

University of Groningen

Proximity-induced spin-orbit and exchange coupling in graphene-based heterostructures

Ghiasi, Talieh

DOI:
[10.33612/diss.177745582](https://doi.org/10.33612/diss.177745582)

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:
2021

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

Citation for published version (APA):
Ghiasi, T. (2021). *Proximity-induced spin-orbit and exchange coupling in graphene-based heterostructures*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen.
<https://doi.org/10.33612/diss.177745582>

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 informatietijdperk begon met de uitvinding van de transistor in 1947. Sindsdien hebben talloze technologische doorbraken de ontwikkeling van kleinere en snellere elektronische apparaten mogelijk gemaakt. Voornamelijk aan de hand van veldeffecttransistors (FETs) voor het uitvoeren van logische bewerkingen. Dit proces leidde jarenlang tot vooruitstrevende verkleiningen van de elektronische systemen die gestaag de verkleiningstrend voorspelt door Moore in 1965 volgde. Echter, met het oog op de fundamentele limieten op de nanometerschaal die ons worden opgelegd door e.g. de bovenmatige energieverliezen op deze schaal, moeten we andere manieren van transport en opslag van informatie vinden om deze vooruitgang in rekenkracht en energie-efficiëntie te behouden.

Spintronica, of spingebaseerde elektronica, biedt alternatieve logische bewerkingen. Het principe van deze spintronische schakelingen is gebaseerd op de kwantummechanische eigenschap van een elektron, genaamd 'spin'; het intrinsieke impulsmoment van het elektron. Met spintronica probeert men de spininformatie te behouden en te transporteren over micrometer lengtes en de spinsignalen te manipuleren en op te slaan voor de integratie van geheugensystemen met geïntegreerde schakelingen. De natuurkunde achter spintronica werd succesvol toegepast in de computerindustrie na de ontdekking van het zogeheten giant magneto-resistance (GMR) effect in de jaren 80. Door dit GMR-effect is de elektrische weerstand door twee parallel gelegen ferromagneten, die gescheiden zijn door een ultradunne niet-magneet, afhankelijk van de relatieve oriëntatie van de magnetisatie van de ferromagneten. Het verschil in weerstand voor de parallelle en antiparallelle configuratie, door de computer geïnterpreteerd als de bits 0 en 1, werd zo het werkingsprincipe van de hedendaagse spin-valve apparaten. Daarnaast steeg in 2004 de interesse in nog kleinere apparaatjes verder door het vinden van een zeer eenvoudige methode om, met behulp van plakband, grafeen en andere twee dimensionale materialen te scheiden van hun gelaagde bulk kristal.

Het onderzoek in dit proefschrift is het gecombineerde vervolg op de twee bovengenoemde Nobel prijswinnende ontdekkingen. In dit onderzoek produceren

we atomair dunne lagen van verschillende 2D materialen, brengen ze in elkaars nabijheid in zogeheten van der Waals heterostructuren en fabriceren met behulp van grafeen spintronische apparaten met ferromagnetische elektrodes. Grafeen wordt hier gebruikt vanwege zijn uitstekende spin-transport eigenschappen die het dankt aan zijn lage spin-baankoppeling (spin-orbit coupling) en hoge elektrische mobiliteit. We injecteren en detecteren een onevenwichtige spinaccumulatie in grafeen die door het kanaal diffuseert van de gespinpolariseerde kobalt (Co) injector elektrode naar de gespinpolariseerde kobalt detector elektrode. Dit leidt tot de verschillende weerstandsniveaus afhankelijk van de relatieve oriëntatie van de magnetisatie van beide kobalt elektrodes.

Voor het ontwerp van onze grafeen-gebaseerde spintronische apparaten optimaliseren we de spininjectie door een isolerende laag tussen het kobalt en het grafeen te introduceren die werkt als tunnel barrière. In dit proefschrift maken we gebruik van een atoomvlakke bilaag hexagonaal boornitride (hBN) als isolerende laag, vanwege zijn excellente pin-hole vrije tunnelbarrière die grote spinpolarisatie voor Co-elektrodes mogelijk maakt door de terugstroom van spins te voorkomen. In hoofdstuk 5 gebruiken we hBN ook tussen een halfgeleidende overgangsmetaal dichalcogenides (transition metal dichalcogenide, TMD) en metallisch elektrode in TMD-gebaseerde FETs. De bilaag hBN tussen de TMD en de elektrode voorkomt chemische interactie, Fermi-niveau pinning en vermindert de hoogte van de Schottky. Dit leidt tot een efficiënte gate-afstelbaarheid van de contactweerstand, zelfs op lage voorspanning (bias). Deze observaties tonen aan dat hBN een geschikte keuze is voor tunnelcontacten van hoge kwaliteit die zowel efficiënte lading- als spininjectie in halfgeleidende gelaagde materialen mogelijk maakt.

