Povećanje skalabilnosti elektroniičkih sklopova primjenom grafenske nanotehnologije

Levak, Tiziano

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Polytechnic Pula - College of Applied Sciences / Politehnika Pula - Visoka tehničko-poslovna škola s pravom javnosti**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:212:168709

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

Digital repository of Istrian University of applied sciences

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

Politehnika Pula
Visoka tehničko-poslovna škola

ZAVRŠNI RAD

POVEĆANJE SKALABILNOSTI ELEKTRONIČKIH SKLOPOVA PRIMJENOM GRAFENSKE NANOTEHNOLOGIJE

Tiziano Levak

Pula, rujan 2016.

Politehnika Pula
Visoka tehničko-poslovna škola

ZAVRŠNI RAD

POVEĆANJE SKALABILNOSTI ELEKTRONIČKIH SKLOPOVA PRIMJENOM GRAFENSKE NANOTEHNOLOGIJE

Kolegij: Elektronika 1

Student: Tiziano Levak

Mentor: Sanja Grbac Babić mag. računarstva, predavač

Pula, rujan 2016.

Izjava o samostalnosti izrade završnog rada

Izjavljujem da sam završni rad na temu **„Povećanje skalabilnosti elektroničkih sklopova primjenom grafenske nanotehnologije“** samostalno izradio uz pomoć mentorice Sanje Grbac Babić mag. računarstva, koristeći navedenu stručnu literaturu i znanje stečeno tijekom studiranja. Završni rad je pisan u duhu hrvatskog jezika.

Student: Tiziano Levak

Potpis:

_____

Sažetak

Iako u svijetu manje poznat, ali ne i tako beznačajan, pronađen je novi materijal koji će zasigurno promijeniti budućnost. Radi se o grafenu, materijalu koji je najtanji na svijetu, a istodobno i 200 puta jači od željeza, savitljiv, rastezljiv, provodi struju bolje od bakra, provodi toplinu bolje od bilo kojeg drugog materijala, neprobojan, te veoma otporan na kiseline. Grafen se već duže vrijeme naziva ″herojem″ među materijalima, no čini se da se njegove kvalitete tek počinju razotkrivat. Iako je dostupan u vršku svake obične olovke, prvi put je izoliran tek 2004. godine kada su mu izmjerena svojstva do tada tek naslućivana u teoriji raznog materijala.

Grafen je materijal kojega se povezuje sa raznim granama industrije, a ona koja je nama najinteresantnija je poluvodička industrija. Svi mi imamo mobitele, računala, televizore, instrumente, koji se baziraju na silicijskoj tehnologiji. značaj te industrije izražava se nezamislivo velikim novčanim iznosima, te je ta industrija danas pod izuzetno velikim pritiskom jer težimo tome da imamo brže, bolje, manje, lakše i kvalitetnije računalo, mobitel, televizor, te razne druge uređaje.

Grafen je trenutno jedan od najčudotvornijih materijala na svijetu, a njegov potencijal se tek počeo otkrivati i primjenjivati.

Ključne riječi:

Grafen, nanotehnologija, tranzistori, skalabilnost, silicij

Abstract

Although the world's less known, but not so insignificant, it's discovered a new material that will certainly change the future. It is about graphene, the thinnest material in the world, but at the same time it's 200 times stronger than steel, ductile, conduct electricity better than copper, conducts heat better than any other material, impenetrable and resistant to acid. Graphene has long called a hero among the materials, but it seems that we have only recently began to

understand its quality. Although it's available at the tip of each pencil, it was first isolated in 2004 when his measured properties previously only sensed in theory.

Graphene is a material which has been associated with various industries, and one that is most interesting to us is the semiconductor industry. We all have cell phones, computers, television, instruments that are based on silicon technology. Weight of this industry is reflected in the unimaginably large amount of money, and this industry is now under enormous pressure because we tend to have a faster, better, smaller, lighter and better computer, mobile phone, television, and various other devices.

Graphene is one of the most miraculous materials in the world, and its potential is just begun to explore.

Keywords:

Graphene, nanotechnology, transistors, scalability, silicon

Sadržaj

Sažetak II

Abstract II

Popis oznaka i kratica VI

1. UVOD 1

1.1. Opis i definicija problema 1

1.2. Cilj i svrha rada 1

1.3. Polazna hipoteza 2

1.4. Metode rada 2

1.5. Struktura rada 2

2. TEORIJA POLUVODIČA 4

2.1. Kristalna rešetka poluvodiča 4

2.2. Vlastita vodljivost poluvodiča 5

2.3. Vodljivost poluvodiča zbog primjesa 7

2.4. Energijski pojasevi 8

2.5. Moore-ov zakon 10

3. UGLJIK 13

3.1. Alotropske modifikacije ugljika 13

3.1.1. Dijamant 14

3.1.2. Grafit 15

3.1.3. Fuleren 15

4. GRAFEN 16

4.1. Struktura i svojstva grafena 17

4.2. Zabranjeni pojas grafena 19

4.3. Graphene Flagship 20
5. NANOTEHNOLOGIJA 21
5.1. Ugljikove nanocijevi 22
6. MOGUĆNOSTI PRIMJENE GRAFENA 25
6.1. Primjena grafena u elektronici 28
6.1.1. Razvoj grafenskih tranzistora 29
6.1.2. Grafenski tranzistor s efektom polja 30
6.1.3. Tranzistor od grafenskih nanotraka sa efektom polja 31
6.1.4. Jedinice za pohranu podataka 32
6.1.5. Printanje elektroničkih uređaja 33
6.1.6. Optička komunikacija potpomognuta grafenom 34
7. ZAKLJUČAK 37
Popis literature: 38
Popis slika 40

Popis oznaka i kratica

Oznaka	Opis	Jedinica
q	specifična električna provodljivost	S/m
E	elektronvolt	eV
ρ	gustoća	g/cm^3
f	frekvencija	Hz

Kratica	Opis
K	kelvin
P	pozitivan naboj
N	negativan naboj
C	ugljik
^{O}C	stupanj celzijus
EU	Europska Unija
IBM	International Business Machines
SWCNT	jednostjenčane ugljikove nanocjevčice
LCD	zaslon s tekućim kristalima
OLED	organske svjetlosne diode
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
FET	Field Effect Transistor
CNTFET	Carbon Nano Tube Field Effect Transistor
UK	Ujedinjeno Kraljevstvo
SAD	Sjedinjene Američke Države

1. UVOD

Pojavom grafena mnogi znanstvenici smatraju kako je upravo to materijal budućnosti koji bi mogao promijeniti brojne industrije poput računalne, automobilske, avionske i druge. Mogućnosti primjene grafena gotovo su neograničene te znanstvenici eksperimentiraju s ovim materijalom u razvoju antena, pametnih telefona, solarnih ćelija, filtera desalinizacije, guma, avionskih krila, teniskih reketa te mnogih drugih materijala, a ono što je nama najzanimljivije je zamjena silicija u računalnim čipovima. Danas je već jasno da u računalnoj industriji neće biti moguće smanjivati veličine poluvodičkih elemenata koji su bazirani na silicij, germanij, galij arsenid, te se traži novi koncept. Napori mnogih svjetskih znanstvenika u pronalasku najboljih rješenja su veliki, metodologije na kojima se radi su eksperimentalne i preskupe, no s obzirom na nevjerojatna svojstva grafena, nemoguće je ignorirati njegov potencijal.

1.1. Opis i definicija problema

Osnovni problem kojim se ovaj rad bavi su svojstva grafena, te njegove mogućnosti i primjena u budućnosti u okviru elektroničkih komponenti.

1.2. Cilj i svrha rada

Cilj rada je analiza dosad otkrivenih svojstva grafena, analiza sadašnjeg stanja u industriji elektronike, te primjena grafena kao materijala budućnosti.

Svrha rada je ukazati na potrebe daljnjih istraživanja svojstva grafena sa ciljem povećanja skalabilnosti elektroničkih elemenata.

1.3. Polazna hipoteza

S obzirom na svoja svojstva grafen bi mogao zamijeniti silicijsku tehnologiju izrade elektroničkih elemenata, stoga je isplativo ulaganje u znanstvene projekte vezano za daljnja istraživanja grafena.

1.4. Metode rada

Pri izradi pisanog dijela završnog rada korištene su sljedeće znanstveno-istraživačke metode:

- metoda analize
- metoda sinteze
- metoda deskripcije
- metoda indukcije
- metoda dedukcije

1.5. Struktura rada

Završni rad se sastoji od 7 glavnih tematskih jedinica, odnosno poglavlja. U radu se nalaze još popis oznaka i kratica, te popis literature i slika.

Prvo poglavlje obuhvaća uvod u temu, iznosi se opisi definicija problema, cilj i svrha rada te hipoteza, zatim upotrijebljene metode i struktura rada.

U drugom poglavlju pojašnjena je teorija poluvodiča, zabranjeni pojas, te Moore-ov zakon kojim smo kroz povijest prikazali nastajanje modernih računalnih komponenti.

U trećem poglavlju, opisana je važnost ugljika i njegovih alotropskih modifikacija, kao elementa iz kojeg proizlazi grafen.

Četvrto poglavlje govori o grafenu, njegovoj strukturi i svojstvima, te stvaranju zabranjenog pojasa kod grafena i znanstvenim projektima koji se provode u sklopu europskog projekta Graphene Flagship.

Nanotehnologija koja ima sve veću primjenu u svijetu, zauzela je svoj dio u petom poglavlju rada, te će se u budućnosti sve više i više upotrebljavati u svim industrijskim i znanstvenim granama.

U šestom poglavlju analizirane su primjene grafena naročito u elektronskim elementima i sklopovima.

Zaključak rada iznesen je u sedmom poglavlju.

2. TEORIJA POLUVODIČA

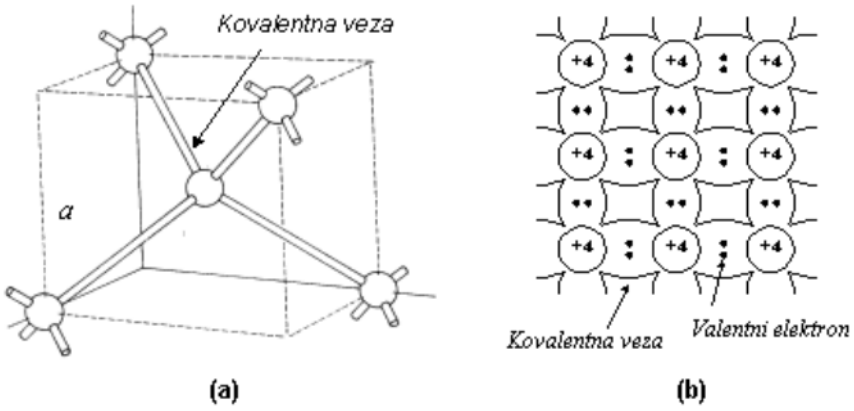
Poluvodiči predstavljaju temelj elektronike i čine osnovnu građu dioda, tranzistora, integriranih krugova i ostalih elektroničkih sklopova. Poluvodiči su elementi ili spojevi čija je vodljivost puno veća od vodljivosti izolatora ($> 10^{-6}$ S/m), a puno manja od vodljivosti vodiča ($< 10^{5}$ S/m).

Kao elementi najbolji su oni iz četvrte periodne grupe elemenata koji u vanjskoj ljusci imaju četiri valentna elektrona a to su germanij i silicij. Prvi elektronički elementi su se izrađivali od germanija ali se od šezdesetih godina germanij postupno počeo zamjenjivati silicijem. Silicij ima bolja toplinska svojstva i najrasprostranjeniji je kemijski element na zemlji iza kisika.

Kao spojevi poznati su razni oksidi kao bakreni oksidul i titanov oksid i međumetalni spojevi između tro i peterovalentnih elemenata kao što su aluminij antimonid, indij, fosfid, galij, arsenid i dr. Danas se posebno u mikrovalnoj elektronici i fotonici koriste ovakvi složeni poluvodiči kao npr. galijev arsenid. Premda razvojem elektroničke tehnologije primjena složenih poluvodiča raste, većina suvremenih elektroničkih elemenata i sklopova je izgrađena na temelju silicija.

2.1. Kristalna rešetka poluvodiča

Oko jezgre silicija kruži 14 elektrona, ali od njih 14 samo su četiri u vanjskoj ljusci te oni sudjeluju u kemijskim i električnim procesima. Ta četiri elektrona povezuju atom silicija sa četiri susjedna atoma silicija, na takav način da stvaraju kovalentne veze među atomima i ti su atomi međusobno prostorno razmješteni u vrhovima pravilnog tetraedra.



Slika 1. Prikaz atoma silicija u obliku (a) prostorne rešetke i (b) ravninske rešetke
Izvor: http://www.fpz.unizg.hr/hgold/ES/AE/pog_1/pog102.htm, (23.05.2016.)

