

University of Groningen

Charge and spin transport in two-dimensional materials and their heterostructures

Bettadahalli Nandishaiah, Madhushankar

DOI:
[10.33612/diss.135800814](https://doi.org/10.33612/diss.135800814)

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:
2020

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

Citation for published version (APA):
Bettadahalli Nandishaiah, M. (2020). *Charge and spin transport in two-dimensional materials and their heterostructures*. University of Groningen. <https://doi.org/10.33612/diss.135800814>

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

Tegenwoordig leven we in een high-tech wereld gevuld met elektronische gadgets, van de kleinste smartphone tot de grootste televisie. De bouwsteen in het meeste van deze toestellen is een veld-effect transistor (*field effect transistor*, FET). Een transistor heeft drie contactpunten: de *gate*, *source* en *drain*. Een halfgeleider ligt tussen de source en drain, en dit halfgeleidende kanaal is capacitief gekoppeld aan de gate. De gate laat toe de stroom door de halfgeleider (tussen source en drain) te regelen. Als er geen stroom vloeit, wordt dit beschouwd als een logische 0; een constante stroom is een logische 1. Dit vormt de basis voor de bits waarmee elektronische toestellen werken.

In de laatste 30 jaar heeft de *wet van Moore* het ritme van de halfgeleiderindustrie bepaald, waardoor elektronica kleiner en sneller blijft worden. Deze wet stelt dat het aantal transistors in een geïntegreerd circuit (*integrated circuit*, IC) elke twee jaar verdubbelt. Als een transistor kleiner wordt, passen er meer in een IC, werken ze sneller, verbruiken ze minder energie en wordt de prijs lager. De laatste jaren is echter het einde van de wet van Moore bereikt. Eén van de problemen is lekstroom tussen source en drain als het halfgeleidende kanaal te kort wordt, wat tot ongewenst energieverbruik leidt. Volgens het Internationale Stappenplan voor Halfgeleiders (*International Technology Roadmap for Semiconductors*, ITRS) is er behoefte aan een nieuwe aanpak, zoals nieuwe halfgeleiders, alternatieve logica voor elektronische toestellen of een combinatie hiervan. In deze thesis worden deze twee ideeën behandeld: we tonen een FET gebaseerd op tweedimensionale (2D) materialen, en stellen een nieuw concept voor logica voor, gegrondvest op de spin van elektronen.

De nieuwe 2D materialen, hun structuur en elektronische eigenschappen, worden voorgesteld in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 behandelen we de beginselen van elektronisch en spin transport in twee dimensies. De productiemethodes van FETs en 2D heterostructuren is het onderwerp van hoofdstuk 4. De instrumentatie en methodes om elektrische en magnetische eigenschappen van deze materialen te bepalen, worden ook in dit hoofdstuk samengevat.

De theorie achter het schalen van transistors voorspelt dat de gate van een FET met een dun diëlectricum en een kort halfgeleiderkanaal dat door de gate wordt beïnvloed erg klein kan gemaakt worden vooraleer er lekstroom tussen source en drain vloeit. Doordat er een tweedimensionaal materiaal, dat slechts één atoom dik is, erg aantrekkelijk om als kanaal of als diëlectricum te gebruiken in de nieuwe generatie transistoren. André K. Geim en Konstantin S. Novoselov ontdekten in 2004 het eerste tweedimensionale materiaal, grafeen. Ze konden monoatomaire lagen grafeen met plakband van een stuk grafiet slijten, doordat de Van der Waals krachten tussen de lagen heel zwak zijn. Grafeen heeft een uitstekende ladingsmobiliteit, maar heeft geen bandgap, wat nodig is om een transistor aan of uit te schakelen.

In de zoektocht naar een ander tweedimensionaal materiaal met een bandgap zijn onze collega's van de universiteit van Ioannina in Griekenland erin geslaagd om germane te maken door topochemische deïntercalatie, waarbij ze Ca met H in CaGa₂ substitueerden. Hierna werd de eerste 2D germane-gebaseerde FET ter wereld aan de universiteit van Groningen gefabriceerd en gekarakteriseerd, wat wordt voorgesteld in hoofdstuk 5.

Om de germaneen FET te vervaardigen werd meerlagig germaneen van 60 nm dik gespleten en op een siliciumdioxide-substraat geplaatst. Vervolgens werden gouden elektrodes gedeponerd op het germaneen om elektrische metingen te kunnen uitvoeren. Transport van ladingsdragers in zowel het elektronen- als gaten gedoteerd regime (ambipolair transport) werd geobserveerd wanneer een stroom door de germaneen FET gezonden werd. Het ladingstransport kon gecontroleerd worden (stroom of geen stroom, aan of uit) door de potentiaal van de gate. Op kamertemperatuur bereikte de aan-uitverhouding 10^4 en de ladingsmobiliteit $70 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Ambipolair transport en een hoge aan-uitverhouding zijn veelbelovend voor toepassingen in huidige complementaire metaal/oxide/halfgeleidercircuits (CMOS).

Wanneer een halfgeleider in direct contact wordt gebracht met een metaal, vormt een Schottky-barriere. Dit creëert een hoge weerstand op het goud/germaneen-raakvlak en beïnvloedt de stroom door de elektroden. Het verkleinen van de Schottky-barriere wordt een belangrijke uitdaging en een onderwerp van toekomstig onderzoek om het beste uit germaneen-FETs te halen.

