Schakelen met elektronspin dankzij tweedimensionale materialen



Door het stapelen van atomaire lagen in zogenoemde vanderwaalsheterostructuren kunnen unieke nieuwe materialen en schakelingen gemaakt worden, die gebruikmaken van de elektronspin. We laten zien hoe we die elektronspin kunnen sturen in een heterostructuurschakeling gemaakt van een enkele laag grafeen ingeklemd tussen atomaire lagen van een tweedimensionale halfgeleider en een isolator.

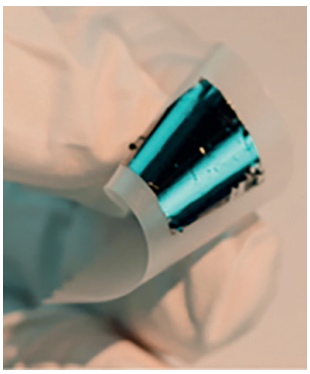
De toenemende eisen aan digitale technologie vereist het alsmaar verkleinen van de schakelingsafmetingen in elektronische circuits. Gordon Moore constateerde al in 1975 dat het aantal transistoren in een geïntegreerd circuit elke twee jaar verdubbelt, een trend die nog altijd opgaat. Het verkleinen van de transistorafmetingen met behoud van hun elektrische prestaties is echter niet zo eenvoudig. Er zijn veel problemen die te maken hebben met warmtedissipatie en afnemende prestaties van de schakelingen zodra die alsmaar kleiner worden.

Onderzoekers hebben echter het idee opgepakt om gebruik te maken van materialen die van nature een tweedimensionale, gelaagde structuur hebben, zodat de ultieme miniaturisatie alvast in één richting is bereikt. Het bekendste tweedimensionale materiaal is grafeen, een enkele laag van koolstofatomen die onderling covalent gebonden zijn in een honingraatstructuur. Deze laagstructuur kan gemakkelijk geïsoleerd worden uit een grafietkristal met behulp van plakband (figuur 1a). De fabricage van op grafeen gebaseerde schakelingen (figuur 1b) gaf de laatste jaren de mogelijkheid om een breed scala aan grafeengerelateerde onderwerpen te bestuderen, wat bevestigde dat het niet alleen voor ladingtransport een uitstekend medium is, maar ook voor spintransport [1].

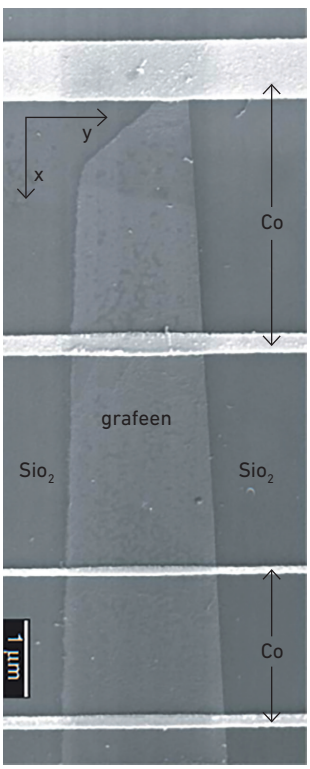
Spin is een intrinsieke vrijheidsgraad van elementaire deeltjes (zoals elektronen) die, alhoewel fysisch incorrect, kan worden voorgesteld als de rotatie (spin) van het deeltje om zijn eigen as. Het actieve veld van spintronica onderzoekt de controle en manipulatie van de elektronspin met als doel er digitale informatie mee te transporteren en verwerken. Grafeen is een uitstekend materiaal voor spintransport over relatief lange afstand, wat betekent dat spins aanzienlijke tijden door grafeen kunnen reizen (nanoseconden) zonder hun informatie te verliezen (dat wil zeggen: een lange levensduur van de spin).

