

KVANTNA ELEKTRODINAMIKA V SLEDI SVINČNIKA

CHRISTOPH GADERMAIER in JURE STRLE

Odsek za kompleksne snovi

Institut Jožef Stefan

PACS: 73.22.Pr, 72.80.Vp, 81.05.ue, 78.67.Wj

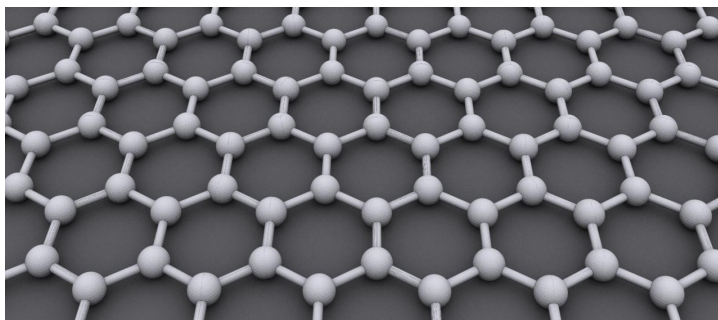
Predstavljamo grafen, za raziskave katerega je bila lani podeljena Nobelova nagrada za fiziko, in njegove fizikalne lastnosti, proizvodnjo ter možnosti uporabe. Osredotočamo se na elektronsko strukturo in lastnosti, izvirne pojave, povezane s kvantno elektrodinamiko, ter uporabo v optiki in elektroniki.

QUANTUM ELECTRODYNAMICS IN A PENCIL TRACE

On the occasion of last year's Nobel Prize in physics we give an overview of the physical properties, production, and potential applications of graphene. We concentrate on the electronic structure and properties, the most original phenomena related to quantum electrodynamics, and optical and electronic applications.

Iz makroskopskega sveta smo vajeni, da se osnovne fizikalne in kemične lastnosti snovi ne spreminjajo z velikostjo predmeta, ki ga snov tvori. Če kos kovine zgolj prerežemo na dva dela, bosta še vedno imela enako gostoto, trdoto, barvo, prevodnost in tako dalje. Toda če kovino režemo še naprej na čedalje manjše kose, se bodo pod neko mejo lastnosti lahko začele spreminjati. Kot primer vzemimo delce snovi, katerih velikost je primerljiva z valovno dolžino vidne svetlobe; sipanje svetlobe na njih in zato tudi barva delcev sta odvisna od njihove velikosti. Kljub nepoznavanju fizikalnega ozadja so to dejstvo izkoriščali že v srednjem veku, ko so steklu primešali nanodelce in dobili barvno steklo za zasteklitve cerkva. Če kose manjšamo še naprej do velikosti valovnih dolžin elektronov v trdnih snoveh, to je nekaj nanometrov, postanejo tudi elektronske lastnosti snovi močno odvisne od njene velikosti in oblike. Dimenzionalna odvisnost funkcionalnih lastnosti snovi, kot je električna prevodnost, pomeni velik nanotehnoški potencial, saj omogoča izdelavo materialov s popolnoma novimi lastnostmi ali kombinacijami lastnosti, ki se jih da prilagajati želeni uporabi s spreminjanjem velikosti ali oblike snovi na nanoskali.

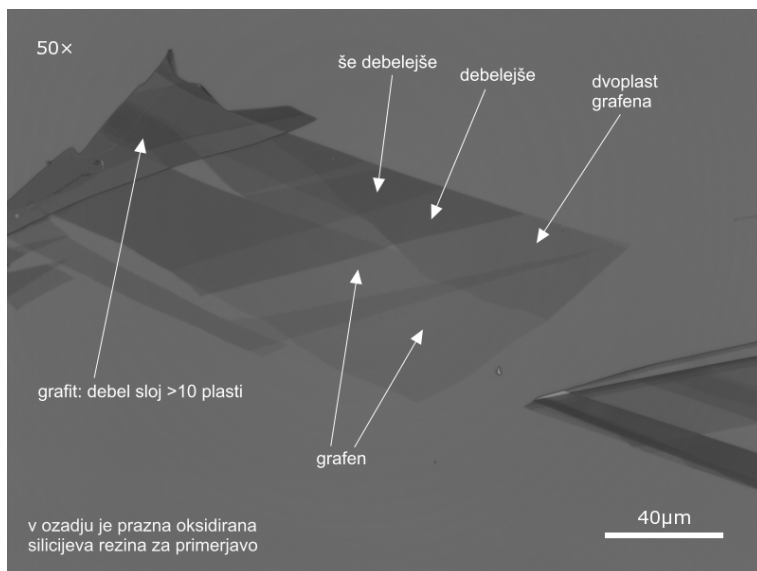
Grafit je ena pogostejših oblik čistega ogljika. Njegovo plastovito strukturo sestavljajo dvodimenzionalne šesterkotne kristalne mreže atomov ogljika, ki so naložene druga na drugo. Vsaka posamezna mreža se imenuje grafen in potrebujemo jih kar tri milijone, da dobimo grafit debeline



Slika 1. Idealna dvodimenzionalna šestkotna kristalna struktura grafena. Razdalja med dvema sosednjima ogljikovima atomoma v mreži je 0,142 nm [20].

