

Grafen-materijal budućnosti

Petohleb, Toni

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka / Sveučilište u Rijeci**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:231:524445>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka University Studies, Centers and Services - RICENT Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
Studij politehnike

Preddiplomski sveučilišni studij politehnike

Toni Petohleb
Grafen-materijal budućnosti
Završni rad

Mentor: Doc. Dr.sc., Mateja Šnajdar Musa

Rijeka, 2022.

UNIVERSITY OF RIJEKA
School of Polytechnics

Undergraduate study of Polytechnics

Toni Petohleb
Graphene-material of the future
Bachelor thesis

Supervisor: Doc. Dr.sc. Mateja Šnajdar Musa

Rijeka, 2022

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojim roditeljima Edvinu i Ljiljani koji su mi omogućili studiranje, imali toliko strpljenja oko mojih zaostataka te nikad nisu odustali sa svojom podrškom. Nadalje zahvaljujem se svojoj sestri Tijani koja mi je također mnogo pomogla. Zahvaljujem se također svojoj djevojci Ivi koja me cijelo vrijeme motivirala i tjerala da studij privedem kraju, te svojim kolegama i kolegicama koji su uvijek bili spremni pomoći.

Na kraju se puno zahvaljujem svojoj mentorici doc.dr.sc. Mateji Šnajdar Musa, koja je drugu godinu zaredom pristala biti moja mentorica. Također je imala puno strpljenja te mi je puno pomogla pa sam joj na tome iznimno zahvalan.

Toni Petohleb

SVEUČILIŠTE U RIJECI
STUDIJ POLITEHNIKE

Povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Sveučilište u Rijeci, Odsjek za politehniku	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. Broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Pristupnik: Toni Petohleb

Mat.broj: 9998000565

Naslov: Grafen-materijal budućnosti

Opis zadatka: Pregledom literature utvrditi razvojni put grafenskih materijala i njihovog spektra u tehnici. Analizirati specifičnosti strukture i satava te načina na koji modificiraju svojstva ove nove vrste materijala. Predstaviti pregled trenutnih istraživanja ove skupine materijala i njihovog potencijala za buduću primjenu u raznim proizvodnim područjima.

Zadatak zadao: Mateja Šnajdar Musa

Rok predaje rada:

Predsjednik povjerenstva:

Doc.dr.sc. Damir Purković

SVEUČILIŠTE U RIJECI
Studij politehnike
Rijeka, 18.02.2022.

Zadatak za završni rad

Pristupnik: Toni Petohleb

Naziv završnog rada: Grafen-materijal budućnosti

Naziv završnog rada na eng. jeziku: Graphene – material of the future

Sadržaj zadatka:

Pregledom literature utvrditi razvojni put grafenskih materijala i njihovog spektra primjene u tehnici. Analizirati specifičnosti strukture i sastava te načina na koji modificiraju svojstva ove nove vrste materijala. Predstaviti pregled trenutnih istraživanja ove skupine materijala i njihovog potencijala za buduću primjenu u raznim proizvodnim područjima.

U završnom zadatku treba slijediti Upute o izradi završnog rada.

Mentor: Doc. dr.sc. Mateja Šnajdar Musa




(potpis mentora)

Voditelj za završne radove



Zadatak preuzet: datum 14.3.2022.



(potpis pristupnika)

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS DIJAGRAMA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. RAZVOJNI PUT GRAFENA	2
2.2. Metode proizvodnje grafena.....	3
2.3. Svojstva grafena	6
3. PRIMJENA GRAFENSKIH MATERIJALA	11
3.1. Energija	11
3.1.1. Baterije	11
3.1.2. Superkondenzatori.....	13
3.2. Elektronika	13
3.3. Senzori i biomedicina.....	15
3.4. Prevlake i kompoziti.....	16
4. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA.....	20
5. ZAKLJUČAK.....	25
LITERATURA.....	26

