

Grafen

Manca Podvratnik

19. junij 2009

Eno najodmevnejših odkritij v zadnjem desetletju je odkritje dvodimenzionalnega ogljikovega kristala — grafena. V znanosti je pustil grafen vidno sled. Ovreči so morali domnevno termično nestabilnost dvodimenzionalnih kristalov. Grafen ima mnoge nepričakovane fizične lastnosti, kot npr. velika trdnost in dobra električna prevodnost. Izkaže se, da je prevodne elektrone v grafenu potrebno obravnavati relativistično, tj. z Diracovo in ne Schrödingerjevo enačbo. Ali bo grafen tudi komercialen uspeh, pa bo pokazala prihodnost.

Kazalo

1	Uvod	2
2	Alotropija ogljika	3
3	Odkritje dvodimenzionalnih kristalov	4
4	Elektroni v grafenu	7
4.1	Struktura elektronskih pasov	7
4.2	Električna prevodnost grafena	9
5	Nekatere zanimive lastnosti grafena	11
6	Potencialna uporaba grafena v industriji	13
7	Zaključek	14

1 Uvod

Dvodimenzionalni kristali so bili še pred nekaj leti le teoretični model fizike trdne snovi. Do leta 2004 teoretiki niso bili niti zedinjeni, ali je kristal debeline enega atoma sploh lahko stabilen. Pred petimi leti pa so znanstveniki z Manchesterske univerze in Inštituta za mikroelektronsko tehnologijo iz ruskega mesta Černogolovka poročali o odkritju samostoječih dvodimenzionalnih kristalov [1]. Uspeli so izolirati enoatomske plasti borovega nitrida, grafitu, nekaterih dihalogenidov in kompleksnih oksidov.

Odlika omenjenih tridimenzionalnih kristalov je njihova plastovita struktura. Atome v ravnini držijo skupaj močne kemijske vezi, med kristalnimi ravninami pa imamo šibek van der Waalsov privlak. V primeru grafitu ogljikovi atomi v ravnini xy tvorijo sp_2 elektronske vezi. Tako dobimo dvodimenzionalno heksagonalno kristalno mrežo. Elektron v p_z orbitali je umeščen med kristalnimi ravninami in omogoča električno prevodnost grafitu. Med ravninami, ki so zložene v tesni sklad, deluje že omenjen šibek van der Waalsov privlak.

Iskanje dvodimenzionalnega kristala je pomenilo poskušati mehansko razklati kristal v posamezne kristalne ravnine. Na primeru grafitu to v principu ne pomeni nič drugega, kot potegniti s svinčnikom po papirju ali po kaki drugi podlagi. Seveda nam ostane množica tankih plasti grafitu, med njimi pa morda tudi dvodimenzionalna heksagonalna mreža ogljika, imenovana grafen. V množici tankih plasti grafitu ni preprosto prepoznati in poiskati grafenu. Zato do pred nedavnim ni prišlo do njegovega fizičnega odkritja.

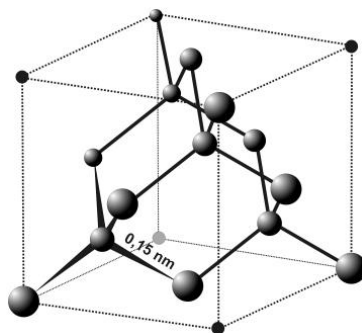
Grafen ima nekatere izjemne lastnosti. Je najmočnejši material, kar ga je človek naredil [2]. Približno dvestokrat močnejši je od gradbenega jekla [3]. Potrebovali bi maso slona, skoncentrirano na konici svinčnika, da bi predrli membrano grafenu. Grafen je naprimer tudi izjemno dober toplotni prevodnik. Med drugim kaže izjemno veliko gibljivost prevodnih elektronov. Napovedujejo mu svetlo prihodnost v industriji. Trenutno se predvsem govori o morebitnih aplikacijah v elektronskih vezjih, in sicer v vse manjših tranzistorjih. Vendar je še prezgodaj, da bi lahko napovedali, ali bo grafen ekonomski uspeh, ali le ljubljeneec teoretikov.

Grafen je trenutno eden najdražjih materialov na svetu. Za plast velikosti preseka človeškega lasu naj bi odšteli več kot tisoč dolarjev [4]. Vendar se v prihodnosti z morebitno komercialno proizvodnjo cena lahko dramatično zmanjša.

2 Alotropija ogljika

Elementarni ogljik se pojavlja v mnogih oblikah. V naravi ga najdemo kot temnosiv grafit ali pa kot prozoren diamant. Pojavlja se namreč v več različnih kristalnih strukturah. Temu pojavu pravimo alotropija.