Voor praktische spinlogische circuitjes heeft men elektrisch veldcontrole en -manipulatie van de spininformatie nodig. Dit is mogelijk in materialen met sterke spin-baankoppeling of uitwisselingsinteractie (exchange interaction) die beide afwezig zijn in grafeen. Daarom verkennen we hier de mogelijkheid om de spin-gerelateerde eigenschappen van grafeen af te stemmen door het in contact te brengen met andere 2D materialen. Zo induceren we een significante spinbaankoppeling in grafeen door het in contact te brengen met TMDs. Dit leidt, zoals de spintransportmetingen in hoofdstuk 6 laten zien, tot een sterke anisotrope spinlevensduur: de levensduur van spins die uit het vlak gepolariseerd zijn, zijn een orde van grote langer dan voor spins die in het vlak gepolariseerd zijn. Deze experimentele observatie bevestigt de theoretische voorspelling dat het mogelijk is om de spintextuur van de nabijgelegen TMD laag in het grafeen te induceren. Het gebroken symmetrievlak dat parallel aan het oppervlak staat, leidt tot een uit-het-vlak valley-Zeeman spin-baankoppelveld die de spindynamica in het grafeen domineert. Daarnaast verliest grafeen zijn symmetrievlak loodrecht op het oppervlak wanneer het in contact wordt gebracht met andere materialen. Deze symmetrie wordt gebroken door een sterk elektrisch veld op het grafeen-TMD raakvlak die leidt

tot sterke Rashba spin-baankoppelingsvelden die de levensduur van de uit-het-vlak gepolariseerde spins in het grafeen beïnvloeden.

Daarnaast zien we dat zowel de geïnduceerde valley-Zeeman als Rashba spin-baanvelden verschillende spin-naar-lading omzettingsmechanismes in grafeen mogelijk maken (hoofdstuk 7). Zo resulteert het valley-Zeeman spin-baanveld, met een tegenovergestelde grootte in de twee valleys in grafeen, in een spinafhankelijke afbuiging van de elektronen. Dit meten we in een Hall-bar van grafeen en een enkele laag TMD, waar de aangebrachte ladingstroom een puur uit-het-vlak gepolariseerde spinstroom in de transversale richting genereert via het spin-Hall effect. Aan de andere kant, resulteren de Rashba spin-baanvelden in een karakteristieke spin-draaiing textuur waar de elektronspin in-het-vlak gepolariseerd is en loodrecht staat op het momentum van het elektron. Hierdoor kan een elektrisch veld, via het Rashba-Edelstein effect (REE), een spinaccumulatie creëren waarbij de spinrichting in het vlak gepolariseerd is en loodrecht staat op de richting van de ladingstroom. In hoofdstuk 7 detecteren we de aanwezigheid van beide effecten die gescheiden kunnen worden door hun verschil in spinprecessie onder schuine magnetische velden. Het REE-sigitaal in het bijzonder laat een gate-afhankelijkheid zien die aanhoudt op kamertemperatuur.

In hoofdstuk 8 zetten we een stap verder door grafeen in contact te brengen met 2D magnetische materialen die zowel uitwisselingsinteractie als spin-baankoppeling in grafeen induceren. De sterke spin-splitsing in magnetisch grafeen (in nabijheid van CrSBr) resulteert in een onevenwichtige ladingdragerdichtheid voor spin-op (spin-up) en spin neer (spin-down) elektronen, waardoor een sterke spinafhankelijke geleiding (tot wel 14%) direct gemeten wordt. Het verschil in geleiding voor spin op en neer elektronen leidt ook tot de opleving van het spinafhankelijke Seebeck effect, waar een thermische gradiënt in het magnetische grafeen een spinaccumulatie creëert. Verder detecteren we een niet-lineair Hall voltage als een teken van het abnormale Hall effect (anomalous Hall effect, AHE) in grafeen-CrSBr heterostructuren, wat de medeaanwezigheid van magnetisme en spin-baankoppeling in dit systeem impliceert.

De onderzochte proof-of-principle apparaatjes die direct de spinlevensduur, spin-naar-lading omzetting en spin-afhankelijke geleiding in grafeen adresseren, bewijzen sterke proximateit geïnduceerde spin-baankoppeling en uitwisselingsinteractie in grafeen, terwijl de superieure lading en spintransport eigenschappen worden behouden. De opmerkelijke spintransport eigenschappen die grafeen verkrijgt in de nabijheid van TMDs of 2D magneten en de demonstreerde efficiënte spinopwekking en manipulatie met behulp van exclusief elektrische velden, openen de weg naar 2D geheel-elektrische spintronische en spin-caloritronische apparaten.