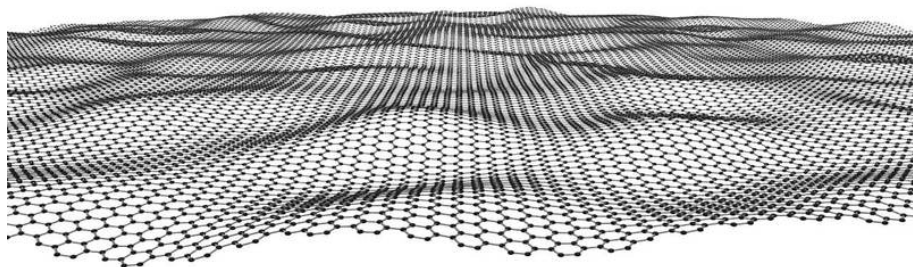
enega milimetra (glej sliko 1). Ko pišemo z grafitnim svinčnikom, se plasti grafita v mini trgajo in odlagajo na papirju. Takemu razcepljanju pravimo eksfoliacija in pravzaprav gre tudi tu za tanjšanje materiala, ki lahko privede do spremembe lastnosti snovi. Čeprav plasti v sledi svinčnika še vedno vsebujejo sloje grafita, sestavljene iz več grafenskih mrež, jih je možno dodatno eksfoliirati na presenetljivo preprost način. Lanska Nobelova nagrajenca za fiziko Andre Geim in Konstantin Novoselov sta leta 2004 uporabila navaden lepljiv trak, da sta odtrgala plast grafita – pravzaprav je šlo za visokourejen pirolitski grafit, čistejšo in bolj urejeno različico grafita od običajne mine svinčnika – in jo nato pritislila ob substrat. Tako se od tanke plasti grafita na lepljivem traku odlomijo drobne zaplate. Nekatere od njih so sestavljene iz le nekaj ali celo iz ene same plasti grafena. Kljub zelo slabemu izkoristku takega postopka pa pravi izziv ni dobiti posamezne plasti grafena, ampak jih ločiti od preostalih večplastnih slojev. Geim in Novoselov sta odkrila, da se grafen pod optičnim mikroskopom lepo loči od praznega substrata (glej sliko 2), če je kot substrat uporabljena 300 nanometrov debela plast silicijevega dioksida na siliciju, ki se sicer zelo pogosto uporablja v polprevodniški industriji. Debelina oksidne plasti je bistvena, saj že pri 315 nanometrih kontrast, ki je posledica interference v oksidni plasti, popolnoma izgine [1].

V raziskovalni skupnosti je bilo to odkritje nekoliko presenetljivo, saj so teoretiki napovedovali nestabilnost posameznih dvodimenzionalnih kristalov in ti naj bi v naravi obstajali zgolj kot del drugega materiala, kot na primer v grafitu. Pravzaprav je narava elegantno zaobšla teoretične omejitve: posamezne plasti grafena niso povsem dvodimenzionalne, kajti niso popolnoma ravne, ampak nežno valovite s karakteristično dolžino okrog 10 nanometrov (glej sliko 3) [2].



Slika 2. Slika grafenskih plasti, posneta z optičnim mikroskopom. ©Peter Blake, Graphene Industries, ltd.

