



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Towards superconducting spintronics with RuO<sub>2</sub> and CrO<sub>2</sub> nanowires

Prateek, K.

### Citation

Prateek, K. (2023, December 8). *Towards superconducting spintronics with RuO<sub>2</sub> and CrO<sub>2</sub> nanowires*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3666050>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3666050>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

# Samenvatting

$\text{CrO}_2$ , een halfmetallische ferromagneet, is al bijna twee decennia lang veelbelovend voor supergeleidende spintronica-toepassingen. Josephson-juncties gebaseerd op  $\text{CrO}_2$ , bestaande uit supergeleidende (S) contacten op ferromagnetische (F) structuren van  $\text{CrO}_2$ , hebben opmerkelijk hoge superstromen laten zien, van de orde van  $10^{10}$  A/m<sup>2</sup> over honderden nanometers. De ontwikkelingen op dit gebied zijn echter belemmerd door de metastabiele aard van  $\text{CrO}_2$  bij kamertemperatuur. Dit resulteert in een slecht gecontroleerde transparantie van het S/F-interface, die cruciaal is voor de generatie van de benodigde spin triplet paren. Dit proefschrift verkent het potentieel, de uitdagingen en mogelijke oplossingen om de problemen met  $\text{CrO}_2$ -devices aan te pakken.

Na een inleiding van het onderwerp in Hoofdstuk 2, bestuderen we in Hoofdstuk 3 de groei van hoogwaardige epitaxiale  $\text{CrO}_2$ -draden op een  $\text{TiO}_2$ -substraat met behulp van de Selective Area methode, gebaseerd op chemische dampafzetting. We hebben ons gericht op de draden die groeien langs de [001] c-as en [010] b-as van het substraat, respectievelijk de magnetisch gemakkelijke en moeilijke as van de draad. We hebben de morfologie van de draden onderzocht met behulp van transmissie-elektronenmicroscopie (TEM) met hoge resolutie, en ook hun fysische eigenschappen gemeten, met name de magnetoweerstand (MR) en het Anomale Hall Effect (AHE). TEM-beelden toonden aan dat de morfologie van de draden die langs de twee assen groeien zeer verschillend is. Voor draden die groeien langs de c-as (de 'gemakkelijke' draden), groeit het grootste deel van het  $\text{CrO}_2$  epitaxiaal op het  $\text{TiO}_2$ -substraat, maar sommige kleine regio's in de buurt van het interface van  $\text{TiO}_2$  en  $\text{CrO}_2$  hebben een andere kristaloriëntatie dan het  $\text{TiO}_2$ -substraat. De draad die langs de b-as groeit (de 'harde' draad) heeft veel kristalgebieden die allemaal ten opzichte van elkaar zijn geroteerd onder specifieke hoeken. MR-gegevens tonen dat de magnetisatie van de draden langs de gemakkelijke as zeer scherp schakelt, zelfs voor vrij grote draadbreedtes. In vergelijking hiermee laten MR-gegevens voor harde draden een afhankelijkheid van de breedte zien. Het AHE is verschillend voor de c-as draden en b-as draden, in tegenstelling tot balkjes geëitst in films met behulp van Ar-ionenetsen. We suggereren dat dit te wijten is aan een verschillende draadmorfologie op nanoschaal.