POPIS SLIKA

Slika 1. Izolirana izolacija grafena iz grafita.....	3
Slika 2. Postupak kemijske redukcije grafenova oksida	4
Slika 3. Najpoznatije alotropske modifikacije ugljika: dijamant, grafit i amorfni ugljen	6
Slika 4. Prikaz grafena kao jedna atomska ravnina grafita.....	7
Slika 5. Grafen: majka svih grafitiskih formi.....	8
Slika 6. Struktura grafena – struktura pčelinjeg saća	9
Slika 7. Razlike svojstava čestica u klasičnoj fizici, kvantnoj mehanici i kvantnoj elektrodinamici	10
Slika 8. Prednosti grafenske baterije.....	12
Slika 9. Savitljivi strujni krug na bazi grafena.....	14
Slika 10. Dijelovi teniskog reketa.....	18
Slika 11. Drška golf palice od grafenskih vlakana	19
Slika 12. Elektronska mikroskopija grafena na bakru(bijeli kvadrat u donjem desnom kutu dužine je jednog mikrometra).....	23

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba metoda proizvodnje grafena 5

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1. Ramanova spektroskopija jednoslojnog grafena	21
Dijagram 2. Ramanova spektroskopija višeslojnog grafena grafena	22

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
C*	Ms ⁻¹	Brzina svjetlosti
mC	kg	Ciklotronska masa

SAŽETAK

Grafen je u odnosu na druge, ranije poznate materijale, novi supermaterijal budućnosti. Prva asocijacija na materijal grafen je grafit, a grafit je materijal iz kojeg možemo dobiti ljuske grafena određenim postupcima. Grafen je materijal sa iznimnim električnim, toplinskim i mehaničkim svojstvima. Treba spomenuti da je ovaj novi supermaterijal još u fazi istraživanja te da su velike stvari tek pred grafenom. U ovom radu objašnjen je sam razvojni put ovog materijala budućnosti, njegova povijest, metode dobivanja grafena te njegova svojstva. Također je spomenuta njegova uporaba, a na kraju su predstavljena dosadašnja istraživanja te mogući potencijal u budućnosti koji je iznimno velik u različitim poljima. Nadamo se da će ovaj supermaterijal uistinu postati materijal budućnosti jer u dosadašnjim istraživanjima pokazuje mnogo svojih prednosti.

Ključne riječi: Grafen, supermaterijal, grafit, materijal budućnosti.

SUMMARY

Compared to other previously known materials, graphene is the new supermaterial of the future. The first association with the material graphene is graphite, and graphite is the material from which we can obtain graphene shells by certain procedures. Graphene is a material with exceptional electrical, thermal and mechanical properties. It should be mentioned that this new supermaterial is still under research and that great things are yet to come for graphene. This thesis explains the very development path of this material of the future, its history, methods of obtaining graphene and its properties. Its use was also mentioned, and at the end, the previous research and the possible potential in the future, which is extremely large in different fields, were presented. We hope that this supermaterial will truly become the material of the future, because in the researches that are done so far, it shows many of its advantages, while there are almost no disadvantages.

Keywords: Graphene, supermaterial, graphite, material of the future

1. UVOD

U današnjem ubrzanom i užurbanom vremenu, svjetska tehnologija žudi za novim, boljim i jeftinijim rješenjima. Upravo su ugljikove nanostrukture izvrstan primjer za to. Nekada se smatralo da se ugljik pojavljuje samo u obliku dijamanta, čađe ili grafena. Danas su poznate još dvije alotropske modifikacije ugljika, a radi se o ugljičnim nanocjevčicama i grafenu. Grafen može biti dobiven promjenom dimenzionalnosti strukture, to jest može se smanjiti jedna dimenzija te se dobija kvazi – dvodimenzionalni supermaterijal, grafen. Grafen je grafitni monosloj koji ima izvanredna svojstva. Njegova električna vodljivost, toplinska vodljivost te mehanička svojstva jednostavno ne mogu ostati nezamijećena. Odnos električnih svojstava između materijala budućnosti – Grafena i grafita je vrlo zanimljiv. Grafit je dobar izolator, dok sa druge strane imamo grafen koji ima bolju električnu vodljivost od srebra i bakra. Proizvodnja grafena iziskuje homogenu distribuiranost u različitim matricama, te proizvodnju grafena u velikim količinama. Grafit je jedini materijal koji je vrlo jeftin, a također je dostupan u velikim količinama, no grafit se vrlo teško ljušti u sitne grafenske slojeve, te je to uz sintezu grafena zasad najveći problem kod proizvodnje ovog supermaterijala. Nadamo se da će materijal budućnosti usprkos proizvodnim problemima imati veliku ulogu u raznim inženjerskim područjima, sa svojim izvanrednim svojstvima, mogao bi biti veliki plus za svijet tehnologije, medicine i ostale znanosti. Najveće zahvale idu dobitnicima Nobelove nagrade Andreu Geimu i Konstantinu Novoselovu bez kojih Grafen danas nebi bio toliko poznat. U ovom ću radu predstaviti povijest ovog supermaterijala, njegova glavna svojstva te dosadašnja istraživanja i potencijalnu uporabu u raznim područjima u budućnosti.

