

Wetenschappelijke doorbraken de klas in!

Angst, Grafeen en Denkbeelden over het begin

Marieke Peeters, Winnie Meijer & Roald Verhoeff (redactie)

Hoofdstuk 3: Grafeen



Colofon

Redactie: dr. Marieke Peeters, Winnie Meijer, MSc & dr. Roald Verhoeff

Vormgeving: Elke Jacobs

Eerste druk februari 2012

ISBN: 978-90-818461-0-3

Uitgave:

Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen

Heyendaalseweg 135

Postbus 9010, 6500 GL Nijmegen

Nederland

www.wkru.nl

© 2012 Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen



Correspondentie:

Dr. Marieke Peeters

Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen

FNWI, Institute for Science, Innovation and Society - postvak 77

Postbus 9010, 6500 GL Nijmegen

(024) 366 72 22

infoWKRU@ru.nl

Wilt u een exemplaar bestellen?

Ga naar: www.wkru.nl/boek

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen.

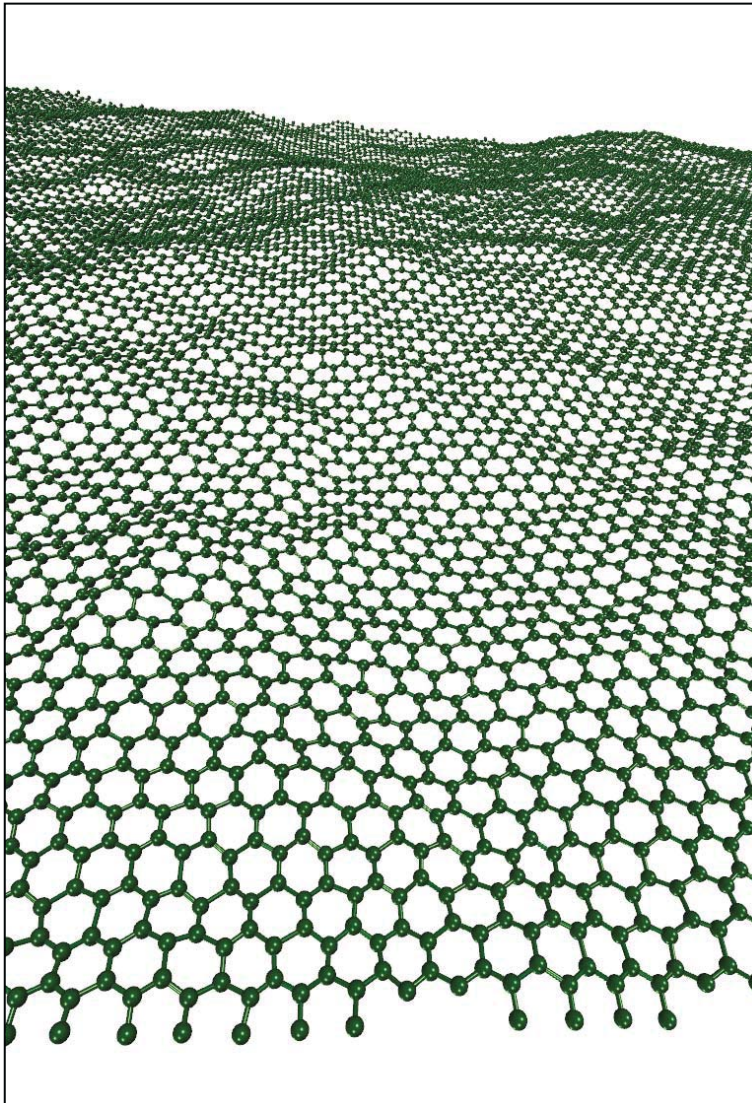
Aan de totstandkoming van deze uitgave is de uiterste zorg besteed. Voor informatie die desondanks onvolledig of onjuist is opgenomen, aanvaarden auteur(s), redactie en uitgever geen aansprakelijkheid. Voor eventuele verbetering van opgenomen gegevens houden zij zich aanbevolen.

Hoofdstuk 3. Grafeen

Dit hoofdstuk beschrijft in twee delen het onderzoeksthema 'Grafeen'.

Paragraaf 3.1 gaat dieper in op wat grafeen is, hoe het ontdekt is en wat voor toepassingen het heeft voor de toekomst.

In paragraaf 3.2 worden twee praktijkvoorbeelden beschreven van hoe het onderzoek naar grafeen vertaald is naar de klassen van twee scholen. De activiteiten zijn ook hier weer beschreven aan de hand van de stappen van het onderzoekend leren.



Grafeen

3.1 Grafeen, een verhaal van andere dimensies

Mikhail Katsnelson (hoogleraar Theoretische fysica), Astrid de Wijn (post-doc onderzoeker), Inka Locht (masterstudente) en Aloysio Janner (emeritus hoogleraar), zij zijn allen verbonden aan de vakgroep Theory of Condensed Matter van de Radboud Universiteit Nijmegen.