Diamant odlikujeta velika trdnost in visoka odsevnost svetlobe. Ti lastnosti sta zaznamovali njegovo uspešnost v industriji in draguljarstvu. Pri vezavi atomov v kristalno strukturo sodelujejo vse zunanje elektronske orbitale ogljika. Vsak atom tvori torej štiri kovalentne vezi. To določa njegovo kristalno strukturo, ki jo lahko opišemo kot ploskovno centrirano kubično mrežo, premaknjeno za četrtno telesne diagonale druge ploskovno centrirane kubične mreže (slika 1).

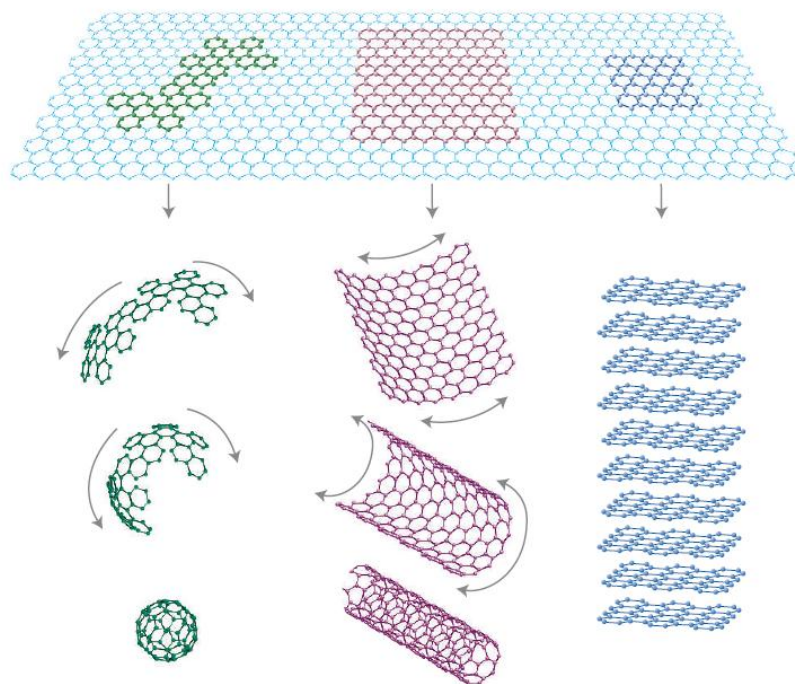


Slika 1: Kristalna struktura diamanta. Vidimo, da atom, ki je premaknjen po telesni diagonali ploskovno centrirane kocke, tvori štiri vezi z najbližjimi sosedi [4].

Grafit je material s plastovito kristalno strukturo. Zato se zelo rad kolje po plasteh. Njegova struktura je tesni sklad heksagonalnih mrežnih ravnin (slika 2 desno). Vsak ogljikov atom v grafitu tvori le tri kovalentne vezi, za razliko od diamanta. Razdalja med najbližjima sosedoma je 0,14 nm, medtem ko je medmrežna razdalja 0,34 nm.

Tu moramo omeniti še ogljikove nanocevkke in fullerene. Ogljikove nanocevkke si lahko predstavljamo kot tanek pas heksagonalne dvodimenzionalne mreže ogljika, zvite v tulec, čeprav je postopek nastajanja ogljikovih nanocevk drugačen (slika 2). Fullereni pa so mreže heksagonalnih in pentagonalnih struktur, ki tvorijo kroglice. Lahko si jih predstavljamo tudi kot kletkaste strukture (slika 2).

V literaturi alotropom ogljika radi dodelijo različne dimenzionalnosti [1, 5, 6]. Fullereni predstavljajo 0D kristal, ogljikove nanocevkke 1D kristal, grafit



Slika 2: Slika prikazuje, kako se heksagonalna ogljikova mreža pojavlja v fulerenu (levo), ogljikovi nano cevki (na sredi) in grafitu (desno) [5].

in diamant pa sta 3D kristala. Končno pa je grafen prispeval manjkajočo 2D obliko.

3 Odkritje dvodimenzionalnih kristalov

Andre K. Geim in Konstantin Novoselov sta bila vodilna znanstvenika pri končnem odkritju grafena [2]. Preučevali so električno prevodnost izjemno tankih plasti ogljika [7] in naj bi po nesreči naleteli na monoplast grafitu ali grafen.