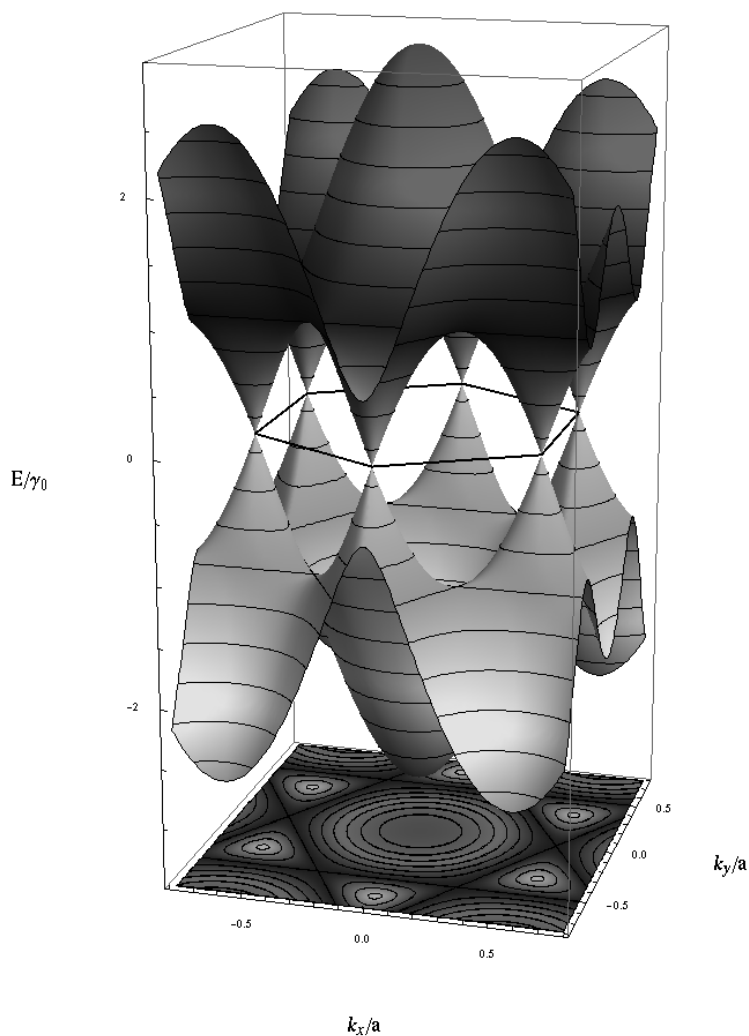
Prvi Geimov in Novoselovov eksperiment na nekajplastnih in enoplastnih grafenskih slojih je bila meritev osnovnih električnih lastnosti – prevodnosti, elektronske mobilnosti in vpliva električnega polja [3]. Električno prevodnost določa sipanje elektronov na nečistočah in nihanjih kristalne mreže. Povprečna prosta pot elektronov med sipanji v bakru pri sobni temperaturi meri okrog 40 nanometrov. V grafenu pa znaša osupljivih 400 nanometrov, kar je vzrok tudi izjemno visoki elektronski mobilnosti. Teoretični izračuni elektronskih pasov so predvidevali, da se v grafenu zapolnjen valenčni pas in prazen prevodni pas ne sekata, ampak le dotikata (glej sliko 4) – takim materialom pravimo „polprevodniki z ničelno energijsko režo“ – zato so v grafenu pričakovali nizko koncentracijo nosilcev naboja, ki naj bi bila tudi močno odvisna od temperature. A tudi v najčistejših vzorcih, kjer ni dodatnih nosilcev naboja zaradi nečistoč, je upor nepričakovano majhen. Kaže celo, da obstaja naravna zgornja meja upora, ki znaša okrog $1/4$ von Klitzingove konstante kvanta upora $R_k = h/e^2$. V tranzistorju na poljski pojav (ang. Field Effect Transistor – FET) povečujemo koncentracijo nosilcev naboja, to je elektronov v prevodnem pasu ali vrzeli v valenčnem pasu, linearno z napetostjo na vratih $n = \beta V_G$, $\beta = 7,2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{V}^{-1}$, zaradi česar upor pada z $1/V_G$. Grafenskih tranzistorjev zaradi kvantiziranega upora



Slika 3. Model grafenske membrane. ©Max-Planck Institute for Solid State Research.

nikoli ne moremo popolnoma izklopiti, kar zahteva nekoliko drugačne prijeme od tistih v sodobnih vezjih, ki temeljijo na vklopljenih in izklopljenih tranzistorjih. Po drugi strani visoka elektronska mobilnost grafenskih vezij obljublja izjemne frekvence preklapljanja, dosegajoč celo terahertze.