2. RAZVOJNI PUT GRAFENA

Grafen je materijal čiji sastav čine isključivo atomi ugljika koji su smješteni u dvodimenzionalnu heksagonalnu kristalnu rešetku. Površina makromolekule grafena može biti do nekoliko kvadratnih metara, dok je debljina takve makromolekule samo jedan atom, te se zbog toga grafen često naziva predstavnikom nove skupine materijala – 2D materijala.

Zbog jakih kemijskih veza između atoma ugljika grafen također ima jaku termodinamičku stabilnost. Kada je izložen zraku otporan je na kemijsku reakciju oksidacije. Grafen je specifičan materijal, električna vodljivost bolja je oko 1000 puta u odnosu na već dobro poznati materijal – bakar. Treba još spomenuti da grafen ima jaku dobru vodljivost topline te optičku prozirnost, kada se spomenu neka svojstva grafena tada postaje jasno zašto su znanstvenici Geim i Novoselov 2010. godine odnijeli Nobelovu nagradu za fiziku.

2.1. Povijest nastanka grafena

Nazvan materijalom budućnosti, grafen je prvi dvodimenzionalni nanomaterijal ikad. Grafen je dostupan u svakoj olovci i poznat je još od sredine prošlog stoljeća, no tek su ga 2004. godine izolirali dobitnici Nobelove nagrade, Andre K. Geim i Konstantin Novoselov. Grafen je atomski materijal te se sastoji od ugljikovih atoma koji su raspoređeni u šesterokutnu kristalnu rešetku. Promijenio je granice onoga što jedan materijal može učiniti, prvi je primjer dvodimenzionalnih atomskih kristala čija se površina s termodinamičkog stajališta dosta razlikuje od trodimenzionalnih objekata. Najveće je otkriće rekordna toplinska vodljivost te najveća gustoća struje koja je ikad izmjerena pri normalnoj, sobnoj temperaturi. Grafen je iznimno savitljiv, ima najmanju poroznost, te je jači od čelika. Uz sve ove prednosti, grafen je i najtanji poznati materijal na svijetu. Kada uzmemo u obzir sva ova zanimljiva svojstva navedenog materijala, grafen postaje vrlo popularan materijal u raznim područjima. Koristi se za kemijske modifikacije, a velika su očekivanja u području primjenjivosti u elektronici i kompozitnim materijalima.

Prvi je sloj dobiven ljuštenjem grafita sa vrha obične olovke pomoću ljepljive trake. Ova metoda dobivanja grafena nije zahtijevala velike troškove a ni skupu opremu, no ova metoda nije prikladna za sintezu grafena u industrijskoj primjeni. Veliki potencijal probudio je znanstvenike diljem svijeta, te danas imamo više metoda kojima se grafen može sinterizirati.