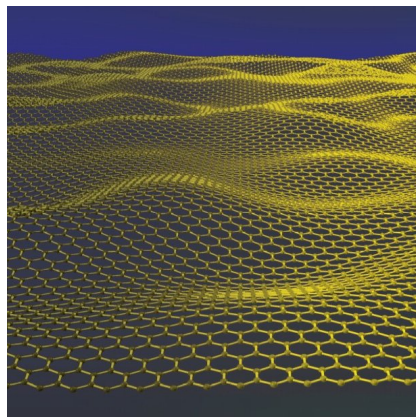
Omenjeni tehnični postopek odkritja na prvi pogled ne bi mogel biti bolj preprost. S kosom grafitu zna vsak potegniti po drugi trdi površini. Odkritelji so sami razložili [1], da do odkritja grafena ni prišlo že prej, ker so monoplasti v kupu koščkov grafitu izjemno redke. Povrh tega dvodimenzionalni kristali pod elektronskim mikroskopom nimajo posebnih lastnosti,

za optični mikroskop pa so povsem nevidni. Edina prava identifikacija dvodimenzionalnih kristalov je z mikroskopom na atomsko silo. V praksi bi bilo praktično nemogoče z naključnim preiskovanjem z mikroskopom na atomsko silo iskati grafen. Niti ni bilo samoumevno, da posamezne kristalne plasti sploh lahko obstajajo izven 3D kristala.

Pred sedemdesetimi leti sta Landau in Peierls zagovarjala, da so 2D kristali termodinamično nestabilni in ne morejo obstajati [5]. Divergenca termičnih fluktuacij pri manj-dimenzionalnih kristalih naj bi poskrbela za odmike atomov, ki so primerljivi z medatomskimi razdaljami pri končni temperaturi, torej razpad kristala. To podpirajo tudi eksperimentalna dejstva. Tališče tankih filmov kristala se hitro zmanjšuje z njihovim tanjšanjem. Kristali postanejo nestabilni pri približno ducatu kristalnih ravnin. Do nedavnega zato niso poznali dvodimenzionalnih kristalnih plasti, ki ne bi ležale na nekem drugem kristalu.

Odkritje grafena ni le pokazalo, da dvodimenzionalni kristali obstajajo, temveč, da so lahko veliki (karakteristična dolžina v μm , pa tudi do nekaj $100 \mu\text{m}$ [5]) in imajo lastnosti kristala (torej urejeno stukturo).

Grafenska membrana, ki ne leži na nekem drugem kristalu, temveč jo obkroža z zrak ali vakuum, ni povsem ravna [7] (slika 3). Rahlo valovita površina (s prečnimi dislogacijami v velikosti 1 nm) naj bi minimizirala prosto energijo, bolj natančno - poveča se elastična energija, zmanjšajo se termične vibracije. Tako grafen lahko postane stabilen tudi v teoriji.

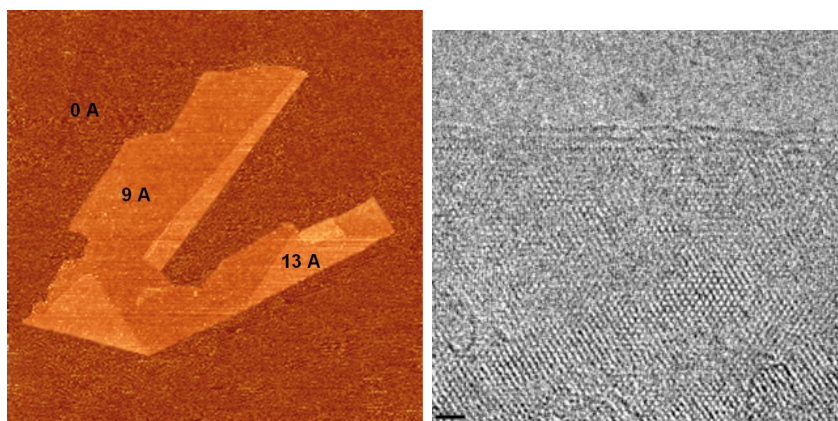


Slika 3: Računalniška rekonstrukcija grafenske membrane. Valovita površina omogoča stabilnost grafena. Dislokacije v tretji dimenziji so reda velikosti 1 nm [2].

Ključna lastnost pri odkritju dvodimenzionalnih kristalov je bila, da monoplasti grafita postanejo vidne pod optičnim mikroskopom, če jih postavi-

mo na rezino silicijevega dioksida (SiO_2). Da bi z gotovostjo trdili, da imamo res plast debeline enega atoma, moramo silicijevo rezino preiskati še z mikroskopom na atomsko silo. Slika 4 levo predstavlja tak posnetek grafena na rezini silicijevega dioksida debeline 300 nm. Kristalna monoplast je za nekaj desetink nm dvignjena nad površino SiO_2 . To je verjetno zaradi plasti absorbirane vode [1]. Razlike med različnimi ravninami pa ustrezajo medravninski razdalji v grafitu, ki je že omenjenih 0,34 nm.