Marina Katsnelson (docente Natuurkunde VO).

De oorspronkelijke motivatie voor de wetenschap is nieuwsgierigheid naar de wereld om ons heen. We zijn erin geïnteresseerd om te weten waarom sommige objecten om ons heen vast zijn en andere vloeibaar. Waarom sommige objecten doorzichtig zijn, zoals glas, andere zwart, zoals steenkool en weer andere glanzend, zoals metaal. Waarom staal hard is en roomboter zacht. Op deze vragen en vele andere willen we graag een antwoord weten. Er is een ontwikkeling gedurende eeuwen voor nodig geweest om ons te doen realiseren dat het antwoord op veel van deze vragen op een dieper/ kleiner niveau ligt dan die van de direct grijpbare werkelijkheid om ons heen. Om zichtbare eigenschappen van objecten te verklaren, moeten we de onzichtbare eigenschappen op onderliggende niveaus begrijpen.

Een van de beste natuurkundigen en natuurkundedocenten van de laatste eeuw, Richard Feynman, zei in één van zijn beroemde lezingen:

“Als door een catastrofe alle wetenschappelijke kennis zou worden vernietigd en slechts één zin zou kunnen worden doorgegeven aan de volgende generatie levende wezens, welke boodschap zou dan de meeste informatie bevatten in het kleinste aantal woorden? Ik geloof dat deze boodschap de *atomaire hypothese* (of het atomaire feit, of hoe je het ook wilt noemen) is. Deze boodschap zegt dat alles gemaakt is van atomen, kleine deeltjes die constant in beweging zijn, elkaar aantrekken op kleine afstanden van elkaar, maar elkaar afstoten wanneer ze op elkaar worden gedrukt. Uit die ene zin kan met slechts een klein beetje voorstellingsvermogen en denkwerk een enorme hoeveelheid informatie over de wereld om ons heen worden gehaald.”

Prof. dr. Mikhail Katsnelson ⁽¹⁾

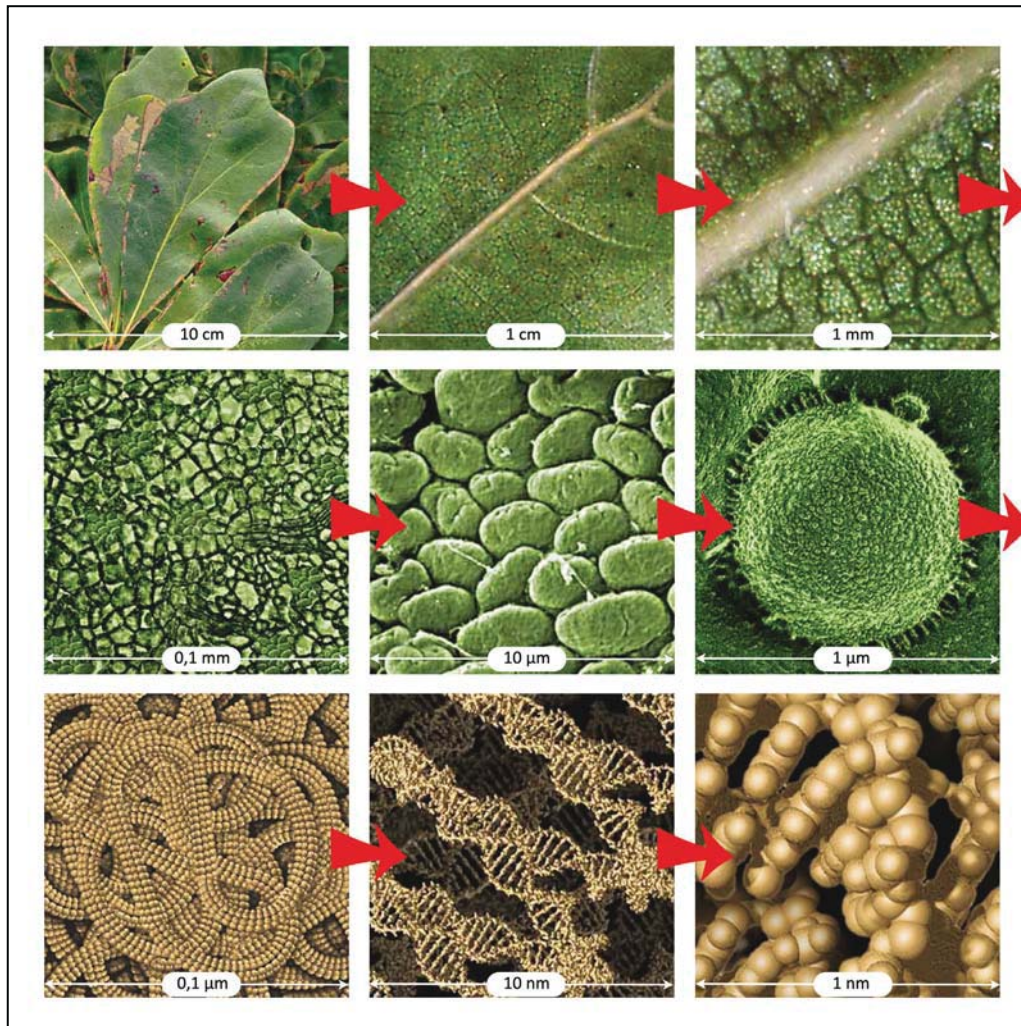
Mikhail Katsnelson is sinds 2004 hoogleraar in de Theoretische fysica aan de Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica van de Radboud Universiteit Nijmegen. Hij heeft een enorme wetenschappelijke productie (447 artikelen in internationale gerefereerde tijdschriften) van uitzonderlijk hoog niveau. Eind 2010 was Katsnelson meer dan 11.000 keer geciteerd en werd hij door bureau Thomson-Reuter gekozen tot één van de tien meest invloedrijke wetenschappers wereldwijd.