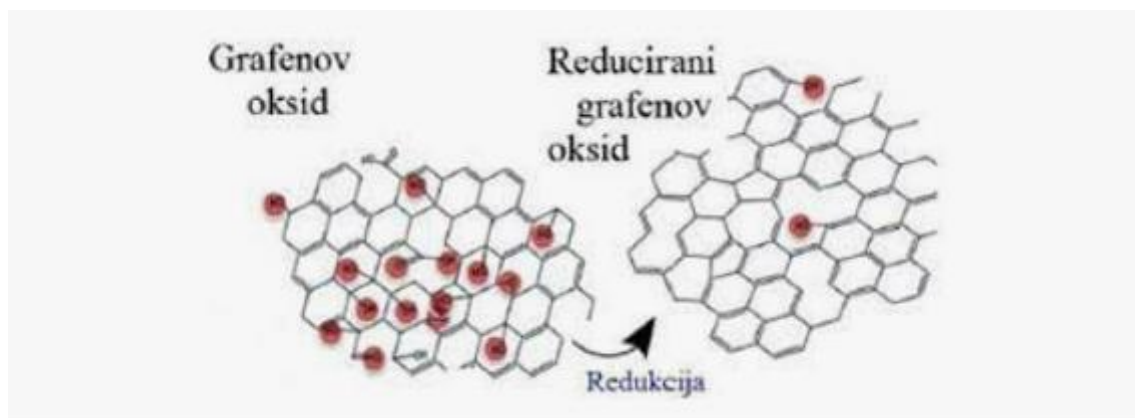
2.2. Metode proizvodnje grafena

Različiti su postupci proizvodnje grafena, složenosti postupaka proizvodnje razlikuju je od vrlo jednostavnih do vrlo zahtjevnih. Najjednostavnija je metoda koju smo ranije naveli, „Selotejp metoda“ je ujedno i najstariji postupak dobivanja grafena. Samoljepljiva traka prilijepe se uz površinu grafita te je potreban pritisak prstima po cijeloj površini kako bi adhezijski sloj trake bio u kontaktu s grafitnom podlogom. Tijekom uklanjanja samoljepljive trake sila adhezije dolazi do izražaja i guljenja pojedinih slojeva grafita. Taj odvojeni materijal koji se nalazi na samoljepljivoj traci je grafen, odnosno to su nepravilni komadići višeslojnog grafena ali i ljuske jednoslojnog grafena koje imaju vrlo visoku kvalitetu. Iako vrlo jednostavna, ova metoda se vrlo rijetko koristi iz razloga loše ponovljivosti.



Slika 1. Izolirana izolacija grafena iz grafita [1]

Kemijskom redukcijom grafenova oksida moguće je postići bolju ponovljivost. Da bi se proizveo grafenov oksid potrebno je proći proces kemijskog raslojavanja (deliminacije) grafita u vrućoj sumpornoj kiselini. Time dolazi do odvajanja ljuski grafena od matičnog komada grafita. Slijedi i oksidacija s OH, COOH, epoksidnim i drugim skupinama prilikom čega kontakt grafenovog oksida s vodom dovodi do disperzije. Pritom je na malu masu grafita potreban veliki volumen sumporne kiseline, kako se viskoznost disperzije značajno povećava tijekom raslojavanja. Slijedeći korak je nanošenje disperzije na odabranu površinu nakon uklanjanja sumporne kiseline. Ova površina mora biti presvučena grafenom. Potom slijedi faza sušenja. Zbog isparavanja otapala (voda) dolazi do sabijanja ljuski grafena. Pritom ne dolazi do nestajanja kemijskih veza, iako bi prilikom ponovnog kontakta s vodom došlo do ispiranja već formiranog sloja grafenova oksida. Redukcija grafenova oksida otopinom hidrazina ili askorbinske kiseline predstavlja zadnji korak ovog procesa. Ovdje dolazi do formiranja kemijskih veza između ljuski jednoslojnog grafena, kao i do uklanjanja funkcionalnih skupina. Kao rezultat gore napisanog nastaje kompaktni sloj grafena prilično velike površine. Opisanom metodom postiže se dobra ponovljivost praćena umjerenom složenosti proizvodnog procesa. Kao najveći nedostatak navodi se znatna koncentracija strukturnih defekata. Iz tog se razloga ova metoda koristi prilikom izrade materijala nižih razina tehnologije (kompozitni materijali i vodljive boje).



Slika 2. Postupak kemijske redukcije grafenova oksida [2]