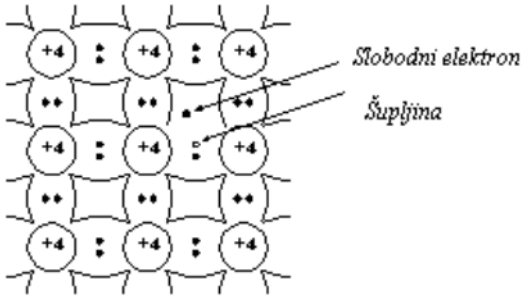
Konstanta a je udaljenost dvaju susjednih vrhova tetraedra, ona iznosi za silicij 5.43×10^{-10}m kod temperature od 300K i naziva se konstanta rešetke. Kovalentne veze između dva atoma su prikazane cjevastim spojnicama. U ravninskom prikazu rešetke (slika 1b), kovalentne veze između parova atoma prikazane su zakrivljenim crtama, a elektroni crnim točkama. Dva elektrona svaki od pojedinog para atoma doprinose vezi.

Ostali dio atoma na (slici 1b) prikazan je kružnicom sa opisanom vrijednošću, označava naboj atoma u odnosu na naboj elektrona. U našem slučaju +4 označava da je naboj četiri puta veći od naboja elektrona, te taj naboj održava ravnotežu naboja elektrona. Silicijevu rešetku čini jedinična ćelija koja čini kocku u duljini stranice a. Atome silicija raspoređene u formi četiri pravilna tetraedra povezuje jedinična ćelija na način da se u svakom vrhu i središtu stranica kocke jedinične ćelije nalazi po jedan atom.

2.2. Vlastita vodljivost poluvodiča

Kod silicija skoro svi valentni elektroni su uključeni u kovalentne veze između atoma i nisu pokretljivi. Kod temperature apsolutne nule valentni elektroni su nepokretni i silicij se ponaša kao izolator, a kod temperatura iznad apsolutne nule pojedini valentni elektroni dobiju

dovoljno toplinske energije, oslobađaju se kovalentne veze i postaju slobodni elektroni (slika 2.). Za prekid kovalentne veze kod silicija potrebna je energija od oko 1,2eV.



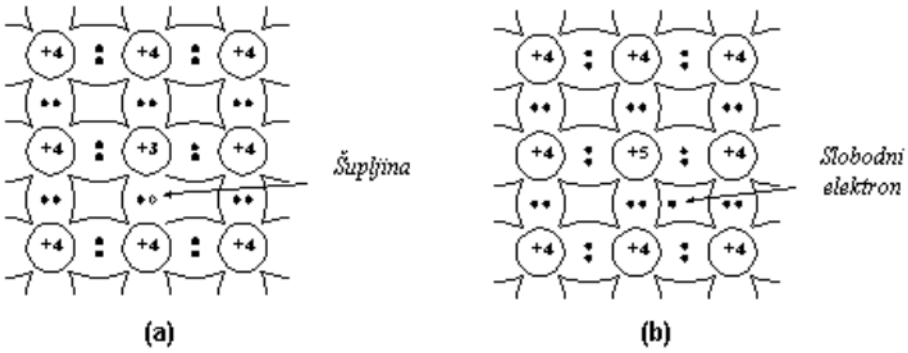
Slika 2. Prekinuta kovalentna veza u kristalu silicija

Izvor: http://www.fpz.unizg.hr/hgold/ES/AE/pog_1/pog102.htm, (23.05.2016.)

Koncentracija slobodnih elektrona eksponencijalno raste s povišenjem temperature. U kovalentnoj vezi oslobođeno mjesto elektrona naziva se šupljina. U slučaju da neki oslobođeni valentni elektron nema dovoljno energije da ostane slobodan, može se premjestiti i popuniti šupljinu jer ga privlači pozitivan naboj atoma. Atom sa šupljinom ima pozitivan naboj i jednak je iznosu naboja elektrona, te premještanje šupljine predstavlja gibanje pozitivnog naboja suprotno toku elektrona. Struja šupljina ide prema minus polu, a struja elektrona prema plus polu. Oslobođeni elektron i šupljina koja ostaje iza njega čine par nosilaca naboja i njihova pojava se naziva generacija parova. Rekombinacijom nazivamo pojavu gdje se slobodni elektron koji naiđe na šupljinu veže u kristalnu rešetku. Rekombinacija i generacija parova su u kristalu u međusobnoj ravnoteži, što je temperatura viša to će se broj regeneriranih parova nosilaca naboja povećavati, ali će i broj rekombinacija biti veći. Oslobođeni parovi nosilaca naboja služe za električnu struju sve do rekombinacije. To je kratko vrijeme reda mikro sekunda, ali se u svakom trenutku u poluvodiču nalazi određeni broj nosilaca naboja što pridonosi vodljivosti poluvodiča. Zbog toplinskog djelovanja vodljivost eksponencijalno raste s temperaturom, a slobodni nosioci naboja su direktna mjera za vodljivost, koja se kada je riječ o kemijski čistim poluvodičima naziva vlastita vodljivost.

2.3. Vodljivost poluvodiča zbog primjesa

Dopirani poluvodiči dobivaju se ako se u rešetku kristala silicija dodaju strani atomi (primjese), i na taj način se povećava i točno nadzire vodljivost poluvodiča. U postupku dopiranja poluvodiča dodaju se manje količine trovalentnih elemenata (galij, bor, indij) ili peterovalentnih (fosfor, antimon, arsen). Ti dodaci nazivaju se nečistoćama i one mijenjaju svojstva čistog, intrinsičnog, poluvodiča u svojstva nečistog ekstrinsičnog poluvodiča. (slika 3a) prikazuje promjene nastale uvođenjem trovalentnih nečistoća u rešetku čistog poluvodiča. Atom trovalentnog elementa tvori samo tri potpune veze, a četvrta veza je nepotpuna ili samo radi postojanja šupljine nije ostvarena.



Slika 3. Rešetka kristala silicija: (a) unesene trovalentne nečistoće za tvorbu p tipa poluvodiča, (b) unesene peterovalentne nečistoće za tvorbu n tipa poluvodiča

Izvor: http://www.fpz.unizg.hr/hgold/ES/AE/pog_1/pog103.htm, (25.05.2016.)

Kod dopiranja čistog silicija trovalentnim elementom, šupljine čine većinske nosioce naboja, a elektroni manjinske. Budući da većinski nosioci nose pozitivni (P) naboj, poluvodič onečišćen trovalentnim elementom je poluvodič P tipa. Onečišćavajuća tvar naziva se akceptorom ili prihvatiteljem.

Na (slici 3b) prikazana je građa rešetke u okolišu peterovalentnog atoma. U rešetki postoje četiri veze atoma peterovalentnog elementa s atomima silicija, dok jedan elektron postaje slobodan. Poluvodič N tipa je onečišćen peterovalentim elementom i slobodni elektroni

postaju većinski nositelji negativnog (N) naboja. Onečišćavajuća tvar se naziva donorom ili davateljem.

Što je poluvodič jače dopiran to je i vodljivost zbog primjesa veća. Vodljivost zbog primjesa je dvojaka, jer u slučaju atoma prihvatitelja govori se o P tipu poluvodiča i o P vodljivosti jer u električnoj struji sudjeluju pozitivno nabijene šupljine, a u slučaju atoma davatelja govori se o N tipu poluvodiča i o N vodljivosti, jer u električnoj struji sudjeluju negativno nabijeni elektroni.

Dodavanjem čistom poluvodiču primjesa, stvaraju se nepravilnosti u periodičnosti potencijalne energije, pa zbog toga i na niskim temperaturama poluvodiči mogu prenositi električni naboj. Tim načinom se stvaraju lokalizirani energetski nivoi u području zabranjenog energijskog procjepa između valentne i vodljive vrpce. Dok elektroni valentne vrpce ne mogu dosegnuti vodljivu vrpcu, zbog toga jer im je energija na sobnoj temperaturi preniska, to mogu postići elektroni lokaliziranog nivoa koji se nalaze pri vrhu zabranjenog energetskog procjepa. Lokalizirani nivoi se nazivaju donorski nivoi, jer daju suvišni elektron u vodljivu vrpcu koja je prazna. Ti poluvodiči mogu voditi struju pod utjecajem električnog polja, zahvaljujući vodljivosti donorskih elektrona, pa zbog toga kažemo da imamo vodljivost n-tipa. Akceptorski nivoi se nazivaju lokalizirani nivoi koji se nalaze pri dnu zabranjenog procjepa, jer primaju jedan elektron iz valentne vrpce u kojoj ostaje šupljina, odnosno manjak elektrona. Budući da tako valentna vrpca postaje nepopunjena, poluvodič može voditi struju u vanjskom električnom polju. Struja potječe od tih šupljina sa po jednim pozitivnim nabojem, i poluvodič ima vodljivost pomoću šupljina ili vodljivost P tipa poluvodiča. Kod poluvodiča postoje dvije vrste nosilaca naboja pozitivne šupljine i negativni elektroni koji se u električnom polju gibaju u suprotnim smjerovima. Kod p-tipa poluvodiča veća je vodljivost šupljina, a kod n-tipa, veća je vodljivost elektrona.

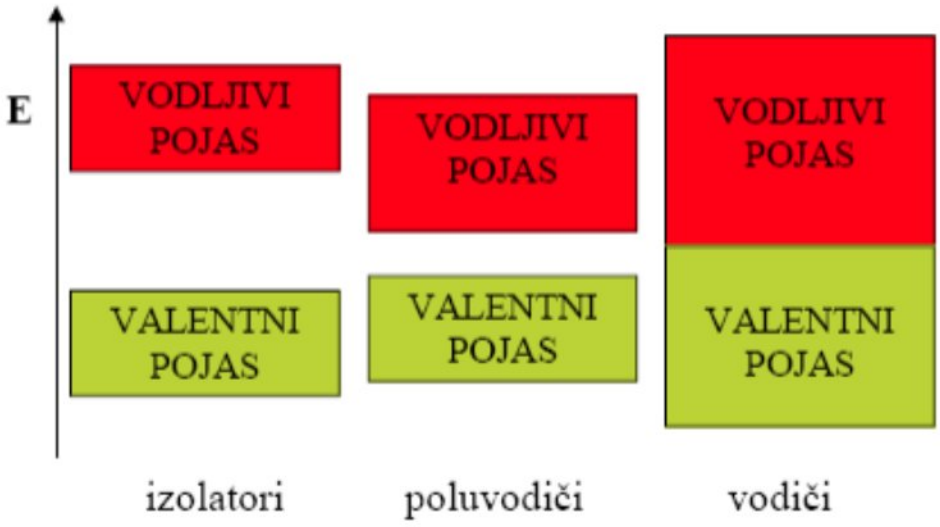
2.4. Energijski pojasevi

Poluvodiči i izolatori se definiraju kao tijela kod kojih je na apsolutnoj nuli najgornji pojas zauzet stanjima energija elektrona, pojas je poznat kao valentni pojas i potpuno je pun. Na

sobnoj temperaturi, postoji određeno razmazivanje distribucije energija elektrona, vrlo mali, ali nezanemariv broj elektrona ima dovoljnu energiju da prijeđe zabranjeni pojas i uđe u vodljivi pojas. Elektroni koji imaju dovoljno energije da budu u vodljivom pojasu su oslobođeni kovalentne veze između susjednih atoma unutar tijela, mogu provoditi naboj i slobodno se micati unutar tijela materijala.

Lakoća kojom elektroni u poluvodiču mogu biti premješteni iz valentnog u vodljivi pojas ovisi o razmaku između tih pojaseva. Materijali koji imaju energiju zabranjenog pojasa ispod približno 3 elektronvolta se uglavnom smatraju poluvodičima. Tipični poluvodiči su germanij i silicij, sa širinom energetskog procijepa 0,8eV odnosno 1,2eV. Germanij i silicij se na apsolutnoj nuli ponašaju kao izolatori, dok na višim temperaturama pokazuju sposobnost električne vodljivosti.

Materijali s većim energijama zabranjenog pojasa veličine reda od 5eV do 10eV smatraju se izolatorima.

