnetic anisotropy induced novel phenomena in itinerant ferromagnet SrRuO₃ thin films

Zhang, Ping

DOI:
[10.33612/diss.260675656](https://doi.org/10.33612/diss.260675656)

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:
2023

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

Citation for published version (APA):

Zhang, P. (2023). *Magnetic anisotropy induced novel phenomena in itinerant ferromagnet SrRuO₃ thin films*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen.
<https://doi.org/10.33612/diss.260675656>

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

Spintronica is een van de meest aantrekkelijke en veelbelovende onderzoeksvelden voor toekomstige informatietechnologie, zowel op het gebied van informatie opslag als logische berekeningen. De materiaalkundige uitdaging die centraal staat in spintronica is gerelateerd aan het implementeren van permanent geheugen en computerapparaten met een hoge dichtheid en een magnetisatie die schakelt met een lage stroomsterkte en een redelijke thermische stabiliteit. De zoektocht naar materialen met een loodrechte magnetische anisotropie van welke het magnetisme gemanipuleerd kan worden met behulp van een elektrisch veld, is een actief onderzoeksg gebied in spintronica, voornamelijk voor toepassingen in magnetisch geheugen. Complexe oxides met een perovskiet kristalstructuur en hun onderlinge raakvlakken verstrekken een uitstekend platform hiervoor door de competitie van grondtoestanden die ontstaan door de wisselwerking tussen elektrische lading, spin en orbitalen. SrRuO_3 (SRO), de unieke ferromagnetische 4d overgangsmetaal oxide, is een belangrijk materiaal voor het ontwerpen van verscheidene verschijnselen dankzij de sterke samenwerking tussen elektron-elektron correlatie en spin-baan koppeling. De afstembaarheid van de magnetische anisotropie in heterostructuren gebaseerd op SRO verschaft bovendien mogelijkheden in het creëren van onconventionele kenmerken in zowel de magnetische als de magneto-transport eigenschappen. Deze dissertatie richt zich op de studie van nieuwe kenmerken in dunne SRO lagen en heterostructuren door middel van het afstemmen van de magnetische anisotropie van SRO.

De ferromagnetische en metallische eigenschap van SRO ontstaat door de sterke hybridisatie van de Ru 4d en O 2p banden waardoor de toestand dichtheid op het Fermi-niveau bepaald wordt. De magnetisch en elektronische eigenschappen van dunne SRO lagen zijn sterk afhankelijk van RuO_6 octahedrale distorsie dankzij de sterke correlatie tussen de fysische eigenschappen en kristalstructuur. Deze octahedrale distorsie kan bepaald worden door de modificatie van rek door middel van

verschillende substraten en laag diktes. In **hoofdstuk 4** wordt eerst een overzicht van het effect van epitaxiale rek en laag dikte op de magnetische eigenschappen van SRO geïntroduceerd, gevolgd door een beschrijving van de groei details van alle dunne SRO lagen beschreven in deze dissertatie. SrTiO_3 (STO) en LaAlO_3 (LAO), de meest gangbare substraten voor complexe oxides, zijn in ons onderzoek gebruikt als substraten met als doel om het effect van rek op de magnetisme in SRO te bestuderen. Middels het onderzoeken van de structuur en de elektronische eigenschappen van dunne SRO lagen met verscheidene diktes, bemerken we dat structurele onorderlijkheden onvermijdelijk zijn in het eerste stadium van het groeiproces van dunne SRO lagen. De micro structurele wanorde speelt mogelijk een belangrijke rol in de magnetische en magnetotransport eigenschappen als gevolg van de sterke elektronische correlatie in SRO. We verstrekken een uitlegging van het effect van epitaxiale rek en laag dikte op de magnetische eigenschappen van dunne SRO lagen om de magnetische anisotropie te bestuderen. Alle dunne SRO lagen hebben gemakkelijke magnetisatieassen dichtbij de uit-het-vlak richting doordat de epitaxiale SRO lagen $(110)_O$ zijn georiënteerd en hebben een sterke magneto-kristallijne anisotropie (MKA) in deze richting zoals geïntroduceerd in hoofdstuk 2. We nemen bovendien een gelijktijdig bestaan van een hoge-spin en lage-spin toestand waar in alle dunne SRO lagen, waarbij de hoge-spin toestand wordt gevormd in het raakvlak doormiddel van octahedrale distorsie. Voorts observeren we een afname van de saturatie magnetisatie per toenemende laagdikte. Het gelijktijdige bestaan van de hoge-spin en lage-spin toestand configuraties veroorzaakt een antiferromagnetische (AFM) koppeling van SRO in het raakvlak als gevolg en verzacht de magnetische hysteresis wat leidt tot een twee trede kenmerken in de M-H hysteresis. De resultaten in dit hoofdstuk duiden dat de magnetische anisotropie in dunne SRO lagen gekanteld is en dat het AFM karakter van de gemengde spintoestanden de magnetische dipoolmomenten kunnen vastklemmen in een bepaalde richting. Verder vertoont de magnetische anisotropie energie studie van SRO dat de hogere orde anisotropie constante nochtans een belangrijke rol speelt, terwijl deze nagenoeg verwaarloosbaar is in alternatieve systemen. Gebaseerd op deze kenmerken brengt dit mogelijkheden voort niet-collineaire spin texturen te exploreren in dunne SRO lagen.