Sinds 2004 werkt hij intensief samen met de winnaars van de Nobelprijs 2010 voor de Natuurkunde, Andre Geim en Kostya Novoselov, aan grafeen. Katsnelson is met hen een van de grondleggers van dit nieuwe, belangrijke onderzoek. Hij leverde aan het ontrafelen van de unieke eigenschappen van dit materiaal een essentiële bijdrage, die ligt op theoretisch gebied. Het werk van Katsnelson is - samen met de betrokkenheid van beide Nobellaureaten bij de Radboud Universiteit en het gezamenlijke experimentele werk aan het High field magnet laboratory - één van de belangrijkste redenen dat de Radboud Universiteit zo'n belangrijke rol heeft gespeeld in het grafeenonderzoek.



Prof. dr. M. I. Katsnelson

Grafeen, een verhaal van andere dimensies



Structuren op meer en minder complexe organisatieniveaus

Structuren op meer en minder complexe organisatieniveaus

Een van de grootste ontdekkingen en doorbraken in het begrijpen van de natuur is dat de organisatie van de wereld bestaat uit verschillende niveaus met een duidelijke rangorde. Om een menselijk lichaam te begrijpen en om ziektes te kunnen genezen, moeten we rekening houden met de organisatie van weefsels, cellen, organellen (onderdelen van de cel), moleculen en in sommige gevallen zelfs met atomen. Onze extreem ingewikkelde 'interne scheikunde' is mogelijk dankzij enkele ijzer-, kobalt- en koperatomen, die deel uitmaken van enzymen, en zonder welke uiteenlopende levensprocessen niet mogelijk zouden zijn. We kunnen zelfs verder inzoomen dan het niveau van atomen, en dan komen we bij kernen en elektronen (onderdelen van het atoom), bij kerndeeltjes en nog een stap verder bij quarks (de kleinste deeltjes waaruit atomen zijn opgebouwd) en gluonen (deeltjes aanwezig in de kern van atomen). Deze niveaus in de rangorde zijn echter niet belangrijk voor waar we hierna over schrijven.

Grafen

Atomen: de bouwstenen van alle materialen

Wanneer we naar het moleculaire niveau of nog dieper inzoomen, dan zien we dat de variatie aan bouwstenen steeds verder afneemt. Er is een enorme hoeveelheid verschillende levende wezens, maar de belangrijkste 'moleculen van het leven', eiwitten en nucleïnezuren, bestaan uit slechts een klein aantal verschillende atomen. Koolstof, waterstof, zuurstof, stikstof, fosfor en zwavel zijn hiervan de belangrijkste. Er zijn ongeveer honderd verschillende typen atomen in de wereld om ons heen (verschillende chemische elementen uit het Periodiek Systeem der Elementen), maar deze atomen kunnen worden samengevoegd op een oneindig aantal manieren. Dat zorgt voor de enorme variatie aan materialen in onze wereld. Dit is te vergelijken met onze taal: met slechts 26 letters uit het alfabet kunnen oneindig veel teksten worden geschreven. In computers is het zelfs zo dat alles wordt opgebouwd uit combinaties van slechts twee symbolen: 0 en 1, de zogenaamde binaire taal.