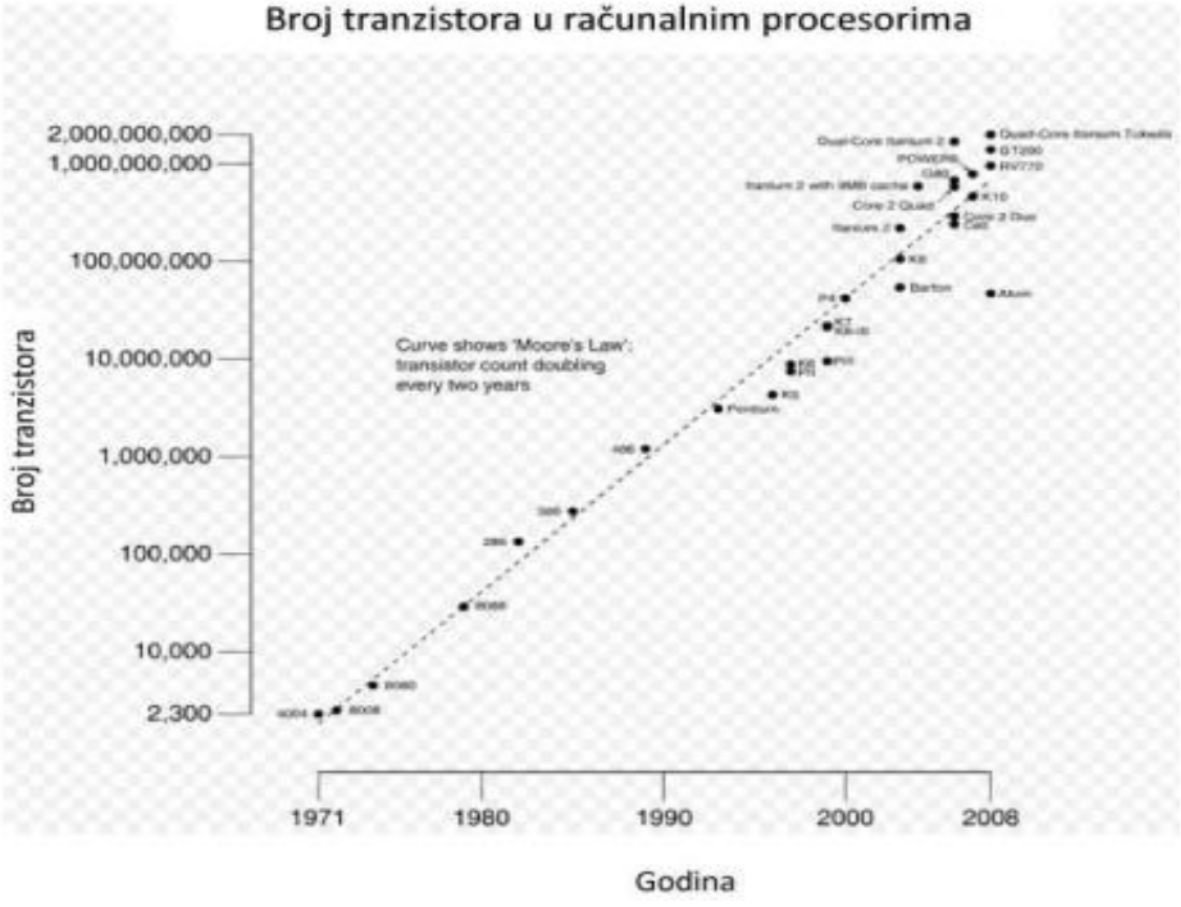


Slika 4. Dijagram energetskih razina u izolatorima, poluvodičima i vodičima

Izvor: https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/materijali__poluvodici.pdf, (23.04.2016.)

2.5. Moore-ov zakon

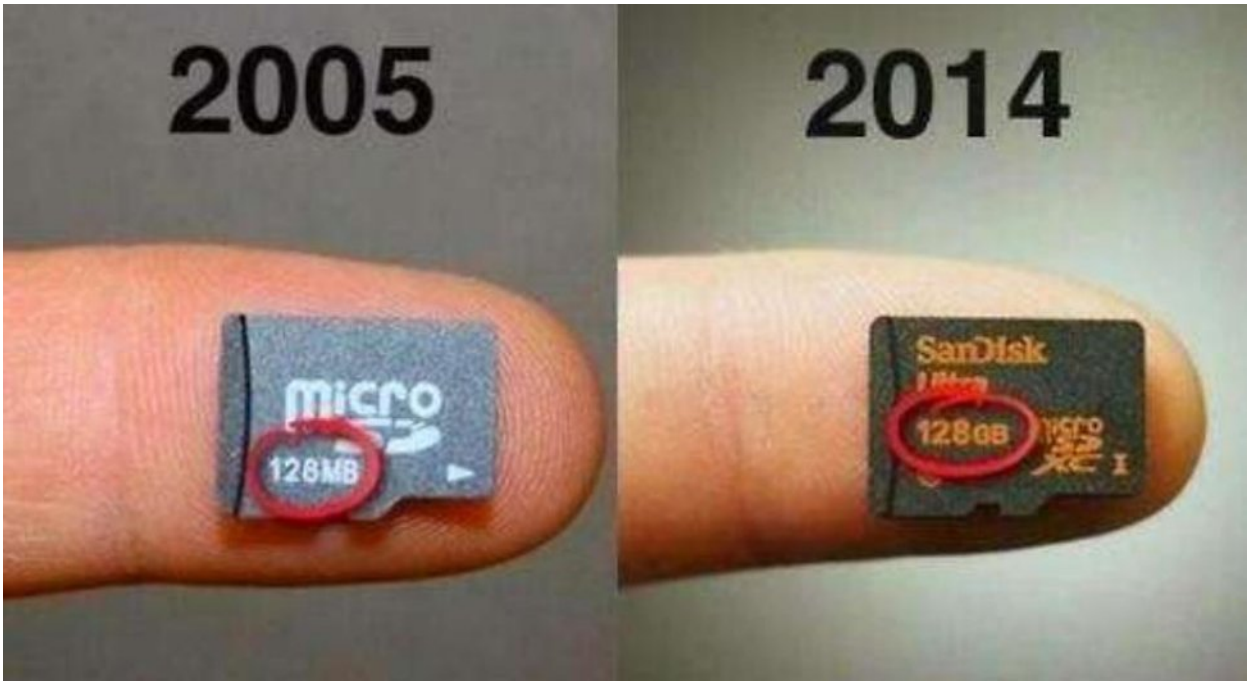
Godine 1945. suosnivač danas globalno poznate kompanije Intel Gordon E. Moore, opazio je da svaki novi memorijski integrirani krug (čip) ima dva puta veći kapacitet od svog prethodnika, te da su se novi čipovi pojavljivali na tržištu u intervalima od 18 do 24 mjeseca. To znači da se numerička moć čipova povećava eksponencijalno u vremenu. Proučavanjem novih trendova Moore je došao do zaključka da će se u sektoru tranzistora, temeljnih sastavnica mikroprocesora i digitalnog doba, cijene eksponencijalno smanjivati, a performanse povećavati. Moore-ovim zakonom (slika 5) primjećujemo da se broj tranzistora u integriranim krugovima udvostručuje svake dvije godine, y-os prikazana je u logaritamskoj skali, pa to zapravo znači da u vremenu broj tranzistora po procesoru raste eksponencijalno.



Slika 5. Prikaz Moore-ovog zakona

Izvor: http://eskola.hfd.hr/clanci/Grafenska_zemlja_cudesa_M_Kralj.pdf, (11.06.2016.)

U 50 godina Moore-ova zakona ostvarene su 3500 puta brže performanse tranzistora**,** 90.000 puta manje potrošnje energije, a troškovi proizvodnje smanjeni su čak 60.000 puta. Smanjivanje površine potrebne za smještanje tranzistora na mikročipove ubrzalo je razvoj elektroničkih uređaja, posebice računala i smartphone-a, koji su danas brži i moćniji od super računala u 20. stoljeću.



Slika 6. Prikaz veličine i memorije čipa u periodu od 2005. do 2014. godine.
Izvor: http://eskola.hfd.hr/clanci/Grafenska_zemlja_cudesa_M_Kralj.pdf, (15.06.2016.)

Industrija je danas pod izuzetno velikim pritiskom, svi očekujemo da ćemo iduće godine za iste ili manje novce dobiti brže i manje prijenosno računalo, bolji, atraktivniji i brži mobitel, te jeftinu memoriju, što dovodi do toga da elektronička industrija mora kontinuirano rasti kako bi opstala te zadovoljila kupce. Na slici 6 prikazana su dva na izgled slična čipa, ali drugi u pomaku od 9 godina ima oko tisuću puta veći kapacitet memorije. Što ukazuje na veliki pomak u skaliranju elektroničkih komponenti s obzirom na iste vanjske fizičke dimenzije čipa.

Posebno se nameće problem skalabilnosti elektroničkih uređaja i računala. Skalabilnost označava sposobnost sustava da se prilagodi promjenama povećanog opterećenja tako da

obilježje dostupnosti i pouzdanosti ostane očuvano [13]. Što znači da povećano opterećenje skalabilnog sustava neće rezultirati smanjenjem njegovih performansi. Jedan od faktora koji utječe na svojstvo skalabilnosti sustava je mogućnost elektroničkog sklopovlja da zadovolji tražene potrebe. Stoga se traže nova rješenja nakon što se dostigne granica fizičkog skaliranja.

3. UGLJIK

Ugljik (C) je kemijski element koji se nalazi u četvrtoj grupi i drugoj periodi periodnog sustava elemenata, atomski broj mu je šest, a atomska masa mu iznosi 12.0107, te spada u nemetale. Ugljik je tvar bez mirisa i okusa i kemijski prilično stabilna, te poslije vodika, tvori više spojeva nego svi ostali kemijski elementi zajedno.

Ugljik je otkriven u prethistoriji i bio je poznat najranijim ljudskim civilizacijama u obliku drvenog ugljena i čađe. Metoda dobivanja drvenog ugljena kako se provodi danas, provodila se još u doba rimskog carstva. U obliku dijamanta, ugljik je bio poznat u Kini vjerojatno i nekoliko tisućljeća prije naše ere.

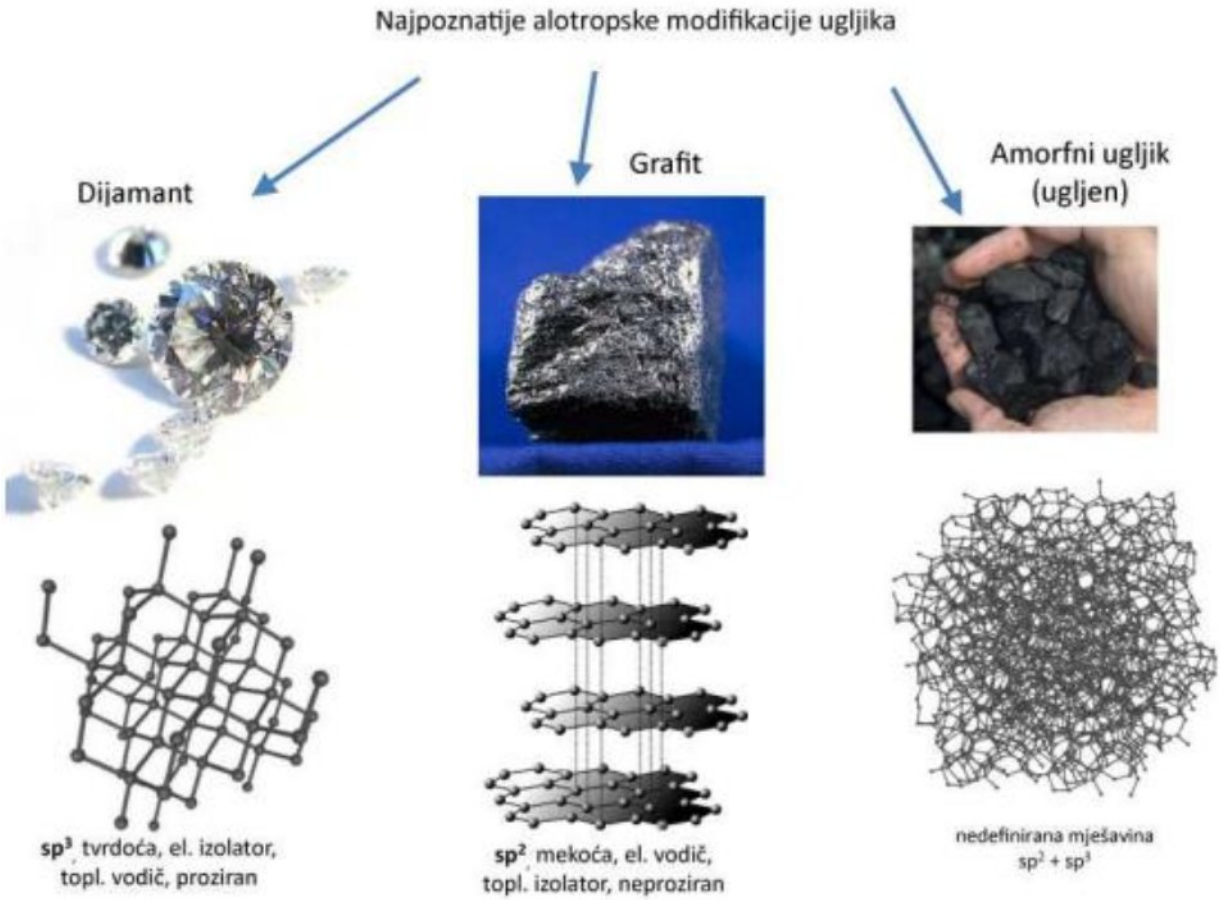
U 18. stoljeću, Francuz René Antoine Ferchault de Réaumur je pokazao da se željezo pretvara u čelik uz dodatak male količine supstance, koja tada još nije identificirana kao ugljik. U istom je stoljeću, otac moderne kemije, Antoine Lavoisier proveo eksperimente paljenja ugljena i dijamanta, te uočio da oba materijala oslobađaju jednaku količinu ugljičnog dioksida po gramu paljenog materijala. Time je indirektno pokazao da su ugljen i dijamant sačinjeni od ugljika. U sličnom je eksperimentu Nijemac

Carl Wilhelm Scheele je pokazao da je grafit također ugljik, iako se za grafit do tada vjerovalo da je oblik olova.