Na sliki 4 desno je posnetek nekajplastne grafenske membrane s transmisijskim elektronskim mikroskopom. Z malo domišljije lahko prepoznamo heksagonalno strukturo. Z elektronskim mikroskopom so zaznali tudi valovitost površine grafena.



Slika 4: Posnetek grafena z mikroskopom na atomsko silo (levo). Obarvanost je sorazmerna z reliefom površine. Velikost slike je $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$. Pri 0,9 nm imamo monoplast, za 1,3 nm pa ravnino dvigneta dve kristalni plasti. Kristal ima karakteristično dolžino reda 100,000 atomov [1]. Posnetek nekajplastne grafenske membrane s transmisijskim elektronskim mikroskopom (desno). Dolžina črtice je 1 nm. Na sliki lahko prepoznamo heksagonalno mrežo. Temne horizontalne črte nakazujejo, da je membrana debela 2 do 4 kristalne plasti [7].

Morebitna uporaba v industriji bo zahtevala kontrolirano proizvodnjo grafenskih membran, ki ne bodo naključnih velikosti. Zato se razvijajo tudi drugi postopki pridobivanja grafena. Vključujejo predvsem različne kemijske postopke ter postopno rast na drugih kristalnih površinah [5].

Vprašati se moramo še, kje je meja med dvodimenzionalnim in trodimenzionalnim kristalom. Očitno je past debeline enega atoma dvodimenzionalni kristal. Pa sta dve kristalni ravnini res že grafit? Izkaže se, da drugačna struktura elektronskih pasov za kristale, ki imajo deset plasti ali manj, določa

mejo med dvo- in trodimenzionalnim [5]. Ogljikovi kristali, ki imajo deset kristalnih plasti ali manj, so torej dvodimenzionalni grafen.

4 Elektroni v grafenu

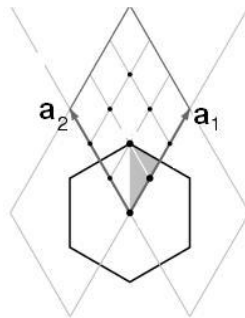
4.1 Struktura elektronskih pasov

Eno- in dvoplastni grafen sta polprevodnika ali polkovini, pri katerih se vrh valenčnega in dno prevodnega pasu dotikata. Grafen iz treh do desetih plasti pa ima bolj zapleteno strukturo energijskih pasov. Eksperimenti kažejo, da se pri nekajplastnem grafenu začneta prevodni in valenčni pas prekrivati, in sicer v intervalu do 20 meV [8], kar je odvisno od števila kristalnih plasti. Večplastni grafen postane prevodnik.

Energijske pasove enoplastnega grafena lahko teoretično obravnavamo v približku tesne vezi. Ta računski postopek omogoča izračun energijskih pasov v primerih, ko so elektroni zaradi močnega potenciala lokalizirani okrog jedra. Pri tem približku upoštevamo popravek k hamiltonki zaradi periodičnega potenciala v kristalni mreži $H = H_{at} + \Delta U$ (H_{at} je hamiltonka za en sam atom), upoštevamo pa le popravek zaradi najbližjih sosedov. Povedati moramo še, da popravke k energijam ΔE_k računamo v prvem redu perturbacij:

$$\Delta E_k = \langle \psi_k | \Delta U | \psi_k \rangle. \quad (1)$$

Preden predstavimo rezultate, si moramo izbrati osnovna vektorja kristalne mreže, in sicer $\mathbf{a}_1 = (\sqrt{4}a/2, 3a/2)$ ter $\mathbf{a}_2 = (-\sqrt{4}a/2, 3a/2)$, kjer je a medatomska razdalja med najbližjima sosedoma (slika 5). Iz slike prav tako vidimo, da je prva Brillouinova cona pravilni šestkotnik.

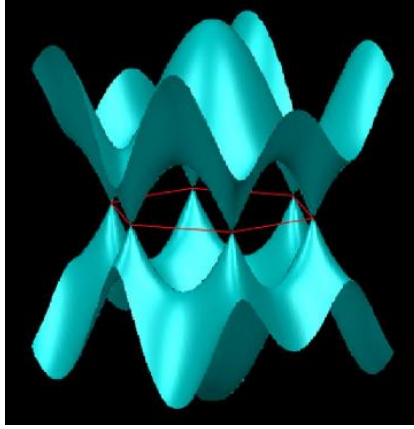


Slika 5: Osnovna vektorja kristalne mreže in prva Brillouinova cona za grafen [9].