Het is echter ook belangrijk om de elektronspins te kunnen manipuleren, omdat gegevensopslag en informatieverwerking in op spin gebaseerde schakelingen een actieve controle van de spinvrijheidsgraad vereisen. De relevante parameter is hier de sterkte van de spin-baankoppeling (*spin-orbit coupling*, SOC). De baanbeweging van elektronen in elektrische velden veroorzaakt een relativistisch effect waarbij de elektronen een klein magneetveld voelen die de richting van de elektronspin kan beïnvloeden. De SOC is maar zwak in lichte atomen, waardoor op koolstof gebaseerde materialen als grafeen zich slecht eigenen voor actieve spincontrole. Dit resulteerde in een zoektocht naar andere tweedimensionale materialen om grafeen te complementeren. Een van de beste keuzes hiervoor is een enkele laag van een overgangsmetaaldichalcogenide (*transition metal dichalcogenide*, TMD) waarvan de atomen een sterke SOC bezitten. Met de TMD kan dan de spindynamiek in het grafeenkanaal gemoduleerd worden, terwijl het goede spintransport in grafeen behouden blijft.

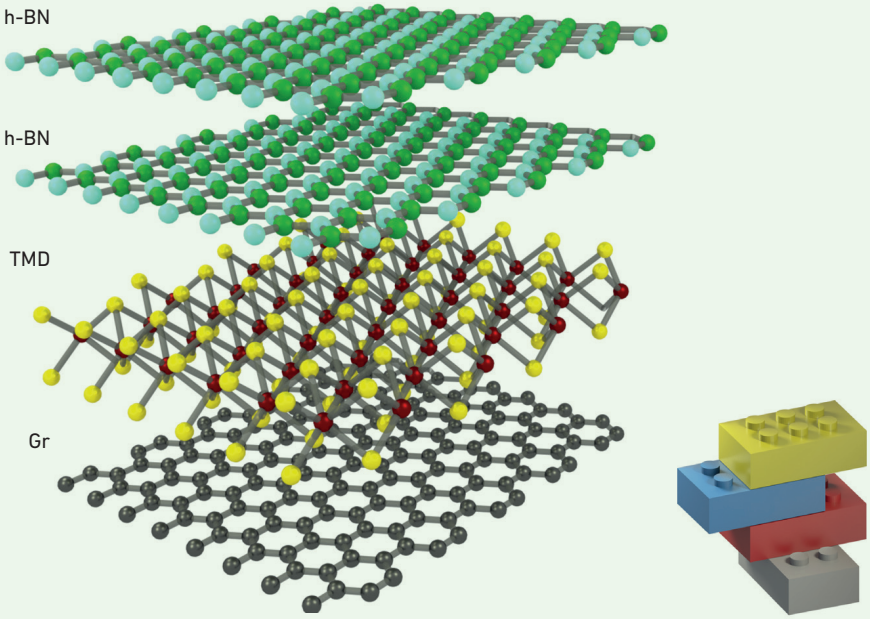
Elk van deze tweedimensionale materialen is fysisch interessant, maar zeker wanneer ze met elkaar in contact worden gebracht, als waren het bouwstenen van een lego-achtige structuur (figuur 2). Als extra vrijheidsgraad ten opzichte van lego hebben tweedimensionale materialen nog de hoek waaronder ze gestapeld worden. In deze zogenaamde heterostructuren worden de tweedimensionale lagen op hun plaats gehouden door onderlinge zwakke vanderwaalsinteracties, terwijl de stabiliteit in elke laag afzonderlijk het gevolg is van sterke covalente bindingen. Het monteren van deze tweedimensionale