Omdat germaneen een direct bandgap heeft, neemt de stroom toe wanneer een rode laser (golflengte 650 nm) op de FET schijnt. Het aan- en uitschakelen van de laser schakelde de stroom in milliseconden. Het meetcircuit had echter een beperkte bandbreedte en de reactietijd van de elektronen zelf hoort sneller te zijn (bandelektronen in gelijkaardige systemen, zoals GaAs, reageren binnen een nanoseconde op optische excitaties). Onze waarneming van een optoelektronische respons in een germaneen-FET heeft belangrijke implicaties voor optoelektronische toepassingen zoals fotodiodes en fototransistors.

Een elektron is een subatomair deeltje met zowel een lading en impulsmoment, spin genaamd. De spin van een elektron kan ofwel in het vlak of uit het vlak wijzen. In een logische context is dit 0 of 1, respectievelijk. De elektronica gebaseerd op de spin van een elektron wordt spinelektronica genoemd, of kortweg spintronica. Het voordeel van spintronica is het lage vermogen en lage schakeltijden, omdat er relatief weinig energie nodig is om een spin in een andere richting te laten wijzen.

Een belangrijk doel in de spintronica is het realiseren van gate-gestuurd spintransport in een FET (spin-FET). Onlangs waren er verschillende theoretische voorspellingen voor anisotropische spin-baan-koppeling (*spin-orbit coupling*, SOC) wanneer een transitiemetaal-dichalcogenide (*transition metal dichalcogenide*, TMD) nabij een laag grafeen wordt gebracht. Volgens de voorspellingen kan de geïnduceerde SOC gecontroleerd worden door een elektrisch veld, wat ook de spins in het grafeen beïnvloedt. Hierdoor, samen met de voorspelling dat spintransport in geïsoleerd grafeen over lange afstand kan gebeuren, en de mogelijkheid om het spintransport in grafeen te controleren met een gate, lijkt een TMD-grafeen-heterostructuur de meest beloftevolle kandidaat om de spin-FET te realiseren. Met deze basis fabriceerden en bestudeerden we verscheidene TMD-heterostructuren zoals WSe_2 en WS_2 met enkel- en dubbellaagig grafeen op SiO_2 -substraten. De contacten aan deze heterostructuren zijn gemaakt van ferromagnetisch kobalt, waarvan de magnetisatie geschakeld kan worden door een extern magnetisch veld. Hierdoor kunnen we spins injecteren die ofwel in of uit het vlak liggen.

In hoofdstuk 6 bestuderen we een heterostructuur van multilagig WSe_2 op een monolaag grafeen (*single layer graphene*, SLG), waarvan een deel van het grafeen bedekt was door WSe_2 . In het deel van het grafeen dat bedekt was door WSe_2 , observeerden we een anisotropie tussen de levensduur van spins in (τ_{\parallel}) en uit het vlak (τ_{\perp}) met een verhouding $\tau_{\perp}/\tau_{\parallel} = 3.5$. In dit gebied zagen we ook dat de nonlocale weerstand (R_{NL}) voor spintransport in het vlak controleerbaar was door een elektrisch veld. Desalniettemin is het niet duidelijk of het verschil in R_{NL} voor spintransport in het vlak door een verandering in SOC of door een verandering in spinweerstand in het grafeen/ WSe_2 -raakvlak kwam, wat verdere studie vereist. Interessant genoeg was deze anisotropie in spinlevensduur ook zichtbaar in het nabije stuk grafeen dat niet bedekt was door WSe_2 , omwille van het diffunderen van de spins doorheen het volledige stuk grafeen. Wanneer het WSe_2 meer dan $3 \mu\text{m}$ grafeen bedekte, zagen we geen spintransport in het vlak over het WSe_2 . Dit wijst naar een sterke SOC geïnduceerd door WSe_2 in het grafeen. Meerlagig WSe_2 werd ook gebruikt als een intermediaire spininjectie laag voor grafeen; deze toepassing van TMDs als tunnelbarriere is interessant voor verder onderzoek.

In hoofdstuk 7 bestuderen we spintransport in tweelagig grafeen (*bilayer graphene*, BLG) op meerlagig WS_2 , wat zowel SOC induceert en dient als het substraat. De grootste anisotropie in spinlevensduur ($\tau_{\perp}/\tau_{\parallel} \sim 40\text{-}70$) observeerden we in deze heterostructuren. Het was niet mogelijk om het elektrisch veld van de backgate doorheen het dikke WS_2 te controleren, maar als alternatief verkenden we de topgate. Vervolgens ontwikkelden we een nieuwe techniek, het *schuine spinventiel* (*oblique spin valve*), om de verhoudingen van spinlevensduren te meten door de vormanisotropie van ferromagnetische elektrodes te gebruiken. De waarneming van hoge τ_{\perp} en hoge spinlevensduuranisotropie zijn duidelijke aanwijzingen voor de sterke spin-valleikoppeling voor spins uit het vlak in BLG/ WS_2 -heterostructuren wanneer SOC aanwezig is.

In hoofdstuk 8 bestuderen we spintransport in een gelijkaardige structuur uit tweelagig grafeen en meerlagig WSe_2 . Een verhouding in spinlevensduuranisotropie van $\tau_{\perp}/\tau_{\parallel} = 3.6$ werd waargenomen wanneer het BLG bedekt werd door WSe_2 . Dit effect werd ook waargenomen in het andere gebied, waar het BLG niet bedekt was. Verder ontwikkelden we ook verticale WSe_2/BLG -FETs, met n-type transport en een aan-uitverhouding groter dan 10^3 . De realisatie van verticale grafeen-FETs met TMD-heterostructuren toont hun potentieel voor ultradunne electronica in nieuwe geometriën aan.

De observaties van sterk anisotropisch SOC in zowel SLG- en BLG-TMD-heterostructuren, met een anisotropische spinlevensduur voor spins in en uit het vlak, is een stap dichterbij de volgende generatie van spintronica, zoals spin-FETs.

