

University of Groningen

Electron spin transport in graphene and carbon nanotubes

Tombros, Nikolaos

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:

2008

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

Citation for published version (APA):

Tombros, N. (2008). *Electron spin transport in graphene and carbon nanotubes*. s.n.

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 elektron is een heel belangrijk deeltje voor zowel elektronische als spintronische devices. Het verschil is dat een elektronisch device de lading van een elektron gebruikt en een spintronische device het intrinsieke magnetische moment van een elektron (beter bekend als 'spin'). Op het moment dat we het magnetische moment van een elektron meten dan verkrijgen we maar twee mogelijke toestanden, de spin-omhoog toestand en de spin-omlaag toestand. Deze toestanden kunnen worden gebruikt voor Booleaanse-berekeningen in spintronische devices, op soortgelijke manier zoals de toestanden 0 en 1 worden gebruikt in computer taal. Wetenschappers zijn op dit moment op zoek naar materialen die geschikt zijn voor de opslag van spin informatie. Hiermee kan een geheugen element worden gemaakt. Veel onderzoek wordt gedaan naar de constructie van spintronische devices waarin spin informatie kan worden gemanipuleerd. Een spin-transistor is een voorbeeld van een spintronisch device waarin spins worden gemanipuleerd met behulp van een gate-elektrode. In het geval dat deze elementaire devices beschikbaar zijn dan is de constructie van een computer chip mogelijk die geheel bestaat uit spintronische devices. Hiermee zou de constructie van een quantum computer mogelijk zijn waarmee rekensnelheden te halen zijn vele malen hoger dan in een huidige computer. Voor dat we zo ver zijn is het noodzakelijk om eerst de basis spintronische devices te gaan ontwikkelen.

De verwachting is dat in organische materialen de spin informatie behouden blijft voor vrij lange tijden. Dit is ook de reden waarom wetenschappers heel erg geïnteresseerd zijn in het ontwikkelen van organische spintronische devices. Organische materialen bevatten grotendeels koolstof atomen met een atoom

nummer $Z=6$ en daarom is het mechanisme van spin relaxatie, de spin-orbit interactie heel zwak, omdat het een Z^4 afhankelijkheid heeft. Het gebruik van een anorganisch materiaal, bijvoorbeeld silicium, is ook mogelijk omdat het een atoomnummer $Z=14$ heeft. In tegenstelling, het gebruik van goud voor spin transport zou geen goede keuze zijn omdat $Z=79$ wat resulteert in een relaxatie tijd duizend keer kleiner dan wat verwacht wordt voor een organisch materiaal. In dit proefschrift bestuderen we spin transport eigenschappen in twee organische systemen, een enkele laag grafeen en een koolstof nanobuisje. Voor dat ik de experimentele resultaten presenteer, geef ik een introductie van de basis theoretische concepten van spintronica. In hoofdstuk 2 begin ik met de discussie van de spin-valve device en introduceer ik de niet-locale spin transport meettechniek. Hier, een spin transport device is gefabriceerd met als basis materiaal een grafeen laag of een koolstof nanobuisje. Het organische systeem is gecontacteerd met vier ferromagnetische elektroden, twee voor de productie van een spin stroom in het organische materiaal en de twee overige contacten voor het meten van de spin transport. Het gebruik van vier electrodes geeft ons de mogelijkheid om de niet-locale techniek te kunnen toepassen. Met deze techniek kan men de spin stroom gescheiden houden van de ladings stroom. Voordeel is dat we in dit geval alleen de spin dynamica meten omdat we de spin transport effect kunnen scheiden van alle andere effecten, zoals Hall effecten, anisotrope magnetoweerstand effect, interferentie effecten en magneto-coulomb effecten. In hoofdstuk 2 beschrijf ik een model voor spin transport in een niet-magnetisch materiaal met in achtning van een mogelijke spin relaxatie in de ferromagnetische contacten zelf. In hoofdstuk 3 presenteer ik de technieken die werden gebruikt voor de fabricatie van een spintronisch device gebaseerd op een grafeen laag of een koolstof nanobuisje. In dit hoofdstuk laat ik zien dat optische microscopie kan worden gebruikt voor het onderscheiden van een grafeen laag van multilaag grafeen, in het geval dat het op een SiO_2 substraat ligt. Grafeen is ook zichtbaar op het moment dat het op een polymeer ligt. Gecontroleerd verwijdering van het polymeer gebruik makend van elektron beam lithography en chemicalien zou het produceren van vrij hangende grafeen devices mogelijk kunnen maken.