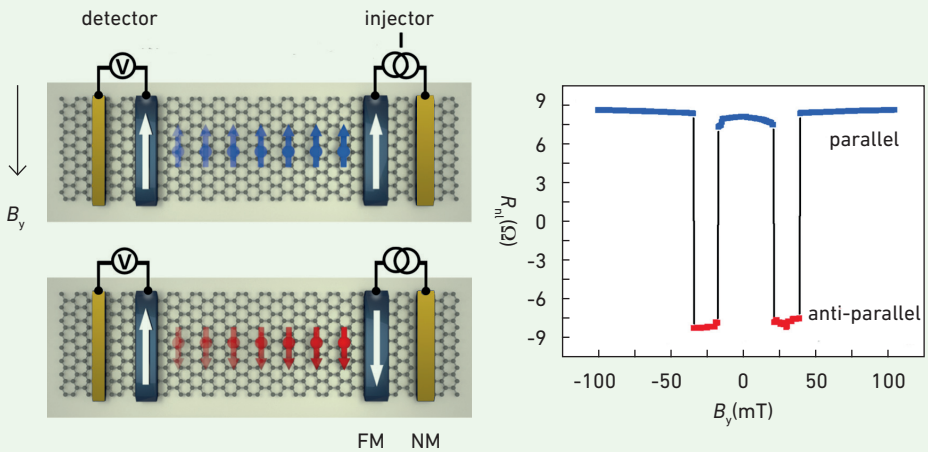
Figuur 1a. Klieven van een grafietkristal met plakband.



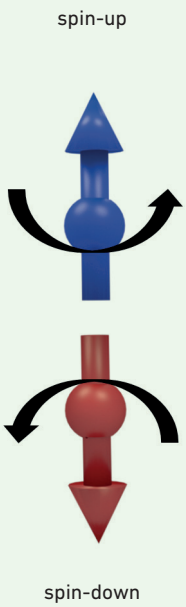
Figuur 1b. Elektronenmicroscopische afbeelding die het bovenaanzicht van een gefabriceerde schakeling met grafeen op een SiO_2-substraat laat zien. De kobalt (Co) elektroden worden gebruikt voor spininjectie/detectie [1].



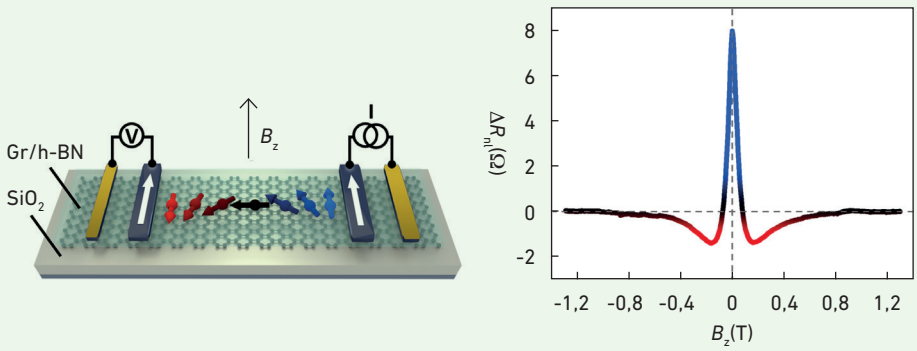
Figuur 2. Vanderwaalsheterostructuur. Legoblokjes geven de tweedimensionale kristallen weer waarmee een verscheidenheid van gelaagde structuren mogelijk is. De rechterzijde laat een vanderwaalsheterostructuur zien van (elektrisch geleidend) grafeen (Gr), een monolaag van een TMD (een tweedimensionale halfgeleider die bestaat uit Mo en Se) en een dubbellaag van hexagonaal boornitride (h-BN) (een isolator waar elektronen quantummechanisch doorheen kunnen tunnelen).



Figuur 3b. *Spin-valve*-experiment. De schetsen tonen spintransport met parallelle en anti-parallelle magnetisatieconfiguraties van de Co-elektroden (witte pijlen tonen de magnetisatierichtingen). Meting van de niet-lokale weerstand (R_{nl}) als een functie van B_y.



Figuur 3a. Twee spintypes met tegenovergestelde rotatie van het elektron rond zijn as.