The image shows a standard periodic table of elements. A red arrow points to the element Carbon (C), which is located in group 14 (IVA) and period 2. The table includes element symbols, atomic numbers, and names. A legend at the top identifies various groups: Group 1 (IA) Alkali metals, Group 2 (IIA) Alkaline earth metals, Group 10-11 (IB, IIB) Transition metals, Group 12 (IIB) Post-transition metals, Group 13 (IIIA) Boron group, Group 14 (IVA) Carbon group, Group 15 (VA) Nitrogen group, Group 16 (VIA) Chalcogens, Group 17 (VIIA) Halogens, and Group 18 (VIIIA) Noble gases. It also lists other categories like Nonmetals, Metals, Metalloids, Other nonmetals, Alkali metals, Alkaline earth metal, Lanthanoids, Actinoids, Halogens, Noble gases, and Transition metals.

Periodiek Systeem der Elementen

Kristallen

Een kristal is een materiaal waarin de atomen of moleculen op een regelmatige manier zijn gerangschikt in een kristalrooster. Zelfs als je deze regelmatigheid niet kunt zien met het blote oog, kun je deze op een microscopisch niveau zien met hulpmiddelen. Eerst werd daarvoor gebruikt gemaakt van Röntgenstraling en later van andere technieken zoals bijvoorbeeld Scanning Tunneling Microscopie, uitgevonden door Gerard Binnig and Heinrich Rohrer die daarvoor de Nobelprijs voor de natuurkunde ontvingen in 1986. Deze techniek stelt ons letterlijk in staat om individuele atomen en de regelmatige rangschikking daarvan te zien. Alle eigenschappen van vaste stoffen worden niet alleen bepaald door hun scheikundige samenstelling, maar ook door de manier waarop de atomen zijn gerangschikt.

Grafeen, een verhaal van andere dimensies

Koolstofatomen: diamant, grafiet en grafeen

In dit stukje zal ik verder alleen schrijven over één bijzonder element: koolstof. Dit element, nummer 6 in het Periodiek Systeem der Elementen, is het belangrijkste element in levende wezens. Het is moeilijk om twee mineralen te bedenken die meer verschillen dan het extreem harde, doorzichtige, schitterende en erg kostbare diamant, en het zwarte, zachte, doffe en vrij alledaagse grafiet (bekend van zijn toepassing in potloden). Desondanks zijn dit scheikundig gezien twee vormen (*allotropen*) van het zelfde scheikundige element; Ze bestaan uit *identieke* koolstofatomen. De enorme verschillen in eigenschappen tussen diamant en grafiet worden veroorzaakt door de verschillende posities van de koolstofatomen ten opzichte van elkaar. In diamant is elk koolstofatoom omringd door vier andere koolstofatomen die een ideale tetraëder vormen, een piramideachtige vorm die bestaat uit vier gelijkzijdige driehoeken. Grafiet bestaat uit relatief zwak gebonden lagen en in elke laag is elk koolstofatoom omringd door drie andere koolstofatomen, die een gelijkzijdige driehoek vormen. Dankzij de zwakke binding tussen de lagen is grafiet zacht; de lagen kunnen gemakkelijk over elkaar heen glijden. De scheikundige binding tussen de koolstofatomen in dezelfde laag is echter enorm sterk, zelfs sterker dan de binding tussen de koolstofatomen in diamant. Het is daarom erg lastig om deze binding te vernietigen. Dat is de reden dat grafiet het meest vuurvaste materiaal ter wereld is.



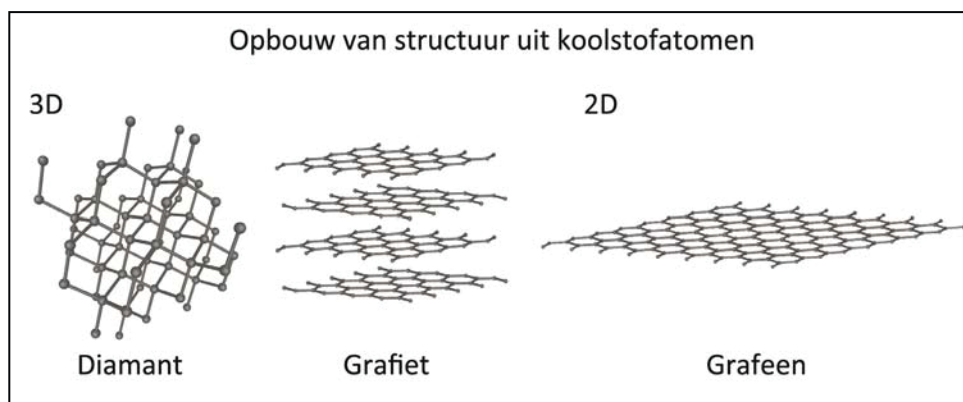
Diamant



Grafiet



Potloden



De opbouw van structuur uit koolstofatomen: diamant, grafiet en grafeen

De opbouw van atomen in de lagen van grafiet vormt de basis voor andere allotropen van koolstof. Een enkele laag grafiet heet *grafeen*. Wanneer grafeen wordt opgerold tot een buisje, wordt het een *koolstof nanobuisje*; en ballen gemaakt van grafeen, noemen we *fullerenen*. Van de koolstofallotropen zijn diamant (sinds de oudheid) en grafiet (op zijn minst 500 jaar) al lange tijd bekend. De koolstof nanobuisjes en de fullerenen werden vrij recent ontdekt en worden intensief bestudeerd sinds eind jaren '80 – begin jaren '90.

