

University of Groningen

Polymer-wrapped carbon nanotubes for high performance field effect transistors

Derenskyi, Volodymyr

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:

2017

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

Citation for published version (APA):

Derenskyi, V. (2017). *Polymer-wrapped carbon nanotubes for high performance field effect transistors*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen.

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

De groeiende vraag naar snelle, energiezuinige elektronica in de laatste decennia vereist verbeterde elektronische apparaten die tevens kleinere afmetingen hebben. Desalniettemin is het materiaal voor het actieve kanaal voor transistoren ongewijzigd gebleven. De verdere groei van de conventionele Si-technologie wordt belemmerd door technologische limieten zoals het kwantum tunneleffect, dat de thermische efficiëntie van de apparaten vermindert, en de ingewikkelde en dure lithografische processen die vereist zijn om het actieve kanaal verder in grootte te reduceren. Dit heeft geleid tot onderzoek naar alternatieven die ervoor zouden kunnen zorgen dat de apparaten minimaal gelijkwaardig blijven in prestaties, terwijl hun dimensies en energieverbruik vermindert worden. Een van de beste kandidaten hiervoor zijn enkelwandige koolstofnanobuizen (SWNTs). Transistorkanalen gemaakt van halfgeleidende enkelwandige koolstofnanobuizen (s-SWNTs) hebben ladingsdragers met een buitengewoon hoge mobiliteit (tot wel $100\,000\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$) vergeleken met Si ($1400\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$). De bandkloven van de sSWNTs schalen omgekeerd evenredig met de diameter van de buizen (ongeveer 1 nanometer). Een typische waarde voor de bandkloof ligt rond 1 eV, wat een perfecte waarde is voor het gebruik in transistoren. De aanwezigheid van een echte bandkloof maakt het mogelijk om de apparaten uit te schakelen en daardoor is een hogere aan-uit-verhouding mogelijk dan voor het andere nanokoolstof-alternatief grafeen.

Om een goed alternatief te zijn voor bestaande technologieën moeten koolstofnanobuizen voldoen aan een aantal vereisten als een hoge mobiliteit en hoge aan-uit-verhouding, en ze moeten op een goedkope, gemakkelijke en reproduceerbare manier op grote schaal verwerkt kunnen worden. Tot op heden werden hoogwaardige koolstofnanobuistransistoren gemaakt door het groeien van de nanobuizen met behulp van chemische dampdepositie, gevolgd door het aanbrengen op een substraat en het maken van de contacten met elektronenstraallithografie. In dit werk maken we gebruik van nanobuizen die middels polymeren gescheiden zijn. Het doel was om hoogwaardige transistoren te maken met de geprepareerde nanobuizendispersie en om een reproduceerbare en schaalbare techniek te ontwikkelen voor het maken van FETs.

Hoofdstuk 2 beschrijft hoe een simpele techniek voor het aanbrengen van de nanobuizen, zoals blade coating, kan leiden tot een significante verbetering in de prestaties

van de apparaten door middel van het ordenen van de SWNTs. Het is aangetoond dat deze techniek tot een betere reproduceerbaarheid en opschaling van het proces kan leiden dan alternatieven als spincoaten en drop-casten. Later demonstreren we dat het omwikkelen van de SWNT met polymeren niet alleen het selectieproces van de SWNTs beïnvloedt, maar ook de prestaties van het apparaat. FETs gemaakt van met PF12 omwikkelde SWNTs laten bijna symmetrische ambipolaire karakteristieken zien, waarbij de stroomcurves van de gaten en elektronen gelijk zijn. Dit is in contrast met de SWNT-transistoren waarbij P3DDT als polymeer gebruikt is: deze hebben een significant lagere elektronstroom.

Hoofdstuk 3 omvat een gedetailleerde studie over het mechanisme achter het transport van de ladingsdragers in ambipolaire FETs van SWNTs die semigeordend zijn. Het abnormale temperatuursafhankelijke niet-lineaire transport in SWNTs met een grote diameter suggereert een wisselwerking tussen het intrinsieke transport van individuele buizen en de eigenschappen van het percolerende netwerk. Dit toont aan dat polymeer-omwikkelde SWNTs een materiaalsoort is met een complexe, hybride aard.

Voor het fabriceren van hoogwaardige transistoren is het heel belangrijk om pure en geconcentreerde SWNT-inkten te kunnen produceren. Met behulp van een nieuw polymeer, poly(2,5-dimethylidynenitrilo-3,4-didodecylthienylene) (PAMDD), slaagden we erin om sSWNTs-oplossingen met hoge concentratie te maken. Om een schatting te maken van het aantal metaalachtige soorten in de inkten fabriceerden en analyseerden we transistoren waarbij de afstand tussen de bron- en afvoerelektrode niet groter was dan de gemiddelde lengte van een SWNT. In **Hoofdstuk 4** staan statistieken van meer dan 190 apparaten met kanalen van 300 nm lengte, met een totaal aantal SWNTs van 646. Vanwege het feit dat er geen kortsluiting optrad tijdens de elektrische karakterisatie schatten we de zuiverheid van de oplossing hoger dan 99.9%.

In **Hoofdstuk 5** demonstreren we de precieze plaatsing van SWNTs in het kanaal van de transistor. Deze aanpak was mogelijk door de functionalisatie van het polymeer met thiolhoudende zijketens, wat in chemische zelfassemblage van de geselecteerde sSWNTs op gouden elektrodes resulteerde. Door middel van directe chemische zelfassemblage van de SWNTs/thiolhoudende polyfluorenen op substraten met lithografisch gedefinieerde elektrodes fabriceerden we veldeffecttransistoren, bestaande uit een netwerk van SWNTs of één enkele SWNT, met verscheidene kanaallengtes. We demonstreren een opmerkelijke opbrengst van 100% voor apparaten met slechts één SWNT, waarbij alle apparaten

gekenmerkt zijn door een hoog vermogen en een hoge reproduceerbaarheid. Het is opmerkelijk dat de SWNTs die geassembleerd zijn met thiolgroepen stabiel verankerd zijn aan het substraat en dat deze bestand zijn tegen externe perturbatie zoals sonicatie in organische oplosmiddelen.