Figuur 3c. Hanle-precessiemeting. Spinsignaal (ΔR_{nl}) als een functie van het magnetisch veld loodrecht op het grafeenvlak (B_z). De kleur van de plot komt overeen met de richting van de meerderheid van de spins in het grafeenkanaal (zoals weergegeven in de schets van het apparaat).

materialen met submicrometerprecisie werd tot slechts enkele jaren geleden beschouwd als sciencefiction, maar het wordt tegenwoordig ook in ons lab bijna dagelijks uitgevoerd [2]. In dit artikel laten we zien hoe de vanderwaalsheterostructuur van grafeen en TMD samen met de dubbellaag van hexagonaal boornitride (h-BN) (weergegeven in figuur 2) een grote impact kan hebben op de toekomst van spinlogicaschakelingen. We beginnen met spintransport in grafeen en laten zien hoe we het spintransport kunnen manipuleren met een naburige TMD-laag.

Spintransport in grafeen

Spin-up en spin-down zijn de twee spintypen die worden beschouwd als de twee richtingen die wij ons voor kunnen stellen als het rechts- en linksom draaien van een elektron rond haar as (figuur 3a). Elke andere rotatierichting kan worden beschouwd als een (quantummechanische) superpositie van deze twee spintypen. Voor spintronica zijn

“Een uitstekend materiaal voor spintransport”

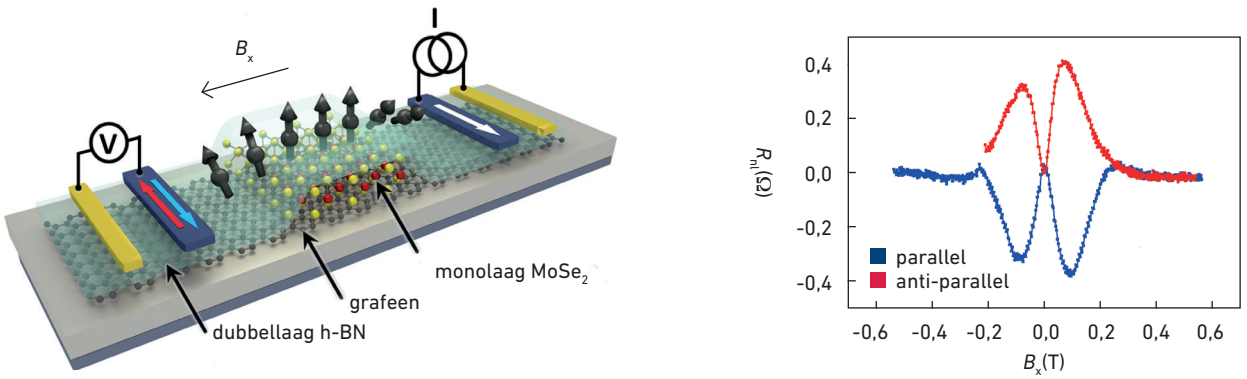
spingepolariseerde stromen benodigd. In een ferromagnetisch (FM) metaal als kobalt is het aantal elektronen met spin-up en spin-down niet gelijk, waardoor een stroom door een FM-materiaal spingepolariseerd is in de richting van magnetisatie van het materiaal. Om spingepolariseerde stroom in grafeen te injecteren, gebruiken we daarom een FM-elektrode gekoppeld aan een stroombron die in figuur 3b als injector is aangegeven.
De in grafeen geïnjecteerde spins diffunderen lateraal in het kanaal, maar als gevolg van spinrelaxatie neemt hun dichtheid af waardoor het spinsignaal over een karakteristieke lengte, de spinrelaxatielengte, verdwijnt. Als we een tweede FM-elektrode binnen de spinrelaxatielengte van de injector plaatsen, induceert de spingepolariseerde stroom een elektrische spanning op deze tweede elektrode, waardoor deze als spindetector fungeert. Deze elektrodengeometrie wordt niet-lokaal (nl) genoemd, omdat de spanningsmeter buiten het stroombroncircuit wordt geplaatst om zo alleen spins die van injector naar detector gaan te meten. Als in deze geometrie de magnetisaties van de injector- en detectorelektroden in dezelfde richting (parallel) staan, is de spanning V en de niet-lokale weerstand $R_{nl}=V/I$ positief, terwijl deze bij een anti-parallelle magnetisatie negatief is. (De magnetisatierichting kunnen we met een aangelegd magneetveld controleren.) Daarom zien we in figuur 3b dat met een magnetisch veld B_y langs de *easy axis* van de elektrode, de magnetisatieschakeling van een van de elektroden een plotselinge verandering in de weerstand van het kanaal kan veroorzaken. Dit is de reden dat deze apparaten *spin-valves* genoemd worden. Het verschil tussen de niet-lokale weerstand in de parallelle $R_{nl,p}$ en de anti-parallelle toestand $R_{nl,ap}$ wordt gedefinieerd als een spinsignaal $\Delta R_{nl}=(R_{nl,p}-R_{nl,ap})/2$.
Vermeldenswaardig is dat met een direct contact tussen de elektroden en het grafeenkanaal, spins liever teruggaan naar de elektroden met lage weerstand, dan in het grafeenkanaal te blijven.
Om dit teruglekken van spins naar de elektroden te voorkomen, gebruiken we een tunnelbarrière in de contacten. We hebben onlangs aangetoond dat een dubbele laag van h-BN hier een goede kandidaat voor is, omdat het een tweedimensionale isolator is (zie figuur 2).
Hoe zorgen we er nu voor dat de spanning die we meten louter betrekking heeft op spins? Daarvoor bedenken we een andere manier om het spinsignaal te moduleren. Dat kan door een magnetisch veld B_z aan te leggen loodrecht op het grafeenvlak waardoor de spinrichting (geïnjecteerd in de y-richting) rond B_z zal precederen. Dit staat bekend als een Hanle-precessie-experiment (figuur 3c), dat raakvlakken heeft met de precessiebeweging van een spinnende tol. Als B_z toeneemt en de elektronspins beginnen te precederen, neemt de niet-lokale spanning, en dus R_{nl}, af. De spanning gaat naar nul voor het signaal gegenereerd door de spins loodrecht