Grafeen

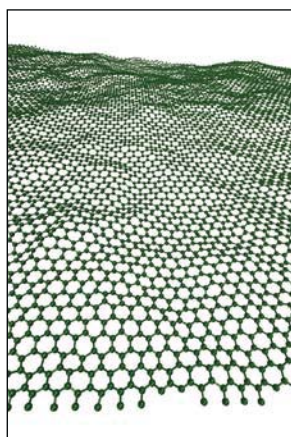
Ontdekking van grafeen

Grafeen zelf werd pas vanaf 2004 een onderwerp van systematisch wetenschappelijk onderzoek, dankzij baanbrekende experimenten door Andre Geim, Kostya Novoselov en hun collega's. Geim en Novoselov ontvingen voor hun werk in 2010 de Nobelprijs voor natuurkunde⁽¹⁾ (zie kader 'Nijmeegse prof krijgt de Nobelprijs Natuurkunde 2010'). Grafeen is een vertegenwoordiger van een compleet nieuwe klasse van materialen, het is het eerste *echt tweedimensionale* kristal. In grafeen zijn de koolstofatomen op een regelmatige wijze gerangschikt in slechts twee dimensies (een plat vlak), waarbij het kristalrooster een honingraatstructuur heeft. Er is echter een theorie die voorspelt dat op temperaturen boven het absolute nulpunt (-273 °C) een tweedimensionale structuur niet vlak zou kunnen zijn; de structuur zou gerimpeld moeten zijn door de thermische beweging van atomen, een beweging die wordt opgewekt door de temperatuur. Na de ontdekking van grafeen is deze theorie experimenteel bevestigd.

Grafeen is een ideaal systeem om deze rimpelingen zowel theoretisch als experimenteel te bestuderen. Waarom zijn deze rimpelingen interessant? Dit komt doordat veel natuurkundige, scheikundige en biologische eigenschappen zijn verbonden met *quasi*-tweedimensionale systemen, zoals celmembranen in de biologie. Deze systemen zijn erg ingewikkeld. Grafeen is niet alleen een *exact* tweedimensionaal systeem, maar ook nog het eenvoudigst mogelijke. Het is daarom het beste testmateriaal om wetenschappelijk onderzoek te doen in twee dimensies. Het vormt dus het ideale proefmateriaal voor de natuurkunde en scheikunde zoals de fruitvlieg het ideale proefdier was en is voor de ontwikkeling van de genetica.



Honingraat structuur



Grafeen

Metalen, halfgeleiders en isolatoren

Alle vaste stoffen kunnen worden ingedeeld in drie categorieën: metalen, halfgeleiders en isolatoren. Halfgeleiders zijn materialen die deels als geleider van elektriciteit en deels als isolatie kunnen fungeren. Deze zijn onmisbaar in onze moderne samenleving. De rol die de computer speelt in het leven en de hedendaagse 'informaticasamenleving' zouden onmogelijk zijn zonder transistors, apparaten die gebruikmaken van specifieke eigenschappen van halfgeleiders. In alle metalen en halfgeleiders wordt elektrische stroom gedragen door elektronen, een type elementair deeltje. Kristalroosters hebben echter een grote invloed op elektronen, en de eigenschappen van elektronen in een kristalrooster zijn zeer verschillend van die in vacuüm, een luchtledige ruimte. Soms verandert zelfs de lading van elektronen (elektronen zijn per definitie negatief geladen) en gedragen de elektronen zich als positief geladen deeltjes (dan worden ze gaten genoemd). Een van de meest opvallende eigenschappen van grafeen is dat elektronen en gaten zich gedragen in grafeen als *ultrarelativistische* deeltjes, dat wil zeggen deeltjes met een enorm hoge snelheid. De eigenschappen van deze deeltjes worden beschreven door een combinatie van de theorie van de kwantummechanica en de relativiteitstheorie.

Om deze nieuwe wereld op microschaal te bestuderen, gebruiken we versnellers. Dit zijn apparaten

Grafeen, een verhaal van andere dimensies

waarin we deeltjes op elkaar laten botsen en waarin we ultrarelativistische, lees ultrasnelle, deeltjes maken. Sommige eigenschappen van de ultrarelativistische deeltjes en de bijbehorende nieuwe natuurkundige theorieën kunnen worden bestudeerd zonder gebruik te maken van deze enorme dure en complexe machines. Deze eigenschappen en natuurkundige theorieën kunnen namelijk worden *nagebootst* in reguliere laboratorium experimenten met grafeen. Dus de kloof tussen materiaalwetenschap aan de ene kant en natuurkunde bij hoge energieën en relativistische kwantummechanica aan de andere kant is een stuk kleiner geworden door grafeen!