S stališča temeljne fizike pa je verjetno najbolj osupljiv elektronski pojav v grafenu obstoj „brezmasnih elektronov“ ali „Diracovih delcev“ [4], ki je navdihnil naslov več Geimovih predavanj in tudi pričujočega članka. Za elektrone in druge masivne delce v vakuumu velja povezava med njihovo valovno dolžino in energijo $E = \frac{h^2}{2m\lambda^2} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$, kjer je $k = 2\pi/\lambda$ dolžina valovnega vektorja. Energija E kot funkcija k za masivne proste delce ima obliko parabole, katere ukrivljenost je določena z maso delca. Za brezmasne delce, denimo fotone, pa velja $E = \frac{hc}{\lambda} = \hbar ck$ in graf $E(k)$ je premica ali, če upoštevamo vektorsko naravo k in dovolimo gibanje v ravnini, plašč stožca, katerega naklon je določen s svetlobno hitrostjo. Drugače od prostih delcev elektroni v kristalih interagirajo z električnim poljem pozitivno nabite kristalne mreže, zato se odvisnost $E(\vec{k})$ ali disperzija razlikuje od parabol prostih elektronov. Navidezni masi elektronov, ki ustreza ukrivljenosti disperzije v kristalih, pravimo efektivna elektronska masa in je lahko precej drugačna od dejanske elektronske mase. Posebnost grafena je, da za elektrone v prevodnem in vrzeli v valenčnem pasu velja enaka stožčasta odvisnost kot za brezmasne delce, le da naklon ne ustreza svetlobni hitrosti, marveč Fermijevi hitrosti v_F , ki je v grafenu približno 10^6 m/s. Tudi hitrost elektronov v grafenski mreži je neodvisna od njihove energije, podobno kot



Slika 4. Izračunana energija elektronov v grafenu za valovne vektorje $\vec{k} = (k_x, k_y)$. Stožčasti predeli nezasedenih elektronskih stanj in zasedenih stanj se dotikajo brez energijske reže [21].

velja za fotone. Fermijeva hitrost v grafenu je tako elektronski ekvivalent svetlobni hitrosti pri fotonih. Popolna simetrija med disperzijama elektronov in vrzeli ustreza elektronsko-pozitronski simetriji fizike visokih energij. Efekti kvantne elektrodinamike, ki povezuje kvantno mehaniko in posebno relativnost, so pogosto obratno sorazmerni s hitrostjo svetlobe c in so v grafenu tako ojačani za faktor $c/v_F \approx 300$, kar omogoča kvantnoelektrodinam-

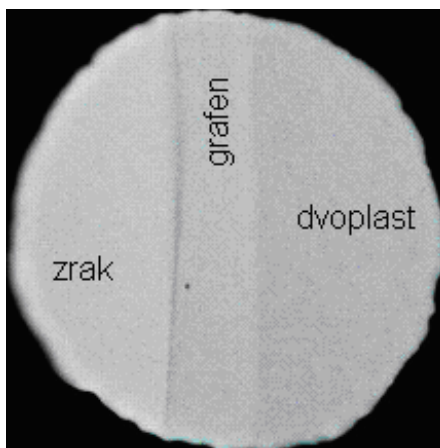
ske raziskave tudi brez zelo drage opreme v skoraj namiznih eksperimentih, lahko bi rekli „v sledi svinčnika“.

Prvi eksperimentalni dokaz stožčaste odvisnosti disperzije v grafenu je bilo opažanje Shubnikov-de Haasovega efekta. Elektroni v magnetnem polju se premikajo po vijačnici, katere os je vzporedna s poljem. Kot razloži kvantna mehanika, lahko njihove vrtilne količine in energije zavzemajo le določene vrednosti. Če postavimo trdno snov v magnetno polje in nato polje linearno spreminjamo, se ti dovoljeni energijski nivoji premikajo, kar povzroči periodično modulacijo števila prevodnih elektronov in zato tudi modulacijo prevodnosti kot funkcije magnetnega polja. Iz odvisnosti tega efekta od števila prevodnih elektronov kot posledice električnega polja lahko izračunamo disperzijsko zvezo in za grafen dobimo $E \propto k$.

Drug primer kvantnoelektrodinamskega efekta v grafenu je Kleinovo tuneliranje. Kvantnomehansko tuneliranje je efekt, pri katerem obstaja končna verjetnost, da delec premaga energijsko prepreko, ki je višja od njegove kinetične energije, kar ni v skladu s klasično fiziko ali zdravo pametjo. Ta efekt je pomemben pri veliko različnih pojavih, od radioaktivnega razpada do izmenjave elektronov ali protonov pri encimih. Verjetnost za tuneliranje se precej hitro manjša z naraščanjem višine ali širine energijske prepreke. Kvantna elektrodinamika pa predvideva, da gredo lahko brezmasni Diracovi delci neovirano skozi prepreko, tudi če je ta precej visoka ali široka, če nanjo vpadajo pod skoraj pravim kotom. V grafenu so Kleinovo tuneliranje elektronov že potrdili tudi eksperimentalno [5].