Talieh Ghiasi (1990) studeerde toegepaste natuurkunde in Iran en trad vervolgens in 2014 toe tot het topmasterprogramma Nanoscience aan de Rijksuniversiteit Groningen. Ze doet nu haar promotieonderzoek onder supervisie van Bart van Wees.



Bart van Wees (1961) is hoogleraar Technische Natuurkunde aan het Zernike Institute for Advanced Materials van de Rijksuniversiteit Groningen. Naast het onderzoek aan nieuwetweedimensionale materialen gaat zijn interesse uit naar spintronica van magnonen en skyrmionen in ferromagnetische en antiferromagnetische materialen.



Figuur 4. Anisotroop spintransport in een TMD/Gr-heterostructuur. Links: schets van de geometrie van het *spin-valve device*. Rechts: modulatie van de niet-lokale weerstand als een functie van de magnetisatie in-het-vlak. $\tau_{\parallel}$ en $\tau_{\perp}$ zijn de levensduren van respectievelijk de spins in-het-vlak en uit-het-vlak [3].

op de magnetisatierichting van de detectorelektrode (de spinrichting is weergegeven met de zwarte pijl in de schets van figuur 3c).
Wanneer B_z nog sterker wordt, neemt de precessie van de spins nog verder toe zodat de richting van de spins (rood) antiparallel komt te staan ten opzichte van de detectormagnetisatie. Het signaal gegenereerd door de rode spins resulteert nu in een negatieve spanning. Zoals de meting in figuur 3c laat zien, geven deze rode spins een kleinere spanning dan dat van de blauwe spins, wat eenvoudigweg verklaard kan worden doordat de spins niet allemaal even lang in het grafeenkanaal verblijven vanwege de diffuse aard van het transport. Hierdoor verschilt de tijd die verschillende elektronen onder invloed van B_z staan en dus ook de resulterende netto-oriëntatie van het ensemble van gemeten elektronen.