Klein tunneling

Een van de wonderbaarlijke fenomenen in de wereld van ultrarelativistische deeltjes is hun mogelijkheid om door muren te gaan, zoals tovenaars in sprookjes en fantasieën dat kunnen. Een beetje meer formeel gezegd, de deeltjes kunnen penetreren door erg hoge en brede

Nijmeegse prof krijgt de Nobelprijs Natuurkunde 2010 ⁽²⁾

Datum bericht: 9 oktober 2011

André Geim, bijzonder hoogleraar aan de Radboud Universiteit Nijmegen, heeft de Nobelprijs voor Natuurkunde 2010 gewonnen. De in Rusland geboren wetenschapper ontvangt de prijs voor zijn onderzoek naar de eigenschappen van grafeen, het dunste materiaal ter wereld. Mede door toedoen van Geim kan grafeen in de toekomst worden gebruikt voor zeer dunne efficiënte elektronica en nanotechnologie. De hoogleraar ontvangt de prijs samen met zijn landgenoot Konstantin Novoselov, die in Nijmegen promoveerde.



Andre Geim en Kostya Novoselov: Nobelprijs 2010

Grafeen is mogelijke opvolger silicium als basis voor computerchips

Grafeen is de platste vorm van koolstof en heeft een dikte van één atoom. Componenten gemaakt van grafeen kunnen in de toekomst kleiner en sneller worden dan die van silicium. Door het nieuwe materiaal in computerchips te gebruiken, kunnen computers dus sneller en zuiniger worden.

De Rus slaagde er in een werkende transistor van grafeen te maken, met als voordeel dat die ook op nanoschaal goed werkt. Ook toonde de hoogleraar aan hoe grafeen halfgeleidend kan worden gemaakt.

200 maal sterker dan staal

Samen met de Nijmeegse theoretisch fysisicus Mikhail Katsnelson heeft Geim naar de mogelijkheden van het materiaal gezocht. Het zou tweehonderd maal beter bestand zijn tegen breken dan staal!

Grafeen

energiebarrières. Dit paradoxale gedrag staat bekend als *Klein tunneling*, genoemd naar de Zweedse natuurkundige Oskar Klein die het theoretisch beschreef in de late jaren 1920. Het was nog nooit waargenomen in ons grote universum, maar het was wel voorspeld dat dit vaak zou voorkomen bij elektronen en gaten in grafeen. Deze voorspelling is intussen experimenteel bevestigd.

Grafeen in de toekomst

Er zijn vele redenen waarom grafeen een veelbelovend materiaal voor allerlei toepassingen is. De belangrijkste toepassing is te vinden in de computertechnologie. In moderne elektronica wordt voornamelijk de buitenkant van halfgeleidende materialen gebruikt. De bulk, die zich aan de binnenkant bevindt, is slechts ballast. Grafeen heeft in een zekere zin geen enkele ballast, het bestaat alleen maar uit buitenkant. Daarom is het een droommateriaal voor de volgende generatie elektronica, waarin men hoopt om halfgeleiders van één atoom dik te gebruiken om op deze manier vele malen meer transistors in hetzelfde volume te kunnen stoppen. Op die wijze kan een echte doorbraak worden bereikt in de mogelijkheden van een computer. Dit is nu nog een droom en geen werkelijkheid, maar er zijn al wel enkele hoopgevende resultaten in deze richting. Er zijn ook vele andere, wellicht minder ambitieuze, maar zeer tastbare en belangrijke toepassingen. Zo lijkt grafeen een ideaal materiaal voor touchscreens: het is doorzichtig, elektrisch geleidend en erg sterk. Dit type apparaten wordt in de zeer nabije toekomst op de markt verwacht, misschien al binnen een of twee jaar. Daarnaast is grafeen het materiaal met de beste warmtegeleiding ter wereld. Daarom kan het worden gebruikt om warmte weg te voeren van elektronische schakelingen. De hitte die ontstaat bij het gebruik is namelijk een van de belangrijkste beperkingen in de verdere ontwikkeling van elektronica. Grafeen kan ook worden gebruikt als ondergrond in scheikundig en biologisch onderzoek. Hoewel het slechts één atoom dik is, is het tien keer zo sterk als staal en kan het een gewicht dragen dat een miljard keer groter is dan het eigen gewicht.