Kvantna elektrodinamika opisuje elektromagnetno interakcijo prek sklopitvene konstante za to interakcijo, ki je znana tudi pod imenom konstanta fine strukture. To je brezdimenzijsko število α , ki ga dobimo iz preostalih temeljnih konstant narave: $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$. Definicija konstante fine strukture je pogosto zapisana v sistemu enot CGS, kjer je člen $4\pi\epsilon_0$ izpuščen. V grafenu je prevodnost pri visokih frekvencah konstantna: $G = \frac{e^2}{4\hbar}$, nanjo pa je neposredno vezana optična prepustnost: $T = \frac{1}{(1+2\pi G/c)^2} = \frac{1}{(1+\pi\alpha/2)^2} \approx 1 - \pi\alpha$. Tako vsaka grafenska plast absorbira približno $\pi\alpha \approx 2,3\%$ svetlobe neodvisno od valovne dolžine, kar so eksperimentalno potrdili za celoten spekter vidne svetlobe in večje dele spektra infrardeče svetlobe (glej sliko 5)[6].

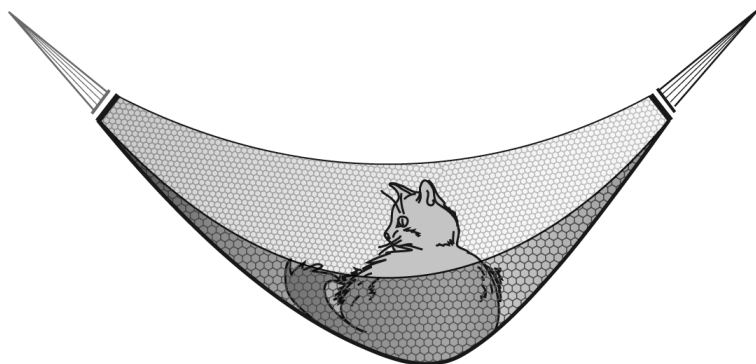
Grafen ima poleg zanimivih pojavov temeljne fizike tudi več praktično uporabnih lastnosti. Omenili smo že grafenske tranzistorje, ki imajo v teoriji lahko izjemne frekvence preklapljanja. Morda za izdelavo integriranih vezij še bolj pomembna pa je visoka toplotna prevodnost grafena, ki je kar



Slika 5. Slika 50 mikrometrov široke odprtine, ki je delno zastrta z grafenom in njegovo dvoplastjo [22].

desetkrat višja od toplotne prevodnosti bakra. Odvajanje toplote je namreč eden večjih izzivov polprevodniške tehnologije, saj sodobni mikročipi že zdaj proizvajajo več toplote na enoto prostornine kot plošče na štedilniku. Druga ideja je uporaba grafena kot prosojne elektrode v ploskih zaslonih. Za zdaj kot optično prepustne elektrode največ uporabljajo indijev kositrov oksid (ang. Indium Tin Oxide – ITO), ki omogoča tehnološko gledano najučinkovitejšo kombinacijo električne prevodnosti in optične prepustnosti. Toda indij je precej redka kovina in zaradi krčenja svetovnih zalog so materiali, ki bi lahko primerno nadomestili ITO, zelo iskani. Za industrijo sprejemljiva vrednost absorpcije svetlobe v takih elektrodah je 10–15 %, in ker vsaka grafenska plast absorbira 2,3 % svetlobe, bi bili uporabni tudi nanosi, ki vsebujejo do šest plasti. Grafen lahko tudi ukrivljamo, kar omogoča izdelavo upogljive elektronike in zaslonov. Naredili so že manjše delujoče prototipe takih elektrod [7] in neodvisno od tega tudi večplastne grafenske filme premera skoraj 1 meter [8]. Morda se bodo naprave na podlagi grafena že v nekaj letih začele pojavljati v naših pisarnah in dnevnikih sobah.

Poleg svojih osupljivih električnih, optičnih in toplotnih lastnosti pa ima grafen tudi izjemno mehansko trdnost. Hipotetična viseča mreža iz ene same plasti grafena površine 1 m^2 bi lahko nosila breme 4 kilogramov – denimo mačko (kot je karikirano na sliki 6), tehtala pa bi zgolj 0,77 mg, kar ustreza masi enega mačkinega brka. Obenem lahko grafen elastično raztegnemo za 20 %, kar je več kot pri kateremkoli drugem kristalu [9].