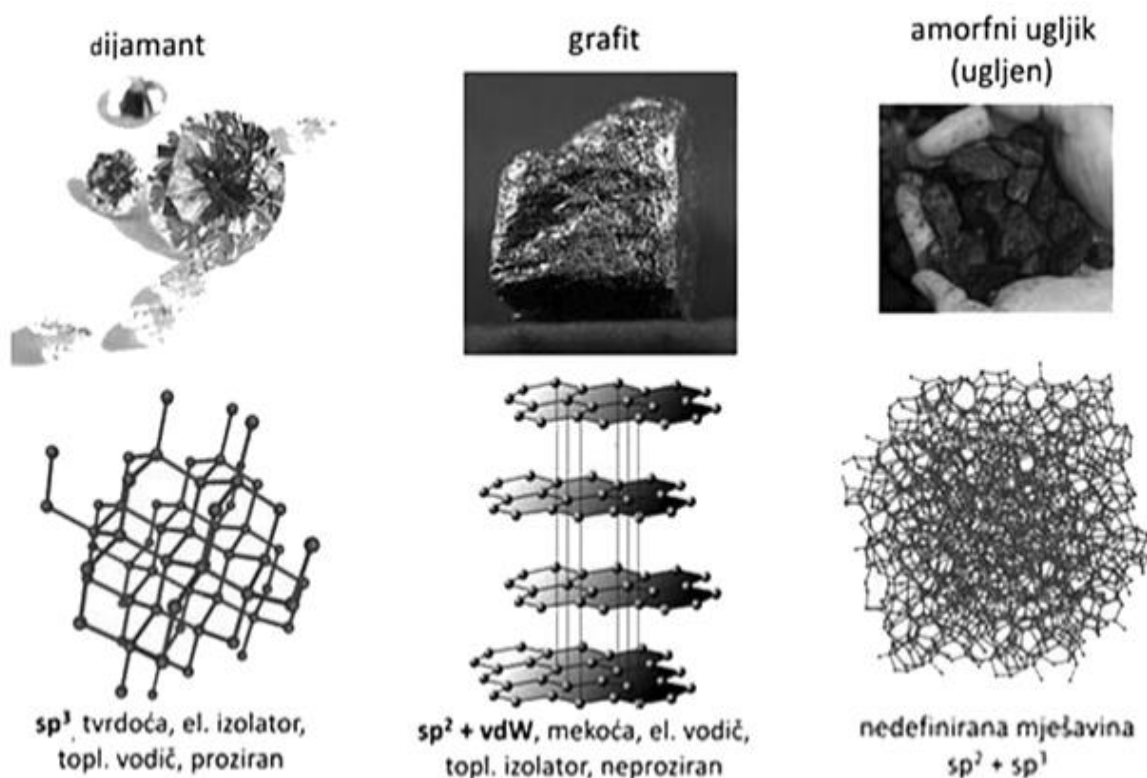
Kao tehnički najzahtjevnija metoda opisuje se metoda kemijske depozicije iz parne faze. Time se proizvodi jednoslojni i višeslojni grafen visoke kvalitete. Uz vrlo visoku temperaturu ovaj se proces izvodi u strogo kontroliranoj atmosferi uz pomoć metalnih katalizatora. Za višeslojni grafen se kao najčešći katalizator upotrebljava folija od nikla, dok je to za jednoslojni grafen folija od bakra. U oba se slučaja najčešće koristi metan u plinovitom stanju kao izvor ugljika. Prilikom kontakta bakra i molekule metana na visokoj temperaturi dolazi do dezintegracije molekule metana. Tom prilikom vodik difuzijom izlazi izvan reakcijske zone, dok za površinu metala ostaje vezan atom ugljika. Kako proces dezintegracije pogađa više molekula metana dolazi do rasta jednoslojnog grafena, a samim time i pokrivanja sve veće površine metalnog katalizatora. Kad jednoslojni grafen u potpunosti prekrije katalizator dolazi do obustavljanja postupka sinteze. Kako je ugljik lošiji katalizator od bakra, prilikom kontakta s grafenom molekula metana ostaje cjelovita. Zatim slijedi hlađenje na sobnoj temperaturi, uklanjanje bakra kemijskim jetkanjem te prijenos grafena na proizvoljni supstrat.

Tablica 1. Usporedba metoda proizvodnje grafena [3]

	Eksfolijacija grafita³	Kemijska delaminacija i redukcija grafenova oksida⁵	Kemijska depozicija iz parne faze⁶
Kvaliteta proizvedenog grafena	vrlo visoka	loša	visoka
Mogućnost proizvodnje jednoslojnog grafena	da, s poteškoćama	ne	da
Skalabilnost	ne	da	da
Maksimalna veličina uzorka	približno 100 μm^2	proizvoljna	7,5 m^2
Proizvodna cijena	-	< 0,1 USD / cm^2	< 1 USD / cm^2
Složenost proizvodnje	niska	umjerena	vrlo visoka