3.1. Alotropske modifikacije ugljika

Različite tvari istog elementarnog sastava nazivamo alotropima ili alotropskim modifikacijama (slika 7). Alotropi su elementi koji se mogu javiti u dvije ili više modifikacija u istom agregatnom stanju, te obično imaju različita fizikalna svojstva a često su im i kemijska svojstva različita.

Dijamant, grafit i amorfni ugljik su tri alotropske modifikacije elementa ugljika, a utvrđeno je postojanje i četvrte modifikacije ugljika, tzv. "bijeli" ugljik u kojoj se nalaze kuglaste molekule ugljika C60 (fulereni).



Slika 7. Alotropske modifikacije ugljika i njihova svojstva

Izvor: http://eskola.hfd.hr/clanci/Grafenska_zemlja_cudesa_M_Kralj.pdf, (20.05.2016.)

3.1.1. Dijamant

Dijamant lako lomi svijetlost pa njegovi brušeni kristali imaju vrlo lijep sjaj i služe za izradu skupocjenog nakita. Zbog velike tvrdoće kristali dijamanata upotrebljavaju u tehnici za izradu

brusova, bušilica i za obradu tvrdih materijala. Dijamant je bezbojan, najtvrđi materijal, gustoće 3,5 (g/cm^3), tališta 3500 ^0C, te slabe električne provodljivosti.

3.1.2. Grafit

Grafit je crna (tamnosiva), mekana krutina bez mirisa gustoće 2,2g/cm^3, vrlo je dobar vodič elektriciteta i topline, a na zraku i pri povišenim temperaturama je postojan. Ne tali se već sublimira na 3825°C, pa se upotrebljava za izradu lonaca u kojima se tale metali visokog tališta. Od grafita se izrađuju elektrode, a služi i za suho podmazivanje kada se zbog visoke temperature ne mogu upotrebljavati masti i ulja.

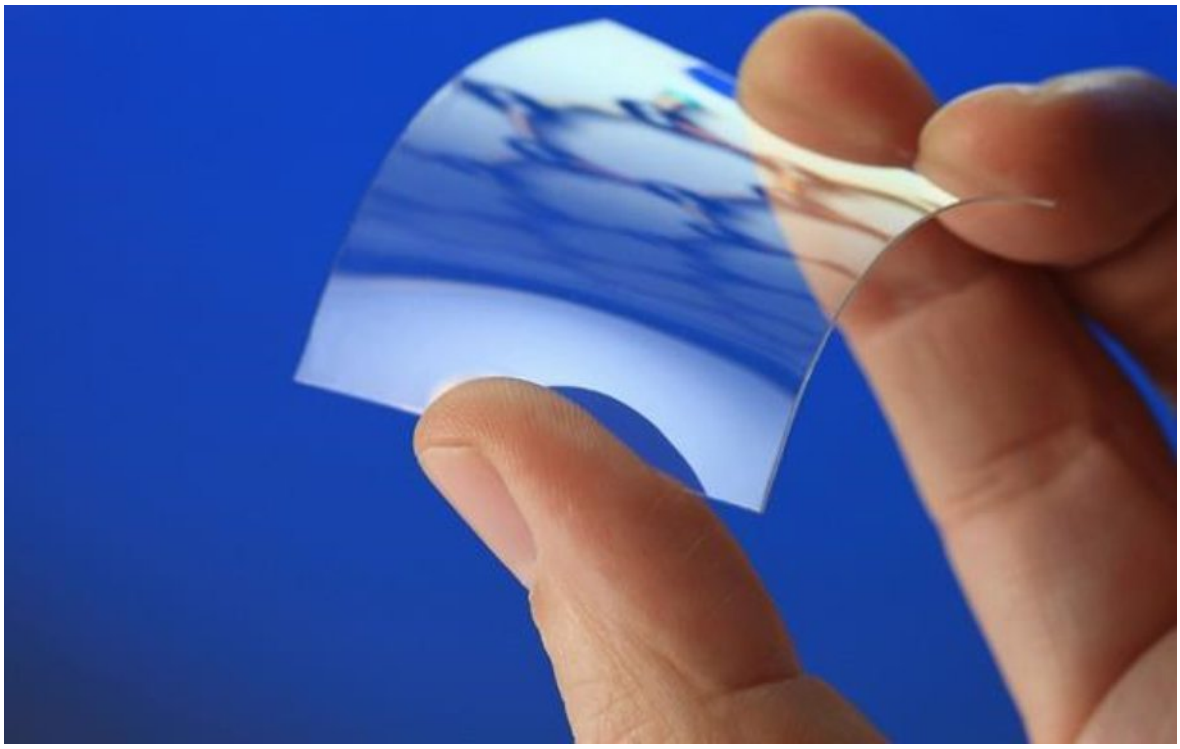
3.1.3. Fuleren

Fuleren je molekula koja se sastoji od 60 ili 70 ugljikovih atoma vezanih u 12 peterokuta i 20 šesterokuta i slična je nogometnoj lopti. Otkrivena je 1969. godine sublimacijom pirolitičkog grafita na niskom tlaku. Fulereni su vrlo stabilne kristalne i tvrde tvari, od kojih se očekuje da će zbog svoje jedinstvene građe i svojstava naći primjenu kao supravodiči, maziva, katalizatori, prijenosnici ljekovitih tvari u organizmu i drugo. Cjevasti fulereni se nazivaju i ugljične nanocijevi.

4. GRAFEN

Grafen je dvodimenzionalna ugljikova struktura debljine jednog atoma. Dobije se kada se od kristalne rešetke ugljika izolira samo jedan sloj atoma (slika 8.).

Godine 2004., znanstvenici Andre Geim i Konstantin Novoselov izdvojili su grafen pomoću ljepljive trake (selotejp) iz grafita te dobili minijaturne fragmente tog materijala. 2010. godine osvojili su Nobelovu nagradu za fiziku za svoj rad sa ovim materijalom.

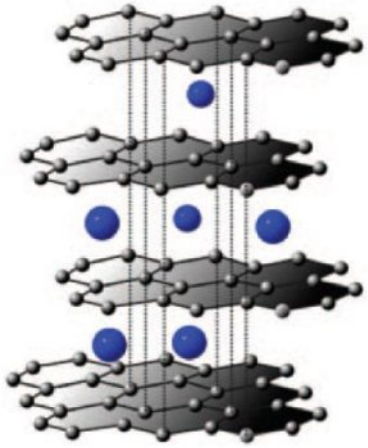


Slika 8. Grafen

Izvor:
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Ugljikovo_doba_Nanostrukture_ugljika-klasifikacija.pdf, (22.05.2016.)

4.1. Struktura i svojstva grafena

Grafen (monosloj grafita) je dvodimenzionalna šesterokutna mreža ugljikovih atoma (slika 9.), te ga možemo zamisliti kao jedan veliki kristal, debljine svega jednog atoma. Grafit debljine jednog milimetra sadrži tri milijuna slojeva grafena naslaganih jedan na drugi koji su međusobno labavo povezani.

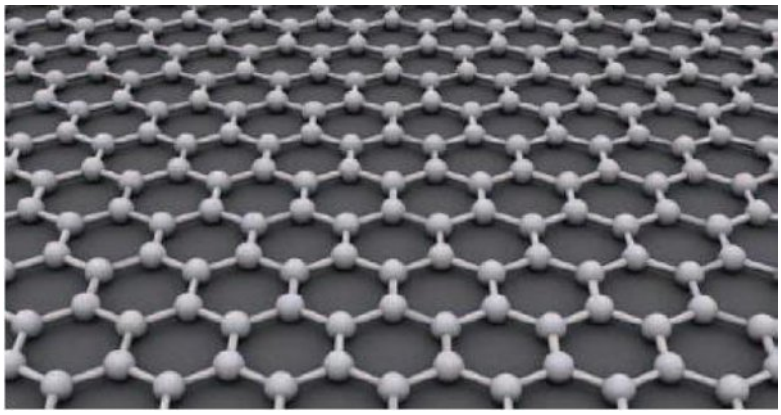


Slika 9. Molekularna struktura grafena
Izvor: Techne 13, časopis za politehničku obrazovnu teoriju i praksu

Grafen je najčvršći i najtanji poznati materijal, lagan je, savitljiv, vrlo dobro provodi struju, ima vrlo visoko talište, gotovo je potpuno proziran, ali je istodobno toliko gust da ni najmanji atomi plina ne mogu proći kroz njega. Ova fantastično snažna membrana grafena ne propušta vodu između dva spremnika, ali ujedno precizno mjeri protok iona, ako se izbuši rupica široka samo nekoliko nanometara.

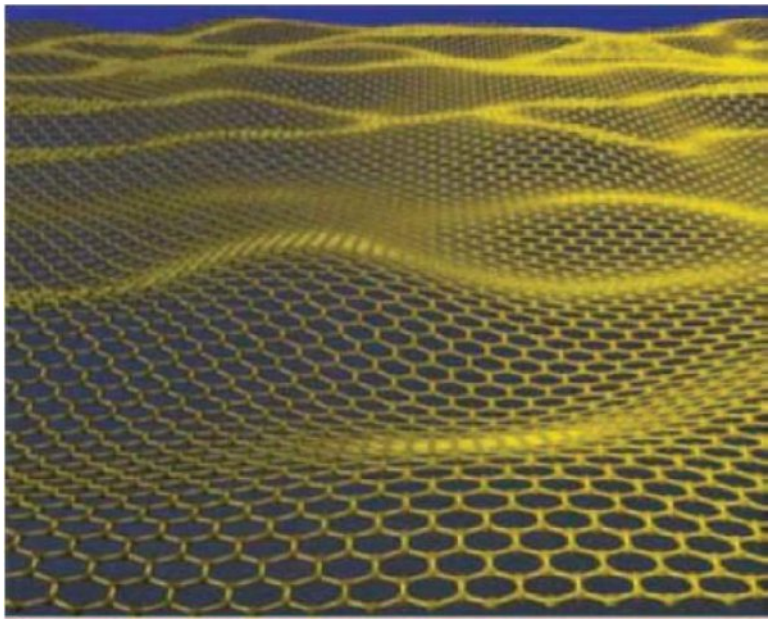
Grafen se ponaša kao metal i jednako je dobar provodnik struje kao i bakar, čvršći je i krući od dijamanta, sto puta jači od čelika, a može se rastegnuti za četvrtinu duljine, poput gume.

Površina plohe grafena najveća je od svih poznatih materijala za određenu masu, zbog toga se njegova struktura prostire poput beskonačne ravnine (slika 10.).



Slika 10. Prikaz grafena kao beskonačne ravnine
Izvor: Techne 13, časopis za politehničku obrazovnu teoriju i praksu

Grafen apsorbira vrlo malo svjetlosti, odnosno samo oko 3% dok ostatak prolazi kroz materijal ne sudjelujući u generiranju električne energije. Mikroskopski gledano grafen je valne prirode, što znači da se njegove čestice ponašaju kao valovi (slika 11.), a upravo to vrijedi za elektrone u metalima i omogućuje da elektroni djelomično savladavaju potencijalne prepreke. Uzimajući u obzir da su to čestice koje se gibaju jako brzo, usporedivo sa brzinom svjetlosti, dolazimo do zaključka da te čestice mogu proći u potpunosti kroz potencijalne prepreke, iako nemaju dovoljno energije da ih preskoče. Upravo tako se ponašaju elektroni u grafenu. Osim toga, kroz grafen može migrirati istovremeno veliki broj elektrona, što se označava kao velika mobilnost nosioca naboja. Mobilnost elektrona u grafenu veća je nego u bilo kojem drugom poznatom materijalu.



Slika 11. Valovitost grafena

Izvor: Techne 13, časopis za politehničku obrazovnu teoriju i praksu

Značajno je naglasiti da sva istaknuta svojstva dolaze do izražaja na sobnoj temperaturi, stoga to mogu biti razlozi za daljnja istraživanja i primjenu u proizvodnji elektroničkih komponenti.

4.2. Zabranjeni pojas grafena

Grafen, alotropska modifikacija ugljika ne posjeduje zabranjen pojas što značajno smanjuje njegove mogućnosti. Industrija se trenutno nalazi u fazi potrage za novim nasljednikom silicija, stoga je od izuzetne važnosti pronaći način stvaranja zabranjenog pojasa želimo li od grafena učiniti važan poluvodički materijal.