Om al deze mogelijkheden werkelijkheid te laten worden, hebben we uiteraard een industriële methode nodig om op goedkope wijze stukken grafeen te maken die groot genoeg zijn. Deze grootte gaat dan om twee dimensies, in de derde dimensie heeft grafeen tenslotte altijd de dikte van één atoom. In de eerste experimenten, gedaan door Geim en Novoselov, werd een simpele 'plakbandmethode' gebruikt. Als je een stukje plakband op grafiet plakt en daarna op een geschikte ondergrond, zullen er soms miljoenen lagen, soms duizenden lagen en soms slechts één laag koolstof aan de ondergrond zijn gehecht. Je kunt daarom zeggen dat het maken van grafeen een fluitje van een cent is. Iedereen die met een potlood op papier schrijft, maakt zo nu en dan een potloodstreep met de dikte van één atoom. Het probleem was echter om deze enkele lagen eerst te identificeren, dan te scheiden van de ondergrond, er vervolgens elektrische contacten aan te verbinden en ten slotte de natuurkundige eigenschappen ervan te bestuderen.

Deze simpele methode maakt nog steeds de beste kwaliteit grafeen voor wetenschappelijk onderzoek. De grootte van deze plakken kan enkele millimeters in doorsnede worden. De methode is echter duidelijk niet geschikt als technologisch proces voor massaproductie in de industrie. De plakken grafeen die op deze manier worden gemaakt zijn namelijk extreem duur, de prijs ervan kan oplopen tot duizend euro voor een plakje van een millimeter in doorsnede. Er zijn diverse methoden ontwikkeld om dit probleem op te lossen. Momenteel lijkt de meest veelbelovende manier *chemische dampdepositie* te zijn. Bij deze techniek wordt koolstof in dampvorm op een geschikte ondergrond gecondenseerd tot vaste stof. Omdat koper een kristalstructuur heeft die erg goed overeen komt met de kristalstructuur van grafeen, wordt koper meestal als ondergrond

Project 'Grafeen' de klas in!

gebruikt. Na de depositie, het neerslaan van de damp op de ondergrond, wordt het koper opgelost in zuur en kan het worden teruggewonnen voor verder gebruik. Op deze manier kan men stukken grafeen maken die zo groot zijn dat ze een doorsnede hebben van ongeveer een meter. Andere metalen zoals nikkel, ruthenium of iridium kunnen ook worden gebruikt, maar voor iridium geldt bijvoorbeeld dat het veel duurder is dan koper en veel minder makkelijk reageert met andere stoffen. Dat laatste zorgt ervoor dat het moeilijk is om het iridium als ondergrond te verwijderen nadat het grafeen gevormd is.

In de zeven jaar na de eerste experimenten met grafeen hebben we een enorme vooruitgang geboekt in het waarnemen van de miraculeuze eigenschappen van grafeen, in het theoretisch begrijpen ervan, in het bouwen van apparaten waarin grafeen wordt gebruikt en in de productiemethodes van grafeen. Het lijkt erop dat we slechts aan het prille begin staan van het grafeentijdperk en dat dit materiaal niet alleen op drastische wijze de wetenschap kan veranderen, maar zelfs ons dagelijks leven.

Verwijzingen

- (1) Deze tekst is gebaseerd op het persbericht van de Radboud Universiteit Nijmegen van 1 mei 2011. <http://www.ru.nl/@808110/koninklijke/> (10-10-2011)
- (2) Persbericht van de Radboud Universiteit Nijmegen van 9 oktober 2011. <http://www.ru.nl/@786848/andre-geim-wint/> (10-10-2011)

Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen

Dit boek is een uitgave van het Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen (WKRU). Het WKRU is een regionaal samenwerkingsverband tussen de Radboud Universiteit Nijmegen, het Nijmegen Centre for Molecular Life Sciences (NCMLS) van het UMC St Radboud, CSG Centre for Society and the Life Sciences, het Expertisecentrum Nederlands (EN), het Kenniscentrum Wetenschap en Techniek Gelderland (KWTG) van de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen (HAN) en het basisonderwijs.

Missie

Het WKRU heeft tot doel de relatie tussen de Radboud Universiteit Nijmegen en het (basis)-onderwijs te versterken. Hiermee wil het WKRU de houding van (aankomende) leraren en leerlingen ten opzichte van wetenschap en techniek positief beïnvloeden. Dit wil het WKRU realiseren door excellente wetenschappers, jonge onderzoekers, pabo-studenten en leerlingen samen te brengen rondom maatschappelijk relevante en excellente wetenschappelijke resultaten van de Radboud Universiteit en deze resultaten te vertalen naar activiteiten voor het basisonderwijs. Centraal staat het bevorderen van de onderzoekende houding van leerlingen en (aankomende) leraren.