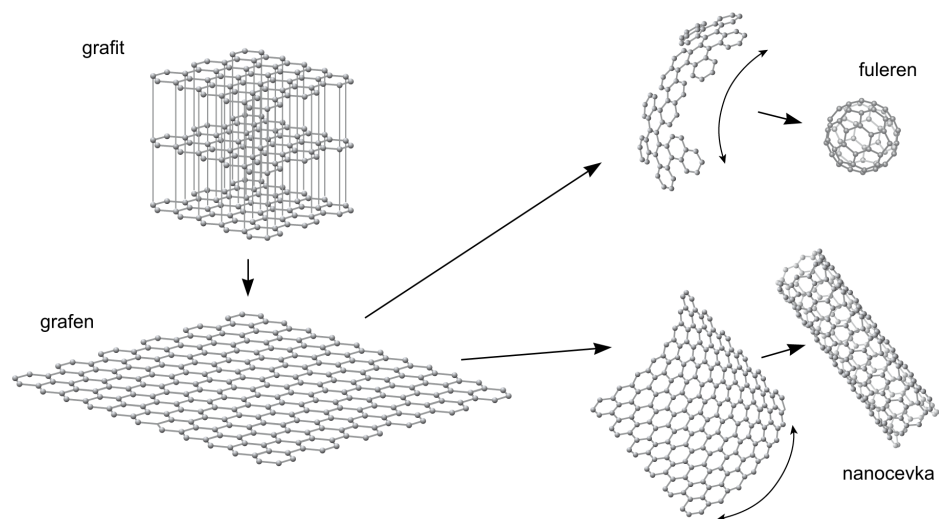


Slika 6. Ena sama plast grafena bi lahko rabila kot viseča mreža srednje veliki mački. Ilustracija: Airi Illiste ©The Royal Swedish Academy of Sciences.

Čeprav je uporaba čistega grafena v gradbene namene za zdaj še utopija, pa ni izključeno dodajanje grafena v plastično maso in jo tako ojačati podobno, a veliko močnejše, kot to lahko dosežemo z ogljikovimi vlakni.

Nove možnosti uporabe grafena vključujejo tudi kemijsko zaznavanje. Delovanje plinskih senzorjev temelji na adsorpciji molekul plina na površini trdne snovi, ki zato nekoliko spremeni svoje fizikalne lastnosti; navadno merijo spremembe električne prevodnosti. Seveda se lastnosti spremenijo le v bližini površine, globlje v notranjosti je vpliv adsorpcije premajhen. Dvodimenzionalni materiali pa notranjosti nimajo, saj so vsi njihovi atomi blizu površine, grafen ima celo samo površinske atome, zato so kot senzorji lahko izjemno občutljivi. Grafen odlikujejo zelo nizek šum, dober stik s kovinskimi elektrodami in velika prevodnost že z malo dodanimi nosilci naboja. Zahvaljujoč tako prikladnim lastnostim je Geimova in Novoselovova skupina na mikronskem kosu grafena začutila posamezno molekulo NO_2 , kar je tako rekoč skrajna meja zaznavanja [10].

Enostavnost eksfoliacije z lepilnim trakom sicer omogoča dostop do raziskovanja grafena vsem laboratorijem, a iznašli so že metode, ki privedejo do večjih količin grafena, večjih mrež ali celo mrež nadzorovanih oblik. Ena izmed njih je epitaksialna rast grafena na silicijevem karbidu (SiC) [11]. Grafenske plasti zaradi močne interakcije s površino v tem primeru ne moremo obravnavati kot ločenega dvodimenzionalnega kristala, kar sicer omogoča boljšo stabilnost in večje mreže, po drugi strani pa to vpliva na elektronske lastnosti grafena in za veliko raziskav ga je treba najprej prenesti s podlage. Drugi način je rast grafena na določenih kovinskih substratih iz organskih



Slika 7. Molekule fulerena C_{60} in ogljikove nanocevke si lahko zamislimo kot zgrajene iz primerno oblikovanih kosov grafenskih mrež. Ilustracija: Airi Illiste ©The Royal Swedish Academy of Sciences.

par, denimo metana, prek postopka, imenovanega nanašanje s kemičnim naporevanjem (ang. Chemical Vapour Deposition – CVD) [12]. To je cenejša metoda od epitaksialne rasti in je tudi privedla do največjih mrež grafena. Za mreže točno določenih oblik pa so organski kemiki predlagali postopek izgradnje od spodaj navzgor. Nekatere organske molekule, kot je naftalen, so sestavljene iz nekaj benzenovih obročev, ki si delijo stranico ali dve s sosedi. Če pričnemo s takimi molekulami in iz njih z dodajanjem benzenovih obročev postopoma zgradimo večje molekule, kjer so vse stranice benzenovih obročev (razen robnih) deljene s sosedi, prav tako dobimo grafensko mrežo [13]. Tudi eksfoliacija grafena se je spremenila in jo sedaj izvajajo bolj velikopotezno; namesto ročne eksfoliacije z lepilnim trakom zdaj uporabljajo strižne sile, ki nastajajo ob obdelavi grafita z ultrazvokom v primernem topilu, denimo kloroformu [14]. Obdelava v topilu je tehnološko precej zanimiva, ker omogoča nadzorovano nanašanje grafena z različnimi metodami tiska (sitotisk, brizgalno tiskanje).