Simetrija kristalne rešetke grafena razlog je nedostatka zabranjenog pojasa kod grafena. Nikhil Koratkar, profesor na Rensselaer institutu i njegovi kolege istražili su ideju razlamanja te simetrije vezanjem molekula na samo jednu stranu grafena. Unutar komore, molekule vode apsorbirale su se samo na izloženoj strani grafena, ali ne i na onoj strani koja je bila okrenuta prema silicijevom dioksidu. Rezultat narušavanja simetrije doprinijela je i interakcija vlage s defektima u supstratu silicijeva dioksida te se ubrzo stvorio zabranjeni pojas. Prednost

apsorpcije vode, u usporedbi s apsorpcijom plinova, jest manja cijena, netoksičnost, te mnogo lakša kontrola rada tranzistora. Napredak u konstrukciji mikro uređaja omogućio je stvaranje dovoljno malenog kućišta za određene dijelove ili cijelog računalnog procesora. U takvom bi kućištu bilo moguće dovoljno precizno kontrolirati razinu vlage. Prema nivou vlage unutar kućišta, procesor bi mogao reverzibilno prilagođavati širinu zabranjenog pojasa u grafenu od 0 do 0,2 elektronvolta [18]. Ovo istraživanje moglo bi otvoriti vrata upotrebi grafena kao nove generacije materijala za izradu tranzistora, dioda, nanoelektronike, nanofotonike i ostalih grana elektronike.

4.3. Graphene Flagship

Veliki značaj grafena prepoznat je na razini EU, te se intenzivno provode istraživanja u sklopu europskog projekta Graphen Flagship[1]. S proračunom od jednu milijardu eura, Graphen Flagship je dosad najveći projekt koji je financiran sa strane EU, a sastoji se od više od 150 znanstvenih i industrijskih istraživačkih skupina u 23 zemalja.

Graphene Flagship ima zadatak okupiti akademske i industrijske istraživače, iz područja akademskih laboratorija u europskom društvu u prostoru od 10 godina, čime bi se stvorio gospodarski rast, nova radna mjesta i nove mogućnosti.

Prema službenim zapisima do srpnja 2011. zabilježeno je 3018 patenata koji su povezani s otkrićem grafena. Od srpnja 2011. do veljače 2013. broj patenata gotovo se utrostručio i došao do brojke od 8416.

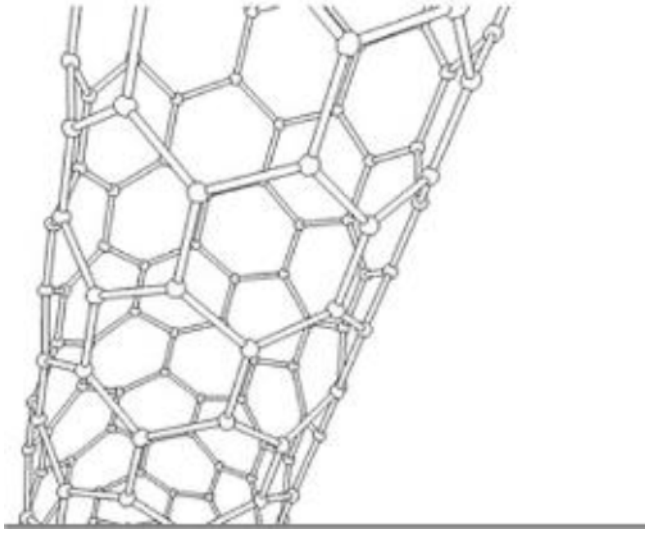
Veliki značaj grafena u budućnosti uvidjeli su mnogi, te osim najvećeg istraživanja kojeg je provela Europska unija do sada i druge multinacionalne kompanije poput Microsofta, Samsunga, IBM-a i drugih, ulažu mnogo sredstava u istraživanje grafena sa nadom da će upravo oni dovesti do revolucije u industriji.

[1] http://graphene-flagship.eu/, 22.06.2016.

5. NANOTEHNOLOGIJA

Evolucija shvaćanja strukture materije traje od oko 400. godine prije Krista i pojave atomizma, da bi dvadesetih godina ovog stoljeća postalo jasno da smo mi sami i sve oko nas sazdani od svega 92 različita atoma. Kroz sav taj period do danas, ljudi stvaraju svoje alate i pomagala za život. Počeli su sa velikim stvarima, grubom obradom različitih sirovina, bušenjem, varenjem, ali ima i niz uređaja koji su puno manji i dapače trebaju biti minijaturni. Tu se razvijaju skupe tehnologije koje se svojom logikom ne razlikuju puno od gore navedenih primarnih postupaka, kreće se uvijek od velikog prema manjem.

Nanotehnologija je vještina pravljenja, promatranja, mjerenja, obrade i rada sa stvarima tako malim da ih je moguće promatrati samo pomoću najjačih mikroskopa. Riječ nanotehnologija upotrebljava se sve češće u raznim značenjima, s jedne strane označava sve što se odigrava na nano ljestvici veličina u slijedu opće minijaturizacije makroskopskih objekata ka sve manjima i manjima, a s druge strane podrazumijeva striktno stvaranje strojeva, uređaja, atom po atom odnosno molekulu po molekulu. Često se nanotehnologija naziva i molekularna nanotehnologija, čije su polje djelovanja veličine reda milijarditog dijela metra.



Slika 12. Ugljična nanocijev

Izvor: http://www.hydrogenfuelnews.com/researchers-use-carbon-nanotubes-to-make-revolutionary-breakthrough-in-technology/852124/, (02.07.2016.)

Nanotehnologija ima svijetlu budućnost i veliku primjenu u cjelokupnom svijetu kao i u svakodnevnom ljudskom životu. Velika primjena nanotehnologije vidljiva je u medicini (nanomedicini), automobilskoj industriji, tekstilnoj industriji, elektronici, kao i u mnogim drugim znanstvenim disciplinama. Naime, nanotehnologija je u užem smislu riječi slaganje molekula onako kako mi to želimo.

Za primjer, najmanja širina žice u elektronskim uređajima je otprilike 50 nm, odnosno oko 500 atoma u promjeru, a najtanja moguća žica bila bi široka samo jedan atom. Takve žice danas je moguće proizvesti, iako ne za neki upotrebljivi elektronski uređaj, ali su spoznaje u njihovim svojstvima korisne za njihovo planiranje.

Vođene su mnoge rasprave o budućem utjecaju nanotehnologije, jer ima potencijal da napravi mnoge nove materijale i uređaje sa širokim spektrom primjene, no sa ovako velikim očekivanjima u nanotehnologiji javlja se i pitanje mogućnosti i ostvarivosti, uključujući brigu o toksičnosti i utjecaju nanomaterijala na okolinu, kao i njihovog potencijalnog utjecaja na ekonomiju.

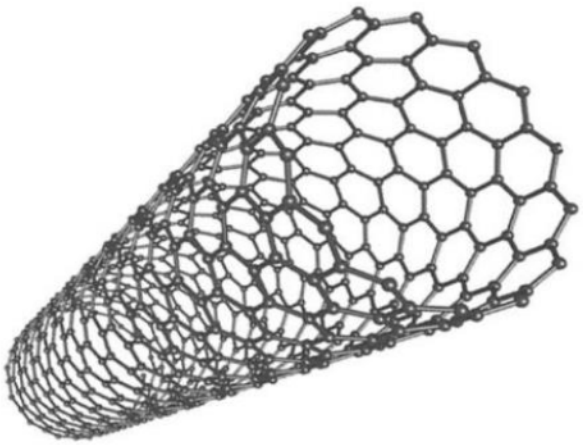
5.1. Ugljikove nanocijevi

Ugljikove nanocijevčice (slika 12.) su alotropske modifikacije ugljika cilindrične nanostrukture, veličine 1/50000 promjera ljudske vlasi. 1991. godine Sumio Lijima prvi je opazio nanocijevi, dok njihova pojava datira još iz davne 1952. godine, dok su istraživači bili već izradili različite elektroničke i optoelektroničke prototipove uređaja od ugljikovih nanocijevi, kao što su tranzistori, diode, emiteri svjetla i detektori. Najavljuje se da će ugljikove nanocijevi biti čudo materijala 21. stoljeća, te su glavna moguća zamjena za silicij, koji u pogledu minijaturizacije čipova, dostiže svoje granice. Ugljikova nanocjevčica jedan je od najzaslužnijih materijala za veliki interes koji vlada za nanotehnologiju. Vrlo su specifične zbog svojih odličnih svojstava; male veličine, dobrih električnih svojstava (puno vodljivije od

bakra), velike čvrstoće (čvršće od čelika), lakše su od aluminija, male gustoće i velike elastičnosti te im ta svojstva omogućavaju veliki broj primjena. Nanocijevi su strukturno slične grafitu i možemo ih promatrati kao jednoslojne grafitne ravne strukture savijene u bešavnu cijev. Temeljno svojstvo ugljikovih nanocijevi je da im se električne karakteristike mogu mijenjati samo promjenom fizičkih osobina nanocijevi, a karakteristike im određuju: promjer nanocijevi (do 2nm, oko 10 atoma), orijentacija saća (u odnosu na os cijevi).

Ugljikove nanocjevčice postoje jednostjenčane (SWCNT) i višestjenčane, te ovisno o broju slojeva pokazuju različita svojstva. Ugljikove nanocjevčice s više stjenki otkrio je 1991. godine japanski znanstvenik Sumio Lijima, dok su jednostjenčane nanocijevčice otkrivene par godina kasnije, 1993. godine.

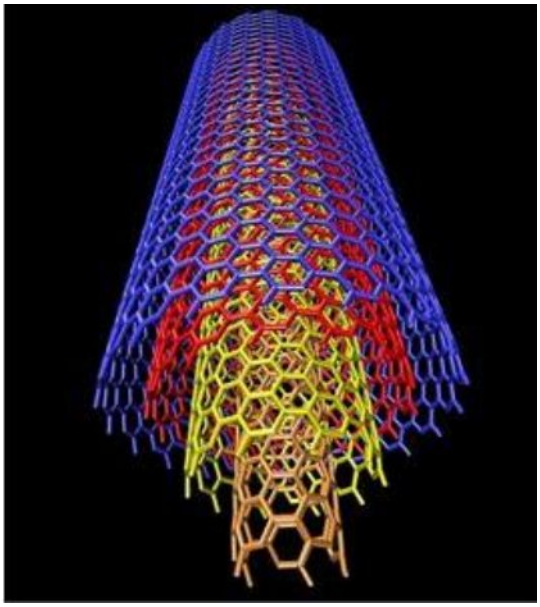
Jednostjenčane ugljikove nanocijevi (slika 13.) sastoje se od jedne plohe grafena, zamotane u oblik šupljeg cilindra, imaju promjer oko 1 nm, a duljina im može biti više milijuna puta veća. Najveća proizvedena nanocijev duga je čak 18,5cm. Električna svojstva jednostjenčanih ugljikovih nanocijevi, mogu se mijenjati od metalnih do poluvodičkih ili obrnuto, mijenjajući promjer nanocijevi ili njen vektor kiralnosti.



Slika 13. Jednostjenčana nanocjevčica

Izvor:
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/NANOTEHNOLOGIJA_U_SPORTU.pdf,
(03.07.2016.)

Višestjenčane ugljikove nanocijevi (slika 14.) sastoje se od reda jednostjenčanih ugljikovih nanocijevi, ugniježđenih poput godova u drvetu. Gradnja višestjenčanih nanocijevi nešto je složenija, zbog toga što imaju više jednostjenčanih nanocjevčica različitih promjera koje se nalaze jedna unutar druge tvoreći tako koncentrične cilindre. Udaljenost između slojeva u grafitu je oko 0,34nm.



Slika 14. Višestjenčana ugljikova nanocjevčica

Izvor: http://www.bug.hr/vijesti/ibm-nanocijevi-oscilatoru/71587.aspx, (03.07.2016.)

Višetjenčane naocjevčice imaju veliku čvrstoću. Specifična čvrstoća može iznositi do 48000kNm/kg što je puno više od čvrstoća drugih materijala (čvrstoća boljih legura čelika je do 254kNm/kg). Zbog vrlo malog trenja između slojeva, nanocjevčice se mogu teleskopski širiti te se mogu koristiti kao pomoćne ruke u nanomehaničkim uređajima. Nanocjevčice nisu čvrste pod kompresijom ili utjecajem u radijalnom smjeru.

Nanocjevčice u elektronici se uglavnom koriste za proizvodnju poluvodiča memorijskih integriranih krugova i tranzistora, ali pomoću nanocjevčica još uvijek nije moguće postići sklopove visoke gustoće poput današnjih široko korištenih tehnologija. Koristimo ih i u kablovima koji pokazuju mnogo višu vodljivost od bakra i aluminija, baterijama i

kondenzatorima visokog kapaciteta, solarnim ćelijama i dr. [2]. Svojstva ugljikovih nanocijevi za istosmjerni signal i na optičkim frekvencijama već su dobro proučena, no vrlo je malo studija koje proučavaju svojstva na području radiofrekvencije (300kHz – 300GHz).