Wanneer elektronen door een niet-collineaire magnetische textuur stroomt wordt er een Berry fase gegenereerd die op de stroom werkt als een effectief magnetisch veld, die een bijkomend aandeel veroorzaakt aan de Hall weerstand, bekend als het Topologische Hall Effect (THE) die kan worden geverifieerd middels een Hall transport studie. In **hoofdstuk 5**, epitaxiale SRO lagen op STO (001) substraten met diktes van ongeveer 8.7 nm zijn geselecteerd voor een Hall effect studie. De lagen zijn gepatroneerd in Hall staven met een $50 \mu\text{m}$ kanaal breedte na de structurele en magnetische kenschetsing. Systematische Hall effect metingen zijn gedaan op verschillende temperaturen en magnetische veld richtingen. We observeren karak-

teristische kenmerken van de THE in lagen met enkel SRO. De THE heeft een belangrijke aandeel in de soortelijke Hall weerstand in materialen die spin configuraties met topologische karakteristieken huisvesten, zoals bubbels en skyrmions. De onderzoeking van THE en Skyrmions zijn recentelijk gerapporteerd in uiterst dunne SRO lagen of uiterst dunne SRO/SrIrO₃ (SIO) tweelagen, waarbij de THE en verwachte skyrmions teweeggebracht zijn door de Dzyaloshinskii-Moriya Wisselwerking (DMW) op het raakvlak, geïnduceerd door sterke spin-baan koppeling (SBK) en gebroken inversie symmetrie. De relatief aanzienlijke dikte van de SRO lagen en de afwezigheid van een zwaar metaal maakt de DMW op het raakvlak in dit onderzoek een onwaarschijnlijke bron van deze topologische spin texturen. De transport eigenaardigheden vertonen daarnaast niet eerder vertoonde robuustheid ten aanzien van het roteren van een magnetisch veld en temperatuur variaties. We beschouwen de tot dusver genegeerde hogere orde MKA termen en de lange afstand magneto-dipolaire wisselwerkingen en schrijven deze toe aan magnetische bubbels met skyrmion topologie. Onze numerieke simulatie studies etaleren dat de skyrmion kristallen, geïnduceerd door magnetostatische wisselwerkingen, een beduidend grotere stabiliteit hebben dan eerder gedacht werd. Onze methode stelt ons in staat de vorm van skyrmions die ontstaan in het kristal te optimaliseren, in tegenstelling tot het (Kooy-Enz) model van magnetische bubbels met scherpe grenzen. Tegelijkertijd maakt onze methode het mogelijk de tijdrovende micromagnetische simulaties te omzeilen dusdanig dat een gedetailleerd fase diagram geconstrueerd kon worden voor dit type materialen. Deze nieuwe inzichten brengen niet alleen vooruitgang in skyrmion gebaseerde fysica, maar zijn actueel en verstrekken betekenisvolle gelegenheden om dergelijke raakvlakken te ontwerpen voor toekomstige toepassingen doormiddel van het uitbuiten van de complexe MCA die intrinsiek is voor deze materialen en de beïnvloeding door elektrisch en spin-baan velden.