Zanima nas disperzijska zveza $E(\mathbf{k})$ za elektrone v orbitalah p_z . Opisani približek tesne vezi nam da izraz

$$\Delta E(\mathbf{k}) = \pm t\sqrt{14} \cos\left(\frac{\sqrt{4}k_x a}{2}\right) \cos\left(\frac{k_y a}{2}\right) + \cos^2\left(\frac{k_y a}{2}\right), \quad (2)$$

kjer je t t.i. prekrivalni integral. Na sliki 6 je rezultat prikazan grafično. Vidimo, da se v kotih prve Brillouinove cone valenčni in prevodni pas dotikata. Tako dobimo že omenjeni polprevodnik, s širino energijske špranje 0 eV.



Slika 6: Disperzijska zveza za grafen v približku tesne vezi. Rdeči šestkotnik predstavlja prvo Brillouinovo cono. Vidimo, da se v kotih šestkotnika prevodni in valenčni pas dotikata [9].

Zanimiv rezultat dobimo, če izraz (2) razvijemo v okolici, kjer se dotikata prevodni in valenčni pas, tj. okoli \mathbf{k}_0 . Računski postopek je prprost in vključuje nekaj Taylorjevih razvojev. Ugotovimo, da je zveza med ΔE in \mathbf{k} približno linearna [9]:

$$\Delta E \approx \frac{4}{2} at |\mathbf{k} - \mathbf{k}_0|. \quad (3)$$

Linearne zveze med energijo in valovnim vektorjem pri elektronih nismo vajeni. Poznamo jo pri brezmasnih fotonih. Linearna disperzijska zveza vodi k ničelni masi elektronov.

Zaradi linearne disperzijske zveze se elektroni v bližini šestih kotov prve Brillouinove cone obnašajo kot relativistični delci, ki jih je potrebno opisati z Diracovo enačbo (in ne več Schrödingerjevo) za delce s spinom 1/2. Za brezmasne Diracove fermione velja povsod linearna disperzijska zveza.

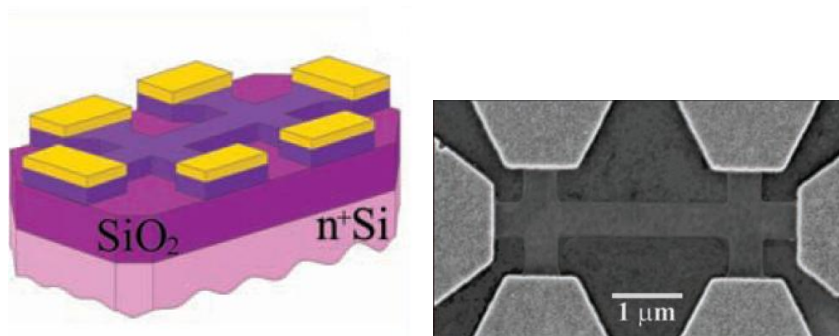
To, da je spekter elektronov v grafenu podoben Diracovem spektru za brezmasne fermione [6], je še ena od presenetljivih lastnosti grafena. S tem preprostim približkom tesne vezi smo napovedali, da bo elektrone v grafenu

treba obravnavati relativistično ter da je njihova efektivna masa veliko manjša od mase elektrona.

4.2 Električna prevodnost grafena

Pri temperaturi, ki je večja od 0 K, ne bodo zasedena vsa valenčna stanja, prevodni pas pa bo povsem prazen. Nekaj elektronov bo zasedlo stanja v prevodnem pasu in manjkajoče elektrone v valenčnem pasu obravnavamo kot vrzeli.

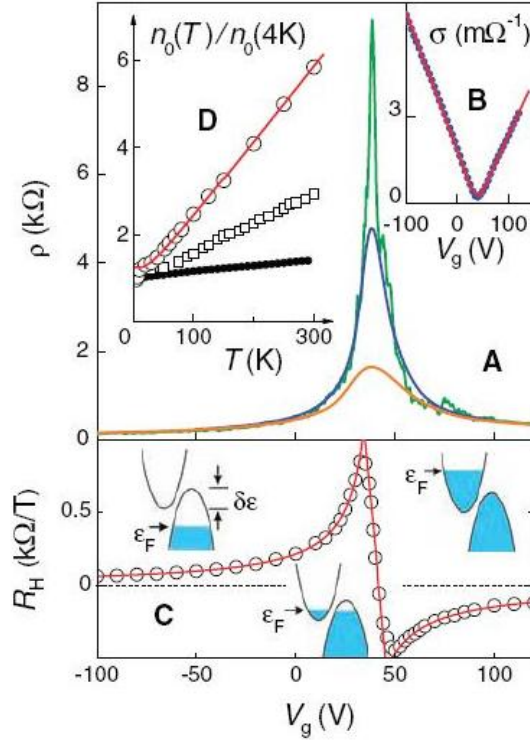
Pri grafenu opazimo polprevodniški pojav, ki omogoča spreminjanje koncentracije nosilcev naboja s spreminjanjem električnega polja, oziroma bolj tehnično — napetosti [1, 8]. Drugače povedano: z električnim poljem kontroliramo prevodnost tako kot pri FET tranzistorjih — z napetostjo na bazi V_b reguliramo prevodnost σ oz. tok skozi tranzistor. Prevodnost grafena so tudi sicer preučevali z napravami, podobnimi FET tranzistorjem [1] (slika 7). Naj omenim, da so ta polprevodniški efekt prepoznali tudi v nekajplastnem grafenu, ki velja že za prevodnik.