6. MOGUĆNOSTI PRIMJENE GRAFENA

Grafen već duže vrijeme nazivamo herojem među materijalima, no čini se kako su sve njegove kvalitete tek nedavno počeli razumijevati. Dvodimenzionalni magični materijal grafen, sastavljen je od atoma ugljika, tanji je od papira, čvršći od čelika, lagan, snažan, savitljiv, rastezljiv i odličan provodnik električne energije. Takve karakteristike ga čine gotovo nevjerojatnim, te se očekuje kako će upravo grafen biti materijal koji će unaprijediti mnoge proizvode, od kondoma do računala. Mnogi stručnjaci ostali su iznenađeni kada su saznali da grafen postoji u slobodnoj formi. U tridesetim godinama prošlog stoljeća, bilo je uvriježeno mišljenje da tako tanak materijal mora biti jako nestabilan, te da bi ga temperaturne razlike morale uništiti. Svojstva grafena su poprilično nevjerojatna, posebno ako znamo da je materijal ponajprije napravljen iz grafita (onoga kojega nalazimo i u običnim olovkama) koji sam po sebi nije senzacionalan.

Danas nakon desetljeća znanstvenih istraživanja, otkrivena su mnoga druga svojstva ovoga materijala od kojih se očekuje da će promijeniti budućnost. Europska Unija dosada je provela najveće istraživanje pod nazivom Graphene Flagship. Tijekom sljedećih deset godina tim predvođen vodećim znanstvenicima pokušati će uz pomoć grafena revolucionirati nekoliko industrija i kreirati ekonomski rast diljem Europske Unije.[2]

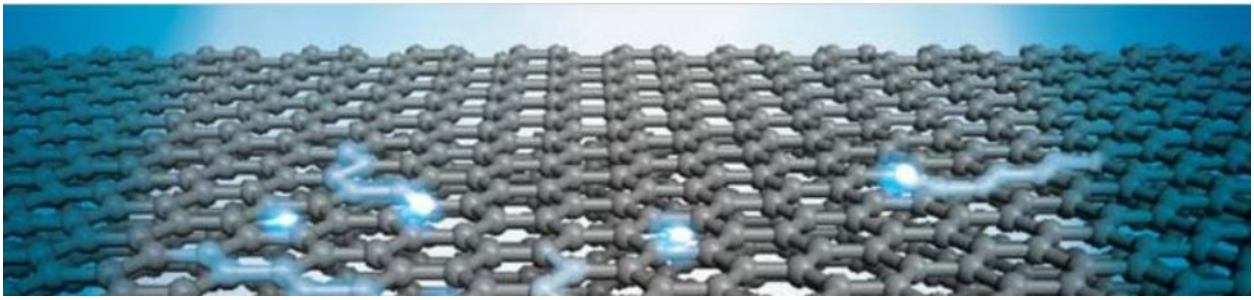
Mogućnosti primjene grafena gotovo su neograničene te znanstvenici eksperimentiraju s ovim materijalom u razvoju antena, filtera desalinizacije, guma, automobilske industrije, avionskih krila, teniskih reketa i brojnih drugih materijala.

Trenutno najveći problem s brojnim pametnim telefonima jest prekratko trajanje baterije, koji se moraju često puniti čak i dva puta dnevno. Znanstvenici već neko vrijeme eksperimentiraju

[2] http://www.znanostblog.com/grafen-super-materijal-buducnosti/, Svibanj, 2016.

s ovim materijalom zahvaljujući kojem bi baterije mogli napuniti za nevjerojatnih dvadeset sekundi.

U kontaktu sa svijetlom grafen stvara električnu energiju (slika 15.). Radi na principu da kada je pogođen bilo kojom vrstom svijetla, dobiva karakteristiku toplog provodnika, što znači da elektroni molekule grafena dobiju dovoljno energije da počnu strujati, iako ugljik ispod ostaje hladan. Zahvaljujući sposobnosti provođenja svijetla, grafen bi mogao potaknuti daljnji razvoj solarnih ćelija te bi mogao zamijeniti platinu, ključni, ali višestruko skuplji element koji je danas jedna od osnova solarnih ćelija.



Slika 15. Stvaranje struje u kontaktu sa svjetlom
Izvor: http://pixelizam.com/upoznajte-grafen-cudotvorni-materijal/, (23.07.2016.)

Materijal debljine jednog atoma može poprimiti drastično različita svojstva ukoliko je konstantno pod utjecajem električnog polja atoma ispod njega. Ukoliko bi znanstvenici željeli da određene biomolekule dovedu do reakcije bez da ih uznemiruju, grafen bi im mogao pomoći.

Oko 97% vode na našem planetu nije za piće s obzirom da je slana. Metoda uklanjanja soli iz vode su dugotrajne i skupe, a grafen ima potencijal da promijeni način na koji se do sada desaliniziralo, te postane najbolji filter na svijetu. Morska voda prolazi kroz filter koji blokira sol, a propušta čistu vodu. Problem je taj što je deblji filter proces je manje učinkovitiji. Listovi grafena su debljine jednog atoma, te budući da je nanopropusan može pustiti vodu da prođe kroz njega, ali ne i sol i to bez potrebe za ikakvim pritiskom pomoću kojeg rade trenutni

filteri. Isto tako to bi moglo značiti da se grafen može koristiti u sustavima za pročišćavanje vode i sustavima učinkovitog i ekonomski održivog stvaranja biogoriva.

Grafen ima potencijal za povećanje umjetne fotosinteze i to zahvaljujući svojoj sposobnosti da proizvede električnu energiju pri udaru svjetla.

Koristi grafena koji ćemo uskoro početi primjenjivati je u optoelektronici, posebno kod zaslona osjetljivih na dodir, zaslon s tekućim kristalima (LCD) i organskih svjetlosnih dioda (OLED).

U smislu potencijalnih primjena u stvarnom svijetu možemo očekivati da ćemo vidjeti uređaje kao e-papir (slika 16.) sa sposobnošću za prikaz interaktivnih informacija i fleksibilnih elektroničkih uređaja, uključujući prijenosna računala i televizore.



Slika 16. Savitljivi ekran i e-papir

Izvor: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Ugljikovo_doba-Grafen_i_njegove_primjene.pdf, (23.07.2016.)

Na sveučilištu u Hong Kongu istraživači tvrde da su proizveli novi tip baterije na osnovi grafena. Uređaj navodno apsorbira termalnu energiju i ona u otopini i pretvaraju u električnu

energiju. Takva baterija bi se mogla koristiti u širokoj primjeni kao što je napajanje umjetnih organa [19].

Britanski znanstvenici su otkrili novi način upotrebe grafena, kako bi se uhvatile i transformirale veće količine svjetlosti nego ranije, otvarajući mogućnosti razvoja novih tehnologija superbrzog interneta i optičkih komunikacija.

Tim sa sveučilišta Rice konstruirao je uređaj zasnovan na grafenu, tip „Flash“ memorije s mnogo većim kapacitetom i brzim radnim karakteristikama u odnosu na postojeću tehnologiju skladištenja podataka.

6.1. Primjena grafena u elektronici

Nanotehnologija ima značajan utjecaj na područje elektronike gdje se minijaturizacija nezaustavljivo nastavlja. Veličina tranzistora smanjuje se eksponencijalno (Moore-ov zakon) već nekoliko desetljeća rezultirajući integriranim krugovima koji sadrže nekoliko desetina milijuna tranzistora. Kako se veličina tranzistora smanjuje približavamo se fizikalnoj granici, a kad se dosegne ta granica eksponencijalni porast računalne snage doći će kraju. To se očekuje u narednih desetak godina što predstavlja kraj za čisto silicijsku tehnologiju. Svojstva grafena su interesantna fizičarima čvrstog stanja i inženjerima elektrotehnike od kojih je vjerojatno najvažnija mogućnost izrade sklopova koji će biti manji i brži od onih zasnovanih na siliciju. Ključna prednost grafena leži u brzini prolaska elektrona što omogućava postizanje visokih frekvencija bez znatnijeg mijenjanja dimenzija. Postoje razne mogućnosti primjene grafena a najvažnija područja bi bila elektronička industrija, računalna tehnologija, energetika, komunikacijske tehnologije i medicina.

Mikroelektronika je područje koje je vjerojatno najviše zainteresirano za rješenja nanotehnologije, jer se ide dalje u minijaturizaciji. Mikroelektronika je područje elektronike koja proučava i izrađuje komponente vrlo malih veličina (tranzistori, kondenzatori, otpornici, diode), izrađuju se iz poluvodiča procesom fotolitografije. Današnja rješenja mikročipova već

su blizu granica, te se izlaz vidi u odlasku u područje molekule i atoma gdje praktički već postoje niz rezultata i načina za gradnju struktura manjih od 10nm.

Razvoj nanotehnologije omogućava poboljšanje kvalitete života. Grafen bi mogao biti jedan od najsvestranijih materijala koji uistinu mnogo obećava. Ovo je dakle još jedno u nizu otkrića temeljenih na nanotehnologiji, koju će svoju primjenu vrlo skoro naći i u složenijim elektroničkim sustavima, ali i u običnoj elektronici te malo kasnije omogućiti neslućene prednosti srodnim znanostima i medicini.

Primjena grafena u elektronici najviše obećava za izradu tranzistora, pri izradi detektora kao senzornih elemenata i upravljanju toplinom. Tranzistori su elektronički uređaji koji čine okosnicu moderne elektronike, mogu se uključiti ili isključiti, te na taj način preusmjeravaju električni signal. Računalni mikroprocesori sačinjeni su od milijuna tranzistora, a dosad korišteni materijali poput silicija praktički su dosegli svoje fizikalne granice i dosadašnji eksponencijalni rast snage i brzine elektroničkih uređaja nije moguće nastaviti bez korištenja nekih novih materijala. Znanstvenici smatraju da bi se u budućnosti trebali okrenuti grafenu, jer bi se grafen kao materijal mogao koristiti u tranzistorima, koji bi bili više od stotinu puta brži od današnjih silicijskih tranzistora. Brzina tranzistora je određena njegovom veličinom i brzinom prolaska elektrona. Upravo zbog toga se teži minijaturizaciji uređaja, iako znamo da će se naići na fizikalnu granicu.

6.1.1. Razvoj grafenskih tranzistora

Grafenski FET tranzistor je bio zamišljen još 2004. godine ali je tada imao dosta slaba svojstva. Tek 2006. godine predstavljen je prvi planarni FET u potpunosti od grafena, a 2008. godine tim u Manchesteru napravio je nanometarski grafenski tranzistor, debljine 1, a širok 10 atoma. Novoselov je tom prigodom izjavio da je to apsolutna granica Moore-ovog zakona, koji propisuje odnos između smanjenja računalnih procesora i povećanja njihove brzine. S obzirom da su tranzistori u siliciju osjetno veći, zaključuje da se od toga manje ne može postići. U IBM-u su znanstvenici krajem 2008. godine napravili grafenski tranzistor koji funkcionira dobro na 26GHz pri duljini kanala od 150nm. 2010. godine su u IBM-u brzine grafenskih tranzistora digli na 100GHz, što je višestruko nadjačalo dotadašnje brzine sa grafenskim tranzistorima, ali i silicijskih tranzistora s zasunom iste veličine. Ovo je najmanji

IBM-ov tranzistor koji su napravili sa veličinom zasuna od 40nm, dok je grafenski tranzistor koji je postigao brzinu od 100GHz imao zasun veličine 240nm, čime se pokazalo da se grafen opravdano može smatrati nasljednikom silicija. Nedugo nakon toga je IBM objavio da je oborio svoj vlastiti brzinski rekord za grafenske tranzistore sa 100 na 155GHz.