Complexe oxides en hun raakvlakken verstrekken een uitgebreid platform om heterostructuren met loodrechte magnetische anisotropie te ontwerpen en, belangrijker nog, om de potentie dergelijke anisotropie af te stemmen middels verscheidene strategieën. De sterke temperatuur en hoeksafhankelijkheid van de meerdere anisotropie assen geven het ingewikkelde karakter aan van MKA in SRO. Aan de andere kant verstrekt het mogelijkheden om wenselijke anisotropie te ontwerpen gebruikmakend van passende technieken. De magnetische orde in SrMnO₃ (SMO) kan een opmerkenswaardige verandering ondergaan van een AFM orde naar ferromagnetisch doormiddel van het aanpassen van de groei omstandigheden, wat een af te stemmen magnetische uitwisselwerking verstrekt op het raakvlak tussen SMO/SRO, terwijl SRO een sterke MKA heeft die geneigd is om zich loodrecht te oriënteren op de laag oppervlakte. In de praktijk echter veroorzaken onverwachte wanorde of inhomogeniteiten meerdere anisotropie assen. Dergelijke SMO/SRO raakvlakken grijpt onze aandacht. In **hoofdstuk 6** onderzoeken we hoe verschillen

in zuurstof vacature-defecten op het heteroraakvlak van SMO/SRO de MKA in SRO sterk beïnvloedt. We ontwerpen twee verschillende SMO/SRO raakvlakken door zorgvuldig de groei omstandigheden te kiezen, zoals het afstellen van de zuurstof druk in SMO. Een systematische studie van de structuur, magnetisatie en hoek- en veldafhankelijke magnetotransport is uitgevoerd. We nemen waar dat een hogere zuurstof druk tijdens de SMO groei leidt tot een sterke enkele uit-het-vlak anisotropie as in SRO, terwijl zuurstof gebrekkig SMO een gekantelde anisotropie in SRO toebedeelt. Door de tweelagen resultaten met de enkele SRO laag die direct op het STO substraat is gegroeid te vergelijken, concluderen we dat een modificatie van de SBK sterkte doormiddel van het veranderen van de hybridisatie van Ru-4d en O-2p orbitalen in SRO leidt tot een duidelijke MKA ontwikkeling van een meerdere anisotropie assen naar sterke uit-het-vlak anisotropie wanneer de hoeveelheid zuurstof vacature-defecten in SMO zijn verminderd. Zoals verwacht is het THE signaal geobserveerd in het tweelagen monster met gekantelde anisotropie. Het optreden van het THE signaal is uitstekend in overeenstemming met de resultaten in hoofdstuk 5. In het monster met de sterke loodrechte anisotropie as in SRO is het THE echter niet geobserveerd. Desalniettemin is een dergelijk tweelagen systeem een veelbelovende bouwsteen voor spintronica toegepaste apparaten waarbij de MCA afgestemd kan worden en de magnetisatie bepaald kan worden, wat een nieuwe ontwerp strategie voor geheugen en bereken toepassingen verstrekt.

Het geheel in beschouwing nemend, bestuderen we in deze dissertatie uitgebreid de magnetisme en magnetotransport in dunne lagen met enkel SRO en SMO/SRO. We ondervinden niet-collineaire spin texturen in de SRO lagen met meerdere anisotropie assen. Tegelijkertijd bemachtigen we een sterke loodrechte anisotropie as in SRO door de raakvlak omstandigheden aan te passen. We veronderstellen dat onze bevindingen belangrijk inzichten verstrekken voor dergelijke raakvlakken voor toekomstige toepassingen, gebruikmakend van de intrinsieke complexe MKA van deze materialen en hun beïnvloeding door elektrische en spin-baan velden.