Slika 7: Shematični prikaz naprave, s katero so preučevali prevodnost grafena v odvisnosti od napetosti V_b (levo). Grafen leži na plasti SiO_2 debeline 300 nm, na njem pa so kovinske elektrode. Posnetek eksperimentalne naprave z elektronskim mikroskopom (desno) [8]. S to napravo so lahko opazovali tudi Hallov pojav v grafenu.

V grafenu ima tipična odvisnost dvodimenzionalne specifične upornosti ρ od 'bazne' napetosti V_g vrh visok nekaj $\text{k}\Omega$ (slika 8). Specifično dvodimenzionalno upornost merimo v Ω , medtem ko tridimenzionalno v Ωcm . Različne krivulje na sliki 8 so pri različnih temperaturah, saj je upornost vseh snovi precej odvisna od temperature. Prevodnost $\sigma = 1/\rho$ linearno narašča z V_b

na obeh straneh vrha upornosti. Prevodnost je na velikem delu približno linearno odvisna od V_b .



Slika 8: Tipična odvisnost $\rho(V_g)$ v grafenu (A). Različne krivulje so pri različnih temperaturah, in sicer od 5 do 300 K. Prevodnost je linearno odvisna od V_g (B). Hallov koeficient $R_H(V_g)$ ($T = 5$ K) doživi nenadno spremembo predznaka, ko večinski nosilci naboja postanejo elektroni pri pozitivnih napetostih (C). Temperaturna odvisnost nosilcev naboja za različne debeline plasti SiO_2 (D) [8].

Na sliki 8 je tudi prikazana odvisnost gostote nosilcev naboja n od temperature. Različne premice so za različno debele plasti SiO_2 . Omenjena zveza med n in V_g je linearna in jo določa izraz

$$n = \frac{\epsilon\epsilon_0 V_g}{de_0}, \quad (4)$$

kjer je d debelina plasti SiO_2 , ϵ dielektrična konstanta SiO_2 in e_0 osnovni naboj. Podatek za odvisnost $n(V_g)$ za 300 nm plast SiO_2 , je $\Delta n/\Delta V_g = 7,2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}/\text{V}$.

Gibljivost nosilcev toka μ , ki je definirana s hitrostjo nosilcev naboja v v električnem polju E ($v = \mu E$), so lahko določili z enačbo

$$\mu = \frac{\sigma(V_g)}{e_0 n(V_g)}. \quad (5)$$

S slike 8 in izraza (4) je razvidno, da sta n in σ linearno odvisna od napetosti. Gibljivost, ki je sorazmerna njenemu kvocientu, je torej na velikem področju konstantna. V koncentracijah n do 10^{10} cm^{-2} poročajo o gibljivostih med 2.000 in $5.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, naj pa bi bile možne tudi nekajkrat večje vrednosti [5]. To so izredno velike gibljivosti. V kovinah so vrednosti namreč nekaj $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. To tudi pomeni, da ima grafen izredno majhno upornost ne glede na majhen prečni presek.

Brez 'dopiranja' z električnim poljem (pri $V_b = 0$) je grafen material, kjer so večinski nosilci električnega toka vrzeli. Vrh upornosti in minimum prevodnosti sta nekoliko zamaknjena od $V_g = 0$. Vendar ta premik pripisujejo dopiranju grafenskih membran z absorbirano vodo. Vrh se pomakne bližje k ničli, če eksperiment naredimo v vakuumu [8].

Hallova konstanta pove, kolikšno prečno električno polje nastane zaradi magnetnega polja pri danem toku. Predznak Hallove konstante nam pove, kakšen predznak imajo večinski nosilci naboja v snovi. Na sliki 8 opazimo, da Hallova konstanta naglo spremeni predznak. Pri negativnih napetostih so večinski nosilci vrzeli, pri pozitivnih pa elektroni.