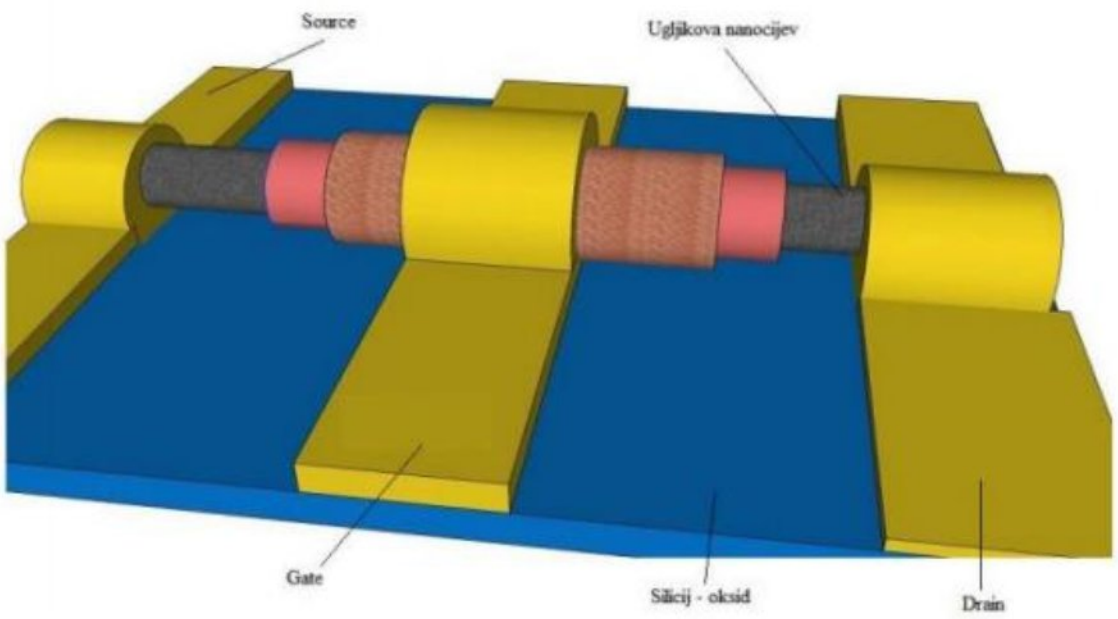
Prvi Intel-ov grafenski tranzistor dostigao je brzinu od 100GHz, a proračuni kažu da bi prvi procesor dobiven kombiniranjem silicija i grafena sa multiplajerima mogao postići brzinu od 1000GHz. DARPA[3] američka agencija koja radi na razvoju radiofrekvencijskih tranzistora za buduće ratne telekomunikacijske primjene dijelom financira i grafenski tranzistor. Osim pojedinog tranzistora istraživanjima su uspjeli skrojiti i nizove od stotinu grafenskih tranzistora u jednom čipu, te su pritom koristili tehnike koje se danas koriste u proizvodnji silicijskih čipova. Grafenski tranzistor još je uvijek pod budnim okom istraživača, koji su neočekivano otkrili još jednu prednost ove vrste tranzistora. U eksperimentu je primijećen efekt u kojem grafenski tranzistor u nekim područjima u dodiru s metalnim kontaktima ima veće termoelektrično hlađenje od topline izazvane prolaskom struje kroz otpornike. Budući čipovi zasnovani na ovoj tehnologiji će zahtijevati manja hlađenja ili će moći raditi bez hlađenja, takva pojava je nazvana samohlađenje. Silicijski tranzistori veliki problem nalaze upravo u zagrijavanju tranzistora te bi tehnologija samohlađenja bila izuzetno značajna u budućnosti. Grafenski tranzistori po pitanju stvarne upotrebe još su uvijek daleko od masovne proizvodnje, kako zbog tehničkih problema tako zbog ekonomske isplativosti tranzistora baziranih na siliciju.

6.1.2. Grafenski tranzistor s efektom polja

Da bi se postigao tranzistorski efekt kod grafenskih tranzistora s efektom polja potrebno je na grafen smotan u nanocijev priključiti source, drain i gate elektrode. Kada gate priključimo na negativni potencijal, unutar nanocijevi se stvaraju šupljine koje provode struju. Priključenjem na pozitivni potencijal smanjit će se koncentracija šupljina odnosno vodljivost nanocijevi. Kontroliranjem napona na gate elektrodi, kontrolira se protok struje kroz tranzistor. Takvi se tranzistori nazivaju CNTFET (Carbon Nano Tube Field Effect Transistor) i proizvode se kao jednokanalni ili višekanalni. Jednokanalni se obično kvare nakon nekoliko tjedana dok

[3] http://www.darpa.mil/

višekanalni zadržavaju stabilne performanse i nekoliko mjeseci nakon. Selekcija poluvodičkih ugljikovih nanocijevi u proizvodnji je jedan od glavnih problema, a najveća prednost je golema pokretljivost nosilaca i otpornost na efekt kratkog kanala zbog mogućnosti implementacije upravljačke elektrode koja u potpunosti okružuje kanal.

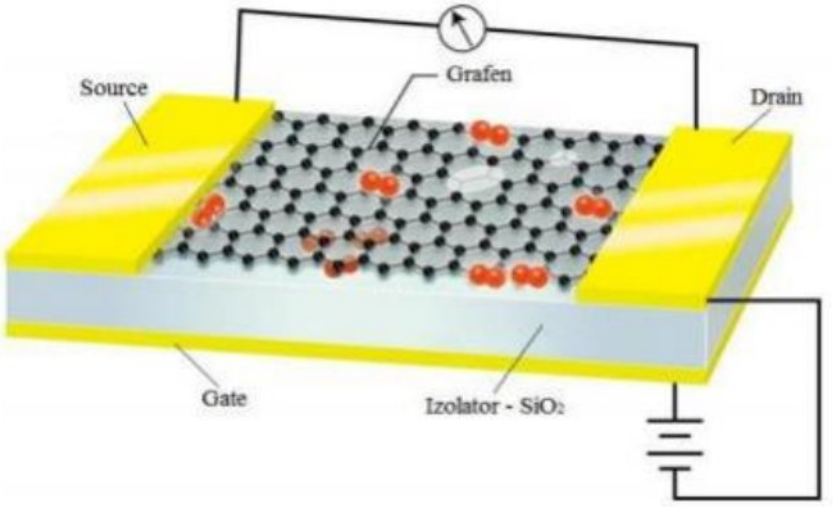


Slika 17. Tranzistor od ugljikovih nanocijevi s efektom polja

Izvor: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Primjena_nanomaterijala_u_optici_i_elektronici.pdf, (05.06.2016)

6.1.3. Tranzistor od grafenskih nanotraka sa efektom polja

Osim tranzistora od ugljikovih nanocijevi, brojna istraživanja provode se i na tranzistorima sa efektom polja građenim od slojeva grafena i grafenskih nanotraka (slika 18.). Ti tranzistori se nazivaju GNRFET (Graphene Nanoribbons Field Effect Transistor). Najveća mana tranzistora od grafenskih nanotraka sa efektom polja je nizak omjer struja u stanju vođenja i nevođenja, zbog nepostojanja zabranjenog pojasa u grafenu. Zabranjeni pojas se može stvoriti i proširiti slaganjem grafenskih traka debljine do oko 5nm jednu na drugu i lokalnim djelovanjem električkog polja. Unatoč tome omjer struja ostaje malen, što je glavna zapreka upotrebi takvih tranzistora u logičkim sklopovima.

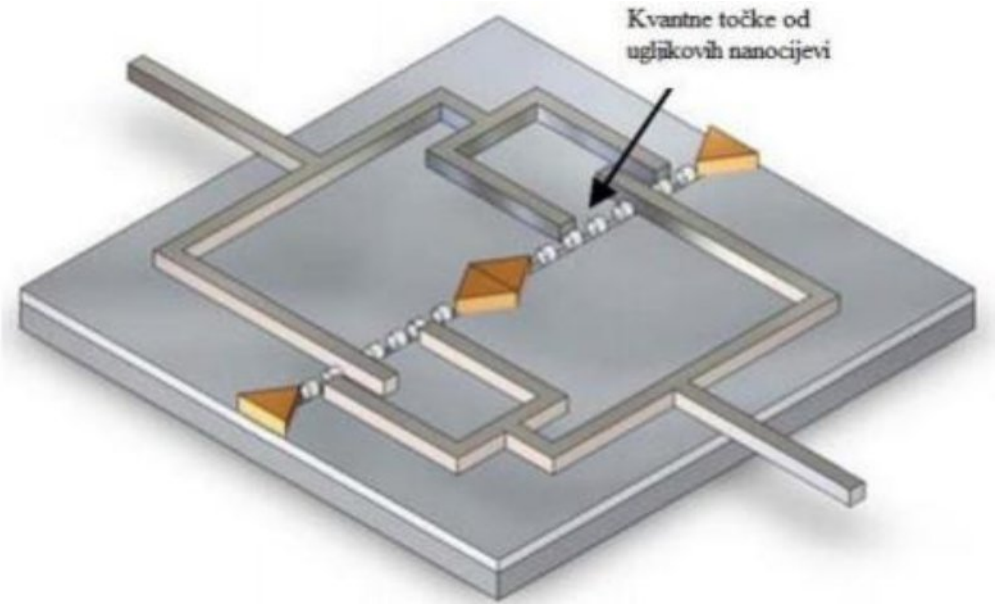


Slika 18. Tranzistor od grafenskih nanotraka sa efektom polja

Izvor:
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Primjena_nanomaterijala_u_optici_i_elektronici.pdf, (25.07.2016.)

6.1.4. Jedinice za pohranu podataka

Nova istraživanja iz područja nanotehnologije, radi iznimne važnosti memorije u računalima koncentriraju se na proučavanje kvantnih svojstva nanomaterijala i nanostruktura, pomoću kojih bi se mogle izrađivati brže i manje jedinice za pohranu podataka. Proučavaju se efekti kvantizacije i Kolumbove barijere u uređajima s jednim elektronom, te kvantne točke, žice i bunari. Za korištenje kvantnih računala predviđa se memorija od samog jednog atoma ili čak memorija od jednog fotona. Posebno su zanimljive memorije koje bi koristile tehnologiju tranzistora sa jednim elektronom. Memorijska ćelija bi se sastojala od stotinjak tranzistora sa jednim elektronom, čije bi se stanje čitalo pomoću pojačala građenog od tranzistora s efektom polja. Takav koncept zahtijeva periodično osvježenje stanja isto kao kod klasičnih memorijskih jedinica. Takve memorijske ćelije mogle bi dostići gustoću i do 100Gbit/cm^2. Prema drugom konceptu današnje tehnike magnetskog snimanja podataka, mogle bi biti zamijenjene tehnikama elektrostatskog pohranjivanja podataka, prema tome bi se za pisanje i čitanje koristili uređaji skenirajućeg, tunelirajućeg mikroskopa kojem bi se na vrhu nalazio tranzistor sa jednim elektronom. Na takav bi se način postigla gustoća od čak 1Tbit/cm^2.



Slika 19. Memorijska ćelija građena od kvantnih točaka od ugljikovih nanocijevi

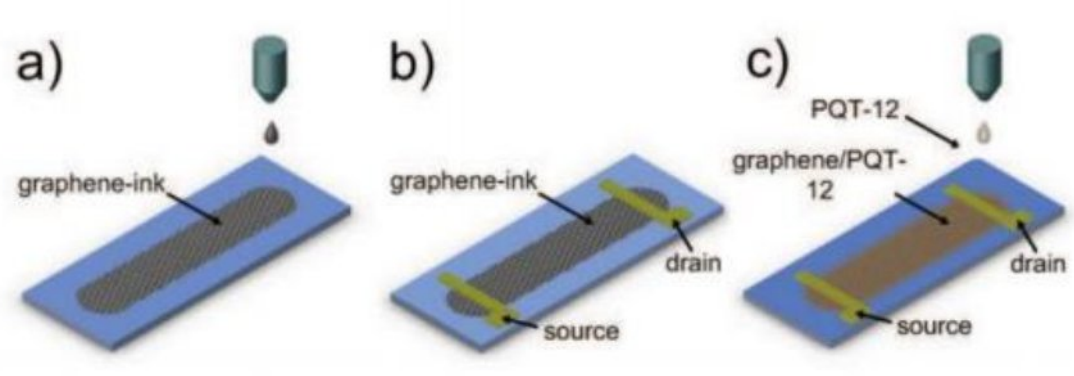
Izvor:
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Primjena_nanomaterijala_u_optici_i_elektronici.pdf, (27.07.2016.)

Istraživači sveučilišta u Houstonu otkrili su da memorijske ćelije izrađene od grafena, imaju peterostruko veću gustoću zapisivanja podataka od flash memorija, u radu troše manje energije i traju duže. Veličina memorijske ćelije izrađene od grafena za pohranu jednog bita iznosi manje od 10nm, dok kod flash memorijskih čipova iznosi 45nm. Memorija bazirana na grafenu radi u rasponu temperatura od -75 do preko 200^{o}C bez neželjenih efekata što je čini pogodnom za korištenje u industrijskim uvjetima ili čak na samoj jezgri procesora. Nakon 20000 ciklusa zapisivanja podataka memorija nije pokazala vidljive znakove degradacije, otporna je na radijaciju, te se može koristiti u nuklearne svrhe ili u svemirskim letjelicama.

6.1.5. Printanje elektroničkih uređaja

Istraživači sveučilištu u Cambridge-u proizveli su tintu na bazi grafena, koristili su je za printanje vrlo učinkovitih prozirnih tranzistora i međusobnih veza (slika 20.). Njihov rad bi mogao voditi do fleksibilnih displaya, solarnih ćelija i elektroničkog papira. Znanstvenici su tretirali grafitne pahuljice u zvučnoj kupki kako bi proizveli tintu, a nakon toga se uzorak

centrifugirao kako bi se izdvojile pahuljice veće od 1μm u promjeru kako se ne bi začepila mlaznica.