Spintransport in een Gr/TMD-sandwich

Spintransport in grafeen is isotroop, wat betekent dat het onafhankelijk is van de spinrichting. Nu laten we zien hoe we het kunnen manipuleren door een TMD-laag in nauw contact te brengen met ons grafeenkanaal. Het sterke SOC-veld in een monolaag TMD staat loodrecht op het vlak en kan naar boven of naar beneden wijzen. Spins die loodrecht gepolariseerd staan op het TMD-vlak zijn daarom weinig gevoelig voor het SOC-veld; spins die in het vlak liggen zullen daarentegen precederen rond het SOC-veld en elkaar compenseren. Daarom is de levensduur van de loodrecht gepolariseerde spins ($\tau_{\perp}$) veel langer dan die van in het vlak gepolariseerde spins ($\tau_{\parallel}$) (anisotroop spintransport).
Op basis hiervan verwachten we dat de SOC van TMD in een TMD/grafeenheterostructuur anisotroop spintransport in het grafeenkanaal veroorzaakt. Wij hebben dit effect bestudeerd in een schakeling, zoals weergegeven in figuur 4a. De FM-contacten hebben een magnetisatie in-het-vlak (in dit geval de y-richting) zodat deze parallelle spins injecteren die in het TMD/grafeenkanaal erg snel vervallen. Dit leidt tot een bijna verwaarloosbaar spinsignaal van ongeveer 15 mΩ (verschil in R_{nl} voor de parallelle en anti-parallelle configuratie op B_x=0T in figuur 4b). Maar als wij een in-het-vlak magnetisch veld B_x (loodrecht op B_y) aanleggen, zien we dat de R_{nl} van teken verandert en tot veel grotere waarden stijgt (maximaal 35 keer). Dit komt doordat de spins om B_x precederen tijdens transport van injector naar detector. Deze precessie van parallelle spins creëert loodrechte spins die voor veel langere tijden in de TMD/grafeenheterostructuur kunnen bestaan en een veel groter spinsignaal (bij B_x=0,1T in figuur 4b) veroorzaken [3].
We hebben deze sterke modulatie van het spinsignaal gemodelleerd en concluderen dat we deze alleen kunnen observeren in een systeem waarin de levensduur van de parallel en loodrecht georiënteerde spins met ten minste één orde van grootte verschillen. Dit experiment is de eerste directe observatie van spintransportanisotropie in grafeen veroorzaakt door de naburige TMD-laag in vanderwaalsheterostructuren, waardoor efficiënte manipulatie van het spintransport in grafeen mogelijk wordt.
Dergelijke eenvoudige en innovatieve experimenten geven ons inzicht in de aard van de spinbaankoppeling en spindynamica in deze heterostructuren. Dit toont aan dat met het gecontroleerd stapelen van deze atomisch dunne tweedimensionale bouwstenen, men nieuwe materialen en apparaten kan ontwerpen waarin specifieke functionaliteiten kunnen worden aangepast en ongebruikelijke eigenschappen kunnen worden onthuld of nieuwe verschijnselen realiseerbaar worden. In de toekomst denken we bijvoorbeeld aan de directe omzetting van circulair gepolariseerd licht in elektronspin en informatie, en vice versa.

REFERENTIES
1 N. Tombros, C. Jozsa, M. Popinciuc, H.T. Jonkman en B.J. van Wees, *Electronic spin transport and spin precession in single graphene layers at room temperature*, Nature **448**, 571-4 (2007).
2 A.K. Geim en I.V. Grigorieva, *Van der Waals heterostructures*, Nature **499**, 419-425 (2013).
3 T.S. Ghiasi, J. Ingla-Aynés, A.A. Kaverzin en B.J. van Wees, *Large Proximity-Induced Spin Lifetime Anisotropy in Transition-Metal Dichalcogenide/Graphene Heterostructures*, Nano Lett. **17**, 7528-7532 (2017).