Grafen se torej obnaša kot polprevodnik ali pa kovina z majhnim prekrivanjem prevodnega in valenčnega pasu.

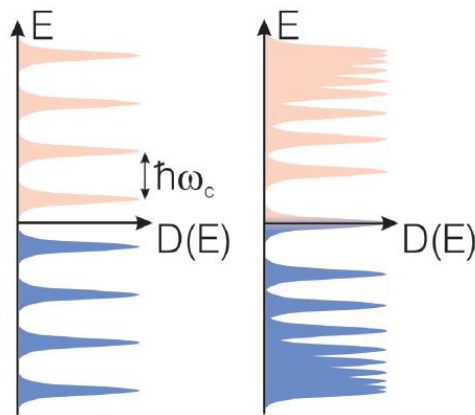
5 Nekaterne zanimive lastnosti grafena

V grafenu so v prisotnosti velikih magnetnih polj opazili kvantni Hallov efekt že pri sobni temperaturi [10]. Do sedaj je opazovanje tega pojava zahtevalo izredno nizke temperature. Kvantni Hallov efekt je pojav v dvodimenzionalnih elektronskih sistemih, kjer Hallova prevodnost σ postane kvantizirana. Za brezmasne Diracove fermione so energijska stanja

$$E_\nu = \pm \sqrt{2e_0 B \hbar v_F^2 (\nu + 1/2 \pm 1/2)}, \quad (6)$$

kjer je v_F hitrost elektronov, $\nu = 0, 1, 2 \dots$ pa kvantno število [10]. Za primerjavo je običajna zveza za Landauove nivoje, kot imenujemo to kvantizacijo,

$E = \hbar\omega_c(\nu+1/2)$ (slika 9). Landauove nivoje za brezmasne Diracove fermione bi lahko opisali s polovičnimi kvantnimi števili $\nu \pm 1/2 = -1/2, 1/2, 3/2 \dots$, vendar formalen izraz (6) pove nekoliko več o degeneriranosti stanj. Vidimo, da je degeneriranost stanja $E = 0$ dvakrat manjša od ostalih stanj. Predznak \pm v korenu v izrazu (6) se nanaša na 'pseudospin' elektrona v magnetnem polju [10].



Slika 9: Landauovi nivoji za Schrödingerjeve elektrone s parabolično disperzijsko zvezo (levo) in za Diracove elektrone (desno) [6]. Pri diracovih elektronih se pojavi stanje pri energiji $E = 0$, višja stanja naraščajo s korenom naravnih števil. Elektronska stanja so roze barve, stanja vrzeli pa modre.

Do leta 2009 je grafen najmočnejši material, ki so ga testirali. Z mikroskopom, na atomsko silo so izmerili konsanto vzmeti grafenske membrane, ki znaša med 1 in 5 N/m [4]. Njegov Youngov modul je 0,5 TPa [4], kar se razlikuje od tridimenzionalnega grafita.

Grafen ima prav tako izredno veliko toplotno prevodnost λ pri sobni temperaturi. Izmerili so jo okoli 5×10^4 W/mK [4] (za red velikosti večja od toplotnih prevodnosti tipičnih kovin). V grafitu je λ približno stokrat manjša. Razlog za to vidijo v šibki vezavi kristalnih plasti kot tudi v večji razdalji med njimi.

Grafen pa ima številne imenitne lastnosti. Zato je trenutno izredno zanimiv za industrijo. Od njegovega odkritja pred nekaj leti grafen poskušajo implementirati v razne naprave.

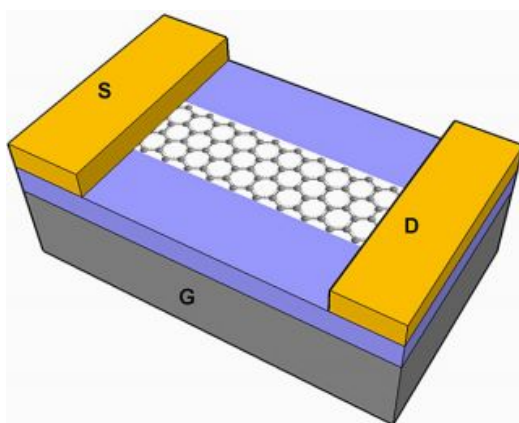
6 Potencialna uporaba grafena v industriji

Velika hitrost elektronov v grafenu in njegove druge izjemne lastnosti napovedujejo, da bi grafen lahko uporabili v najrazličnejših napravah od kondenzatorjev za shranjevanje energije do raznih senzorjev [4]. Največ raziskav pa se osredotoča na izboljšanje in nadaljno miniaturizacijo računalniških čipov, ki trenutno temeljijo na siliciju. Raziskovalci se namreč približujejo spodnji meji velikosti elektronskih elementov v računalniških čipih. Ena od strategij, kako naprej zmanjševati elemente, je z zamenjavo silicija z boljšim prevodnikom.