Grafen ni osnovna enota, iz katere bi bil zgrajen zgolj grafit, ampak tudi druge alotropne oblike ogljika: ogljikove nanocevke in fulereni (glej sliko 7). Ogljikove nanocevke so odprti ali zaprti cilindri, ki si jih lahko predstavljamo

kot v cevke zvite eno- ali večslojne grafenske mreže, najtanjša cevka ima premer med 0,5 in 2 nm. Grafen je „nano“ le v eni dimenziji, nanocevke pa v dveh dimenzijah, zato so njihove elektronske lastnosti močno odvisne od premera in vijačnosti, to je smeri, v kateri smo zvili grafensko mrežo. Obseg in vijačnost cevk določata, ali so nanocevke polprevodne ali kovinske. Tudi grafenski trakovi, se pravi dolge a zelo ozke grafenske mreže, imajo podobno odvisnost od širine in orientacije traku. Ogljikove nanocevke se uporabljajo kot prevodno ali ojačevalno polnilo plastičnih in kompozitnih materialov in za izboljšanje lastnosti površine elektrod litijevih ionskih baterij, kajti elektrode določajo življenjski čas baterij in tudi omejujejo maksimalni tok ter njihovo kapaciteto. Še v letu 2007 je bil grafen veliko dražji od ogljikovih nanocevk, kar pa se je obrnilo, saj je sinteza grafena preprostejša in grafen bi lahko nadomestil nanocevke v obeh primerih.

Fulereni so sferam podobne oblike, narejene iz grafenskih mrež. Zaradi narave kemijskih vezi v grafenu (sp^2 hibridiziran ogljik) vsi koti med vezmi merijo 120° . Pri zvijanju v cevko se vezi nekoliko prilagodijo, a šesterokotna struktura se ohrani. Zvijanja v sferi podobno strukturo pa ni mogoče izvesti samo s šestkotniki ampak si moramo pomagati tudi z drugimi liki. Če uporabimo petkotnike, iz Eulerjeve formule¹, ki povezuje števila oglišč, robov in ploskev poliedra, sledi, da jih potrebujemo natanko 12 ob poljubnem številu šestkotnikov. Vzorec na klasični nogometni žogi je po tem principu sestavljen iz 20 šestkotnikov in 12 petkotnikov. Najznačilnejši predstavnik fulerenov je molekula C_{60} , kjer 60 ogljikovih atomov tvori skoraj sferičen prisekani ikozaeder. Molekula C_{60} deluje kot elektronski akceptor: če je dovolj blizu polimeru s parom elektron-vrzel, elektron preskoči nanjo, vrzel pa ostane na polimeru [15], kar je uporabno pri delovanju sončnih celic. Tako kot pri nanocevkah so tudi pri fulerenih grafenski kosmi zanimiv nadomestek, kajti omogočajo izbiro drugačnih donorjev, polimerov z manjšo energijsko režo, ki lahko izkoriščajo večji del spektra sončne svetlobe.

Če se vrnemo k našemu uvodnemu primeru rezanja kovine na čedalje manjše kose, grafit ob eksfoliaciji obdrži svoje lastnosti do debeline okrog 10 grafenskih slojev. Dvojni sloj grafena je polprevodnik z ničelno energijsko režo in že kaže veliko zanimivih efektov, a elektroni v njem imajo še vedno učinkovito maso, ki znaša približno dvajsetino elektronske mase [16].