In hoofdstuk 4 presenteer ik experimentele resultaten van niet-locale metingen op een koolstof nanobuisje. Een weerstandsmodel (appendix A) laat zien dat de spin relaxatie lengte in een koolstof nanobuisje minstens $1.5 \mu\text{m}$ moet zijn. We hebben ook gevonden dat de spin injectie heel effectief kan zijn omdat we een polarisatie hebben gevonden van 25%. Het magneto-coulomb effect (MCE) wordt behandeld in hoofdstuk 5. Ons model laat hier zien dat op het moment dat twee ferromagneten zwak gekoppeld zijn aan een Coulomb eiland, de toepassing van een externe magneet veld een effect heeft op de weerstand van het conventionele spin-valve device. Dit effect kan een dubieus effect hebben op de spin dynamica

omdat in een conventioneel spin-valve device de spin en ladings stromen in een en dezelfde weg bewegen. We laten zien dat de MCE magnetowerstanden van enkele procenten of meer kan introduceren, afhankelijk van de sterkte van de Coulomb blokkade.

In hoofdstuk 6 presenteer ik niet lokale spin transport metingen in een enkel grafeen laag. Een fascinerend resultaat is dat spin transport mogelijk is op kamer temperatuur, waarbij de spin relaxatie lengte rond de $2 \mu\text{m}$ is. Dit opent de weg naar grafeen gebaseerde spintronische devices werkend op kamer temperatuur. De relatieve korte spin relaxatie tijden (150 ps) geven de suggestie dat de spin-orbit (SO) interactie in grafeen een belangrijke rol heeft. Waardevolle informatie over de SO interactie kan worden gewonnen door het bestuderen van de anisotropie in de spin relaxatie in het systeem. In hoofdstuk 7 presenteer ik niet-locale experimenten die laten zien dat spins geïnjecteerd loodrecht ten opzichte van de grafeen laag een relaxatie tijd hebben die rond de 20 % korter is vergeleken met spins geïnjecteerd parallel aan de grafeen laag. Anisotropische spin relaxatie van vergelijkbare grootte (50%) wordt verwacht op het moment dat de spin-orbit effectieve magnetische velden exclusief in het vlak van de grafeen laag te vinden zijn. Onze metingen laten zien dat hoogstwaarschijnlijk het Elliot-Yafet en niet het Dyakonov-Perel mechanisme verantwoordelijk is voor spin relaxatie in grafeen. In dit geval is het mogelijk om een veel grotere spin relaxatie lengte te verkrijgen door grafeen lagen te gebruiken met een hogere mobiliteit.

Toepassing van een sterk elektrisch veld (E) in de richting van de spin transport richting maakt de bestudering van drift van spins in het systeem mogelijk. Omdat de mobiliteit in grafeen hoog is, kan een klein elektrisch veld voldoende zijn om een drift snelheid te produceren met een groote vergelijkbaar met de Fermi snelheid $v_f=10^6$ m/s. In hoofdstuk 8 presenteren we experimenten waarin we de drift van elektron spins bestuderen in een enkele laag grafeen spin-valve en in de veld-effect transport geometrie. Elektrische velden van ongeveer 70 kV/m tussen de spin injector en spin detector en in het metallische geleiding regime resulteert in een verandering in de spin-valve signaal ter grootte van 50%. We zien een duidelijke verandering van teken van het drift effect op het moment dat we schakelen van elektronen naar gaten. In de buurt van de Dirac punt is het drift effect sterk onderdrukt. Een spin diffusie model van spin transport verklaart kwantitatief de experimentele resultaten.

Een compleet verschillend type experiment wordt gepresenteerd in hoofdstuk 9. Hier zijn we niet geïnteresseerd in het spin dynamica, maar in de supergeleidende eigenschappen van heel dunne nano-draden uit tin. Ik presenteer elektronische metingen in supergeleidende tin nanodraden die zijn opgesloten in een koolstof nanobuisjes, gecontacteerd met goud elektroden. Dit systeem is uniek omdat het koolstof nanobuisje werkt als een beschermlaag voor het mono kristal tin

nanodraad voor oxidatie en voor vorm fragmentatie. Dit maakt de bestudering mogelijk van tin draden met diameters zo klein als 25 nm. We hebben gevonden dat de supergeleiding in tin nanodraden sterk beïnvloed wordt door de goud contacten door middel van het proximity effect. Voor het meten van de intrinsieke eigenschappen van supergeleiding in dunnere monokristal tin draden en het bestuderen van quantum fase slip processen is het noodzakelijk om de draden te contacteren met supergeleidende elektroden met een kritische temperatuur hoger van tin.