Grafen pa je vendarle predober prevodnik. Ključna lastnost elementov digitalnih vezij je dobra ločljivost med digitalno 1 in 0. Grafen pa vedno prevaja in zato nima dobrega stanja 0.

To dejstvo grafena ne izključi povsem. Še pred njegovim odkritjem je teorija napovedala, da so 10 do 20 nm trakovi grafena polprevodniški in poznajo stanje 0 [2]. Tako da morda še obstaja upanje za grafenske tranzistorje. Vsekakor pa bo grafen uporaben v analognih vezjih, ki so še vedno v veliki meri prisotna v mobilni telefoniji.

Grafenski nanotrakovi sami po sebi še vedno niso sposobni generirati dovolj velike napetostne razlike, da bi lahko dobro ločevali med logično 0 in 1. Z različnimi kemijski postopki in dopiranjem se dajo njihove lastnosti tudi izboljšati. Model tranzistorja z grafenskim nanotrakom je na sliki 10.



Slika 10: Model FET tranzistorja iz grafenskega nanotraku na 10 nm izolatorju SiO_2 (modro). D in S sta elektrodi iz paladija. G je dobro prevodna silicijeva plast [11].

Zaradi izredno velikega razmerja površine proti masi grafena upajo, da ga

bo mogoče uporabiti za izdelavo kondenzatorskih plošč ultrakondenzatorjev, ki so namenjeni shranjevanju energije [4].

Prav tako zaradi 2D strukture in velikega omenjenega razmerja površine proti prostornini poskušajo grafenske membrane implementirati v senzorje posameznih plinskih molekul. Molekula, ki se absorbira na površini grafena, namreč spremeni njegovo lokalno prevodnost.

Zaradi visoke električne prevodnosti in prozornosti je grafen idealen kandidat za nevidne elektrode, ki jih potrebujemo v zaslonih, občutljivih na dotik, tekočokristalnih ekranih in organskih LED diodah [4]. Povrhu tega je grafen po eni strani izredno trden, po drugi pa upogljiv, kar ga naredi za privlačno izbiro.

7 Zaključek

Prihodnost grafena je predvsem odvisna od tega, ali bodo sploh razvili učinkovit način pridobivanja večjih grafitnih membran. Trenutno še vedno uporabljajo postopek 'risanja s svinčnikom'. Dokler je grafen potreben le za znanstvene raziskave, to zadostuje. V industriji pa se ne bodo zadostili z različno velikimi in različno debelimi kristali, odvisno od tega, kaj najdemo v sledi svinčnika. Za industrijsko proizvodnjo je nujen postopek, ki bo proizvajal grafen z neko kontrolirano kakovostjo. Nekaj alternativnih postopkov so sicer že razvili, vendar je še vse v povojih.

Pri tem seveda ključno vlogo igra denar. Trenutno najdražjemu materialu na svetu je potrebno drastično znižati ceno, preden lahko postane komercialni uspeh. Četudi se to morda ne zgodi, bo grafen nedvomno ostal ened večjih odkritij moderne znanosti.

Literatura

- [1] K. S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. J. Booth, V. V. Khotkevich, S. V. Morozov in A. K. Geim, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **112**, 10451-10453 (2005).
- [2] R. F. Service, *Science* **424**, 875-877 (2009).
- [3] <http://www.physorg.com/news135959004.html> (15. 6. 2009).
- [4] <http://en.wikipedia.org> (4. 6. 2009).
- [5] A. K. Geim in K. S. Novoselov, *Nat. Mat.* **7**, 183-191 (2007).
- [6] M. I. Katsnelson, *Materials Today* **11**, 20-27 (2007).
- [7] J. C. Meyer, A. K. Geim, M. I. Katsnelson, K. S. Novoselov, T. J. Booth in S. Roth, *Nature* **546**, 60-63 (2007).
- [8] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva in A. A. Firsov, *Science* **406**, 666-669 (2004).
- [9] http://burana.ijs.si/wiki3/index.php/Glavna_stran (8. 6. 2009).
- [10] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos in A. A. Firsov *Nature* **538**, 197-200 (2005).
- [11] <http://news.stanford.edu/news/2008/may28/ribbon-052808.html> (10. 6. 2009).