Slika 20. Prikaz tinte na bazi grafena

Izvor:
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Ugljikovo_doba/Grafen_i_njegove_primjene.pdf, (28.07.2016.)

6.1.6. Optička komunikacija potpomognuta grafenom

Istraživači iz Graphene Flagshipa publicirali su studiju [4] koja dokazuje kako grafeni mogu dati jednostavno rješenje za silicij fotodetektor u telekomunikacijskim valnim duljinama i to se smatra važnim korakom u integraciji grafena u silicijsku fotoniku. Studija je objavljena u Nano Lettersu[4] i nastala je kao rezultat uzbudljivog istraživanja između Sveučilišta Cambridge (UK), Hebrejskog sveučilišta (Izrael) i John Hopkins Sveučilišta (SAD).

Glavna misija Graphene Flagshipa je prevesti grafen iz akademskih laboratorija, preko industrije u društvo. Ovaj ambiciozan i pomalo širok cilj je bio na čelu svih izbora prilikom usmjeravanja Flagshipa, usredotočen je na područja pravih problema gdje se može napraviti prava razlika kao što je slučaj u optičkoj komunikaciji.

Optičke komunikacije su sve važnije jer imaju potencijalno rješenje za jedno od najvećih problema današnjice, a to jest potrošnja energije. Gotovo sve što radimo u svakidašnjem životu zahtjeva informacije, a sve informacije napajaju se energijom. U slučaju da trebamo

[4] *Nano Letters* je mjesečni recenzirani znanstveni časopis koji izdaje American Chemical Society

sve više i više informacija, isto tako trebamo i sve više i više energije. U bliskoj budućnosti, glavni potrošači podatkovnog prometa bit će komunikacija preko uređaja i Internet stvari[5].

Da bi se omogućile Internet stvari i razina informacija koje zahtijeva, trenutna silicijska fotonika ima problem: treba deset puta više energije nego što se može dati. Dakle, ako želimo ovu novu, poboljšanu dob interneta, treba pronaći novo, tehnološko, energetsko učinkovito rješenje. To je razlog zašto je optička komunikacija na bazi grafena tako važna.

Tijekom posljednjih nekoliko godina, optička komunikacija je povećala svoju održivost u odnosu na standardnu, na metalu baziranu, elektroničku povezivost. Sadašnji fotodetektor baziran na siliciju koji se koristi u optičkim komunikacijama ima veliki problem kada je u pitanju otkrivanje podataka u blizini infracrvenog raspona koji se koristi za telekomunikacije. Telekomunikacijska industrija nastoji riješiti ovaj problem integrirajući apsorbere s germanijem sa standardnim silicij fotoničkim uređajima. Oni su bili u mogućnosti da u potpunosti riješe funkcioniranje uređaja na čipovima koji koriste ovaj proces, međutim taj postupak je kompleksan.

Profesor Andrea Ferrari iz centra Cambridge Graphene, tehnički direktor i predsjednik Upravnog vijeća za Graphene Flagship izjavio je: „Ovo je važan rezultat koji dokazuje da se grafen može natjecati s trenutnim stanjem tehnike, proizvodeći uređaje koji se mogu proizvoditi jednostavnije, jeftinije i koji mogu raditi na različitim valnim duljinama. Tako utirući put za integraciju grafena u silicijskoj fonotici".

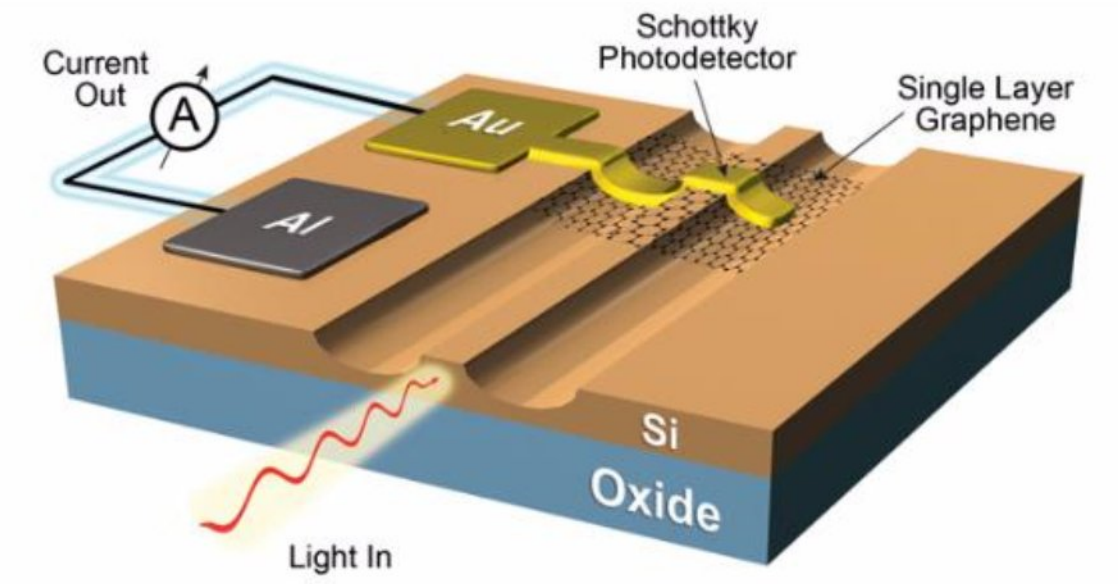
Dr. Ilya Goykhman, sa Sveučilišta Cambridge, i glavni autor te studije, rekao je; "Glavna vizija za grafen je da odigra važnu ulogu u omogućavanju optičke komunikacijske tehnologije. Ovo je prvi korak ka tome, a u iduće dvije godine cilj Flagshipa je da to omogući."

Dosad je potvrđeno da grafen može nadjačati postojeći silicij u fotonici u smislu potrošnje energije. Identificirana je vizija u kojoj je grafen okosnica za prijenos podataka i planira se telekomunikacijska banka sposobna za prijenos 4x28GB/s do 2018. Istraživanje objavljeno u časopisu Nano Letters [4] prvi je korak prema ostvarenju te vizije, čiji je značaj jasno

[5] Internet stvari (engl. Internet of things) označava povezivanje uređaja putem interneta

prepoznat od strane tvrtke kao što su Ericsson i Alcatel-Lucent koji su se pridružili Flagshipu kako bi im pomogli u ostvarenju vizije.

Dosad je pokazan potencijal za detektor, ali isto tako je potrebno proizvesti modulator baziran na grafenu kako bi se ostvario nisko energetski optički telekomunikacijski sustav, te se u sklopu Flagship-a marljivo radi na rješavanju tog problema.



Slika 21. Ilustracija fotodetektora sa grafenom

Izvor: [4]

7. ZAKLJUČAK

Elektronička industrija je jedna od najvećih industrijskih grana i pod izuzetno velikim je pritiskom i izazovom da postigne svake godine što bolje rezultate. Teži se minimizaciji, kvaliteti, količini memorijskog prostora, brzini, atraktivnosti i smanjenu cijena, što dovodi do toga da elektronička industrija mora kontinuirano rasti kako bi opstala, te zadovoljila kupce. Današnji zahtjevi sve su veći, pa je povećanje skalabilnosti neophodno, a primjenom grafena u elektroničkim uređajima nazire se ta mogućnost.

Moore-ov zakon kaže kako se broj tranzistora u integriranom krugu udvostručuje svake dvije godine. Kako se veličina tranzistora svake godine smanjuje približavamo se fizikalnoj granici, pa se traži alternativa standardnoj elektronici zasnovanoj na siliciju.

Tu dolazi na scenu grafen, materijal koji u odnosu na druge poluvodičke materijale ima velike prednosti, a to su njegova nevjerojatno velika brzina sto ga odlikuje za visokofrekvencijske primjene, najtanji je materijal debljine samo jednog atoma, jedan sloj grafena je 200 puta jači od željeza, može se rastegnuti 20%, provodi struju bolje od bakra, provodi toplinu bolje od bilo kojeg materijala, struktura grafena omogućuje 97,7% protok svjetlosti, toliko je gust da niti jedan atom ne može proći i veoma je otporan na kiseline.

Postoje razne mogućnosti primjene grafena a najvažnija područja bi bila elektronička industrija, računalna tehnologija, energetika, komunikacijske tehnologije i medicina.

Prije nego grafen integriramo u područja u kojima smatramo da će briljirati, proći će još puno vremena na razumijevanje onoga što ga čini tako specifičnim. Ideja za potencijalne primjene i koristi grafena je mnogo, te treba vremena da se u potpunosti spozna što grafen stvarno je, u cilju razvoja ideje u stvarnost.

Popis literature:

[1] Biljanović, P.: Poluvodički elektronički elementi , Školska knjiga, Zagreb, 2004.

[2] Bušić, B., Tomić, M., Vujević, R.: Ugljikovo doba – nanostrukture ugljika: klasifikacija, Zagreb, siječanj 2016.

[3] Delbianco, L., Haznadar, Z.,: „Nanotehnologija i etika“, Techne, Politehnika Pula, 2012.

[4] Goykhman I., et al., On-chip integrated, silicon-graphene plasmonic Schottky photodetector, with high responsivity and avalanche photogain. Nano Letters. 2016, 16 (5), pp 3005–3013

[5] Grbac Babić, S.: „Mogućnost primjene grafenske nanotehnologije u izradi tranzistora“, Techne, Politehnika Pula, 2012.

[6] Haznadar, Z.: Mogućnosti primjene nanotehnologije u elektronici, FER, Zagreb, 2004.

[7] Jaeger, R.C., Blalock, T.N.: Microelectronic Circuit Design, 4th ed. McGraw-Hill, 2011.

[8] Juzbašić, B.: Elektronički elementi, Školska knjiga, Zagreb, 1984.

[9] Lindsay, S.M.: Introduction to Nanoscience;Oxford University Press; 2010.

[10] Millman, J., Grabel, A.: Microelectronics, 2nd edition, McGraw-Hill, 1987.

[11] Raos, N.: Nove slike iz kemije, priručnik kemije u nastavi, Školska knjiga, Zagreb, 2004.

[12] Šiber, A.: Svemir kao slagalica, Školska knjiga, Zagreb, 2005.

[13] Weinstock, C., Goodenough, J. On System Scalability, Performance-Critical Systems. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania Technical Note, March 2006

Internet izvori:

[14] http://eskola.hfd.hr/clanci/Grafenska_zemlja_cudesa_M_Kralj.pdf

[15] https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Ugljikovo_doba_Nanostrukture_ugljika-klasifikacija.pdf

[16] https://www.fer.unizg.hr/download/repository/NANOTEHNOLOGIJA_U_SPORTU.pdf

[17] http://www.bug.hr/vijesti/ibm-nanocijevi-oscilatoru/71587.aspx

[18] http://znanost.geek.hr/clanak/rjesenje-elektronike-grafena-moglo-bi-se-skrivati-u-vodi/, 22.06.2016.

[19] https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Ugljikovo_doba-Grafen_i_njegove_primjene.pdf, 22.06.2016.

Popis slika

Slika 1. Prikaz atoma silicija u obliku (a) prostorne rešetke i (b) ravninske rešetke.....5

Slika 2. Prekinuta kovalentna veza u kristalu silicija.....6

Slika 3. Rešetka kristala silicija: (a) unesene trovalentne nečistoće za tvorbu p tipa poluvodiča, (b) unesene peterovalentne nečistoće za tvorbu n tipa poluvodiča.....7

Slika 4. Dijagram energetskih razina u izolatorima, poluvodičima i vodičima.....9

Slika 5. Prikaz Moore-ovog zakona.....10

Slika 6. Prikaz veličine i memorije čipa u periodu od 2005. do 2014. godine.....11

Slika 7. Alotropske modifikacije ugljika i njihova svojstva.....14

Slika 8. Grafen.....16

Slika 9. Molekularna struktura grafena.....17

Slika 10. Prikaz grafena kao beskonačne ravnine.....18

Slika 11. Valovitost grafena.....19

Slika 12. Ugljična nanocijev.....21

Slika 13. Jednostjenčana nanocjevčica.....23

Slika 14. Višestjenčana ugljikova nanocjevčica.....24

Slika 15. Stvaranje struje u kontaktu sa svjetlom.....26

Slika 16. Savitljivi ekran i e-papir.....27

Slika 17. Tranzistor od ugljikovih nanocijevi s efektom polja.....31

Slika 18. Tranzistor od grafenskih nanotraka sa efektom polja.....32

Slika 19. Memorijska ćelija građena od kvantnih točaka od ugljikovih nanocijevi.....33

Slika 20. Prikaz tinte na bazi grafena.....34

Slika 21. Ilustracija fotodetektora sa grafenom.....36