Poleg grafita obstaja več drugih plastovitih materialov, zlasti so zanimivi polprevodniki, kot sta borov nitrid BN ali molibdenov disulfid MoS_2 , ki se

¹št. ploskev + št. oglišč = št. robov + 2

prav tako eksfolirata na podobno enostaven način [17]. Zaradi drugačne zgradbe posamezni sloji sicer ne kažejo kvantnoelektrodinamskih efektov, a ju z grafenom veže več drugih lastnosti in se ju kot polprevodnika da uporabljati v dvodimenzionalni elektroniki komplementarno h grafenu. Zaradi navdušenja nad grafenom tudi ti materiali vzbujajo hitro rastoče raziskovalno zanimanje, v Sloveniji predvsem na Institutu Jožef Stefan. Čeprav še ni bila udeležena, je v svojem govoru na podelitvi Nobelovih nagrad Kostja Novoselov namenil precej časa ideji vstavljanja plasti grafena med plasti drugih dvodimenzionalnih materialov ter tako ustvarjanju materialov s povsem novimi uporabnimi lastnostmi [18]. Če se poslovimo z mislijo na novelo E. A. Abbotta, bo naša romanca s ploščatim svetom očitno še dolgo trajala [19].

Nobelova nagrajenca: Andre Geim in Konstantin „Kostja“ Novoselov sta se rodila v Rusiji, Geim leta 1958 v Sočiju in Novoselov leta 1974 v Nižnem Tagilu. Ob razpadu Sovjetske zveze sta se zaradi za raziskovanje neugodnih finančnih razmer kot tisoči drugih znanstvenikov odpravila na Zahod in se srečala v Nijmegenu (Nizozemska), kjer je Novoselov postal Geimov doktorski študent. Kasneje sta se skupaj preselila v Manchester (Velika Britanija), kjer oba predavata kot profesorja. Geim je zaslovel že leta 2000 kot prejemnik Ig Nobelove nagrade, ki je satirična različica Nobelove nagrade in podeljena za najbolj neuporabne znanstvene dosežke. Geim je ugotovil, da najdemo diamagnetizem v vseh materialih, če jih postavimo v dovolj močno magnetno polje, in to pokazal z lebdenjem žabe v magnetnem polju. Trenutno je edini znanstvenik, ki je prejel tako Nobelovo kot Ig Nobelovo nagrado.

LITERATURA

- [1] A. K. Geim in K. S. Novoselov, *The rise of graphene*, Nature Materials **6** (2007), 183–191.
- [2] J. C. Meyer et al., *The structure of suspended graphene sheets*, Nature **446** (2007), 60–63.
- [3] K. S. Novoselov et al., *Electric field effect in atomically thin carbon films*, Science **306** (2004), 666–669.
- [4] K. S. Novoselov et al., *Two-dimensional gas of massless dirac fermions in graphene*, Nature **438** (2005), 197–200.
- [5] A. F. Young in P. Kim, *Quantum interference and Klein tunnelling in graphene heterojunctions*, Nature Physics **5** (2009), 222–226.
- [6] R. R. Nair et al., *Fine structure constant defines visual transparency of graphene*, Science **320** (2009), 1308.

- [7] P. Blake et al., *Graphene-based liquid crystal device*, Nano Letters **8** (2008), 1704–1708.
- [8] S. Bae et al., *Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes*, Nature Nanotechnology **5** (2010), 574–578.
- [9] C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar in J. Hone, *Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene*, Science **321** (2008), 385–388.
- [10] F. Schedin et al., *Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene*, Nature Materials **6** (2007), 652–655.
- [11] C. Berger et al. *Ultrathin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route toward graphene-based nanoelectronics*, Journal of Physical Chemistry B **108** (2004), 19912–19916.
- [12] A. Reina et al., *Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition*, Nano Letters **9** (2009), 30–35.
- [13] I. Diez-Perez et al., *Gate-controlled electron transport in coronenes as a bottom-up approach towards graphene transistors*, Nature Communications **1** (2010), 31.
- [14] Y. Hernandez et al., *High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite*, Nature Nanotechnology **3** (2008), 563–568.
- [15] N. S. Sariciftci, L. Smilowitz, A. J. Heeger in F. Wudl, *Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene*, Science **258** (1992), 1474–1476.
- [16] K. S. Novoselov et al. *Unconventional quantum hall effect and Berry’s phase of 2p in bilayer graphene*, Nature Physics **2** (2006), 177–180.
- [17] K. S. Novoselov et al., *Two-dimensional atomic crystals*, Proceedings of the National Academy of Science **102** (2005), 10451–10453.
- [18] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/ (ogled: 27. 5. 2011).
- [19] E. A. Abbot, *Flatland, a romance of many dimensions*, Seely & Co., first edition, 1884.
- [20] <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Graphen.jpg> (ogled: 27. 5. 2011).
- [21] <http://en.wikipedia.org/wiki/File:GrapheneE2.png> (ogled: 27. 5. 2011).
- [22] http://en.wikipedia.org/wiki/File:Graphene_visible.jpg (ogled: 27. 5. 2011).

<http://www.obzornik.si/>