Organisatie

De organisatie van het Wetenschapsknooppunt waar het programma en het beleid uitgestippeld wordt bestaat uit drie medewerkers en een stuurgroep. In de stuurgroep zijn er verschillende partijen vertegenwoordigd die samenwerken binnen het wetenschapsknooppunt.

Het WKRU bestaat uit de volgende medewerkers:

- Dr. Marieke Peeters, projectleider
- Winnie Meijer MSc, projectmedewerker
- Elke Jacobs, communicatiemedewerker

De stuurgroep van het WKRU bestaat uit:

- Prof. dr. Carl Figdor, initiator WKRU en hoogleraar Immunologie in het NCMLS van het UMC St Radboud.
- Prof. dr. Ludo Verhoeven, hoogleraar Orthopedagogiek aan de Radboud Universiteit Nijmegen en wetenschappelijk directeur van het EN.
- Drs. Betty van Waesberghe, voorzitter van de instituutdirectie van de HAN Pabo's (Pabo Groenewoud Nijmegen en Pabo Arnhem).
- Dr. Roald Verhoeff, universitair docent Wetenschapscommunicatie bij het Institute for Science, Innovation, and Society (ISIS) van de Radboud Universiteit Nijmegen.

Foto- en illustratieverantwoording

| | |
|---|--|
| Aleksandr Kurganov/ 123RF: | p. 60 (vlinder) |
| AlexanderALUS: | p. 62 (grafeen als kippengaas) bron: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Graphen.jpg |
| Annalisa Fasolino: | p. 45 |
| Denis Tabler/ 123RF: | p.129 (lief lieveheersbeestje) |
| Dick van Aalst: | p. 15, 46, 90 |
| Elke Jacobs: | illustratie omslag, tip-symbool, DVD-symbool en gedichtenkader |
| Erik van 't Hullenaar: | p. 17 |
| Gerdien Jansen: | p. 129 (bovenste twee) |
| Gerard Verschooten: | p. 90 |
| I.A. Folkertsma: | p. 129 (lieveheersbeestjesplaag) |
| Iakov Filimonov/ 123RF: | p. 61 |
| Irina Tischenko/ 123RF: | p. 50 |
| Jelena Zaric/ 123RF: | p. 48 |
| Luisa Venturoli/ 123RF: | p 49 (potloden) |
| Oleg Korobchanu/ 123RF: | p.123 (knuffelbeer) |
| Piet Musterd: | p. 60 (voorbeeld translatiesymmetrie) |
| Ruslan Olinchuk / 123RF: | p.123 (grizzly beer) |
| Sergii Popov/ 123RF: | p. 49 (diamant) |
| Wetenschapsknooppunt Radboud Universiteit Nijmegen: | p. 6, 7, 12, 24, 25, 27, 30, 31, 33, 35, 37, 38, 44, 56, 58, 59, 60, 62, 63, 64, 72, 73, 76, 78, 82, 88, 104, 106, 108, 110, 111, 113, 114, 115, 124, 127, 128, 132, 133 |
| Winnie Meijer: | p. 49*, p. 47 & 66**, 67 |

Bronvermelding:

| | |
|--|---|
| p. 57: | http://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:Sodium_chloride_crystal.png |
| p. 60: (voorbeeld draaisymmetrie): | http://en.wikipedia.org/wiki/File:The_armoured_triskelion_on_the_flag_of_the_Isle_of_Man.svg |
| p. 62: (grafeen als kippengaas): | http://en.wikipedia.org/wiki/File:Graphen.jpg |
| p. 62: (opbouw van een kristal): | http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sodium-chloride-3D-ionic.png |
| p. 49 : (grafiet): | http://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:GraphiteUSGOV.jpg |
| *Bewerking van: Eight_ Allotropes_of_Carbon.png | Bron: http://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:Eight_Allotropes_of_Carbon.png , Origineel gecreëerd door Michael Ströck (mstroeck) |
| **Bewerking van foto's machten van tien. Bron van de foto's: | http://www.e-klassen.nl/access/content/group/e-klas-project/gepubliceerd/nlt/Meten%20aan%20melkwegstelsels/html%20Jorn/html/machten_van_10.htm |
| Materiaal horende bij de module "Meten aan melkwegstelsels". | Auteur: Stichting Leerplan Ontwikkeling. Bron: http://www.e-klassen.nl/portal/site/3b094573-ffa1-41a2-b9b5-f051161b01ee/page/e09f6195-4603-4060-9364-0c290aa5c9ea |

Met betrekking tot enkel illustratiemateriaal is het de uitgever ondanks zorgvuldige inspanningen daartoe, niet gelukt eventuele rechthebbende(n) te achterhalen. Mocht u van mening zijn (auteurs)rechten te kunnen doen gelden op illustratiemateriaal in deze uitgave dan verzoeken wij u om contact op te nemen met de uitgever.