In Hoofdstuk 4 onderzoeken we het vasthouden ('pinnen') en loslaten ('depinnen') van een magnetische domeinwand (DW) in een nanodraad. De DW, een eindig-volume interface dat twee domeinen met verschillende magnetisatie-richtingen scheidt, wordt daarvoor aangebracht in een driehoekige vernauwing (inkeping) in twee ferromagneten. De ene is Permalloy, dat wordt gebruikt als referentiemateriaal, de andere is  $\text{CrO}_2$ , om een volledig spin-gepolariseerd materiaal te bestuderen. We hebben een opstelling ontworpen voor de injectie van hoog-frequent stroompulsen om de DW te depinnen. Over het algemeen blijkt dat de grootte van de inkeping de kritische stroomdichtheid  $J_c$  voor het depinnen beïnvloedt. Een diepe inkeping ( $> 50\%$  van de draadbreedte) verhoogt de weerstand van de DW, maar leidt ook tot een sterke DW verankering in zowel Py- als  $\text{CrO}_2$ -draden, wat depinnen moeilijk maakt. Bovendien blijken  $\text{CrO}_2$ -devices gevoeliger te zijn voor de diepte van de inkeping, waarbij een inkeping die 5% dieper is, in een draad van vergelijkbare grootte resulteert in een  $J_c$  die 2,5 keer hoger is. De kritische depinning-stroomdichtheden in  $\text{CrO}_2$  zijn van dezelfde orde van grootte als die in Py devices. Dit suggereert dat de hoge spin-polarisatie  $J_c$  niet noodzakelijkerwijs verlaagt, in tegenstelling tot sommige voorspellingen. Verder maten we de weerstand van de domeinwand (DWR) in  $\text{CrO}_2$  en bepaalden het bijbehorende weerstand-oppervlakte product  $RA_{DW}$ . We vinden we dat de DWR afneemt van 25 m $\Omega$  (corresponderend met een  $RA_{DW}$  van  $1.4 \times 10^{-16} \Omega\text{m}^2$ ) bij 10 K tot 18,2 m $\Omega$  ( $0.99 \times 10^{-16} \Omega\text{m}^2$ ) bij 80 K, om vervolgens weer toe te nemen tot ongeveer 23 m $\Omega$  bij 300 K. De stijging van de DWR boven 80 K kan worden toegeschreven aan spinwanorde die de overhand heeft over spinverstrooiing, wat mogelijk verband houdt met het verschijnen van skyrmion-achtige topologische defecten in de magnetische toestand van  $\text{CrO}_2$ . De waarden van  $RA_{DW}$  zijn vergelijkbaar met de waarden gevonden voor nanostructuren van  $(\text{La,Sr})\text{MnO}_3$ , een andere halfmetallische ferromagneet, maar ook met die van conventionele ferromagneten zoals Co en Py, wat suggereert dat volledige spinpolarisatie geen andere waarden geeft voor de DWR.

In Hoofdstuk 5 hebben we de Selective Area Chemical Vapor Deposition-methode gebruikt om nanodraden van  $\text{RuO}_2$  op  $\text{TiO}_2$ -substraten te laten groeien, vergelijkbaar met de groei van  $\text{CrO}_2$ -draden. Vervolgens karakteriseren we deze  $\text{RuO}_2$ -nanodraden door middel van elektrische en magnetotransportmetingen. De Hallmetingen wijzen op elektronachtige ladingdragers en interessant genoeg neemt de dichtheid van de ladingdragers af met de temperatuur, wat ongebruikelijk is. Vervolgens richten we ons op het maken van Josephson-juncties (JJ) door supergeleidend MoGe op  $\text{RuO}_2$ -nanodraden te deponeren en laterale spleten van variërende grootte te maken met behulp van een Focused Ion Beam. Dergelijke devices vertonen een duidelijke kritische stroom, evenals een Fraunhofer-achtige gedempte oscillerende respons op een magnetisch veld, voor afstanden tussen de contacten onder de 70 nm. Deze kleine afstanden wijzen op paarbrekings-effecten die groter

zijn dan verwacht voor een normaal metaal. Ze zijn eerder vergelijkbaar met wat wordt gevonden in zwakke ferromagneten. We schatten de geïnduceerde singlet-coherentielenlengte  $\xi$  op ongeveer 12 nm, wat een redelijke waarde lijkt te zijn wanneer kleine magnetische momenten aanwezig zijn.

Zoals eerder vermeld, heeft  $\text{CrO}_2$  veel potentieel voor supergeleidende spintronica, maar de omzetting naar isolerend  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  bij kamertemperatuur maakt de fabricage van Josephson juncties met een lange bereikproximemethode moeilijk. In Hoofdstuk 6 bespreken we de fabricage van  $\text{CrO}_2$ -juncties met twee verschillende methoden om dit probleem aan te pakken. De eerste methode omvat het verwijderen van de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -laag door standaard Ar-etsen van het bovenoppervlak van  $\text{CrO}_2$ . We hebben de impact van etsen op de interfacetransparantie geëvalueerd in veel ( $> 50$ ) devices en hebben een zeer brede spreiding van interfaceweerstand voor dezelfde etsparameters waargenomen, wat duidt op gebrek aan controle en consistentie die nodig is om de gewenste effecten waar te nemen. De tweede benadering maakt gebruik van een beschermende laag  $\text{RuO}_2$ , die in situ is gegroeid met  $\text{CrO}_2$  in CVD met aangepaste opstellingen. De  $\text{RuO}_2$ -laag resulteert in lage contactweerstand van ongeveer  $1 \Omega$ . Met onze groeimethode hebben we echter gevonden dat de dikte van  $\text{RuO}_2$  boven de 50 nm ligt voor een zeer korte groeitijd van 5 sec. Vanwege de korte coherentielengetijd van 12 nm voorkomt de grote dikte van  $\text{RuO}_2$  het bereiken van de lange-dracht proximity-geïnduceerde superstromen in deze devices. Verdere optimalisatie van de groeiparameters is nodig om de beoogde dikte van ongeveer 5 nm te bereiken.