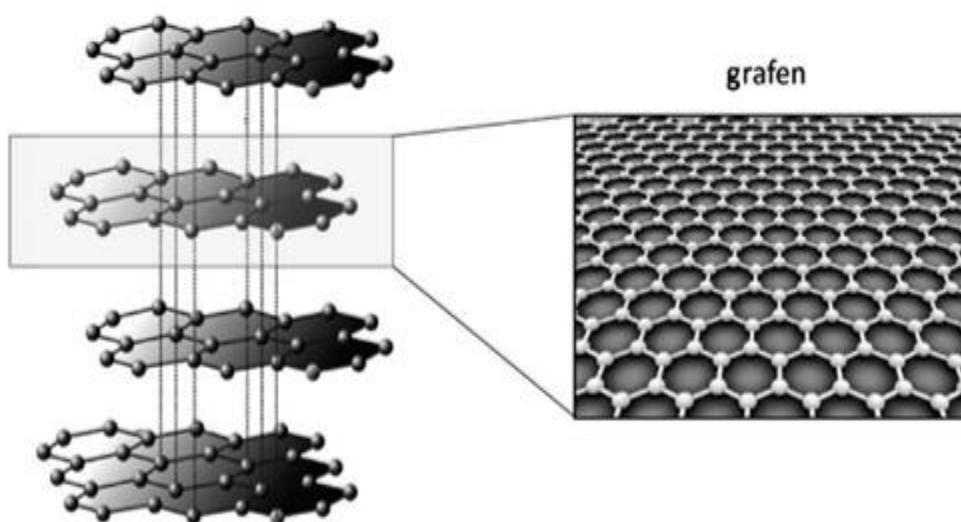
2.3. Svojstva grafena

Kako bismo bolje razumjeli grafen i njegova svojstva, potrebno se dotaknuti atoma ugljika. Jezgra ugljika se sastoji od 6 protona, a njegov omotač od 6 elektrona. Osobiti je značaj ugljika kao baze organskih molekula i života. Ovisno o kojem se izotopu ugljika radi, razlikuje se i broj neutrona u jezgri. Ugljik se u elementarnom obliku manifestira kroz alotropske modifikacije, od kojih su najpoznatije grafit, amorfni ugljik (ugljen) i dijamant. Kod različitih alotropskih modifikacija uočavaju se i znatno različita svojstva. Govoreći o električnoj i termalnoj vodljivosti, tvrdoći te optičkim svojstvima potpuno različita svojstva pokazuju posebno dijamant i grafit. [3]



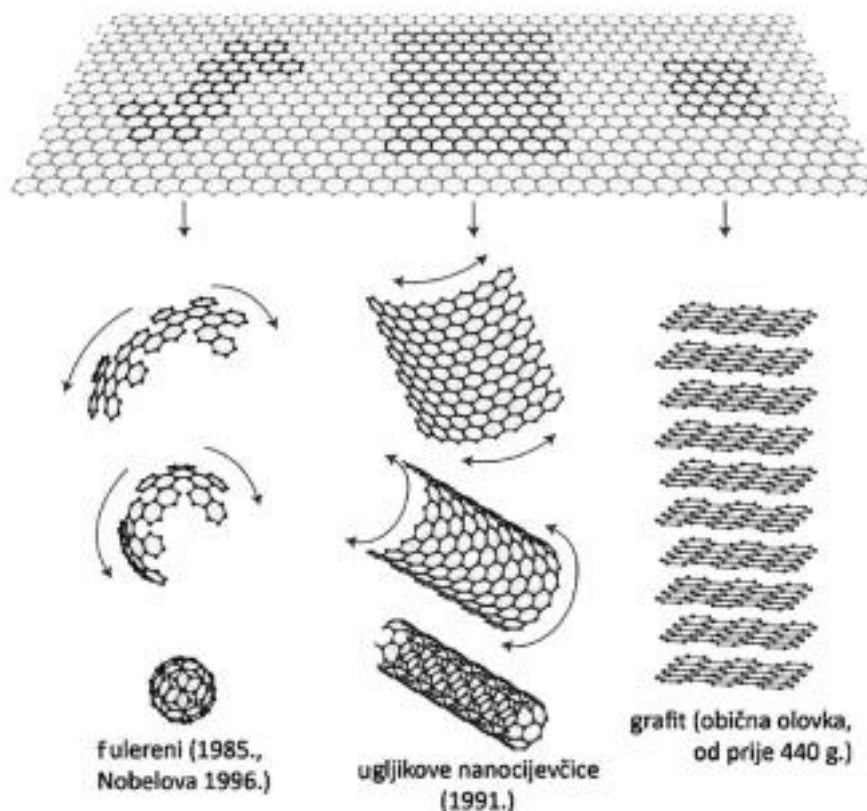
Slika 3. Najpoznatije alotropske modifikacije ugljika: dijamant, grafit i amorfni ugljen [3]

Sredinom je prošlog stoljeća u teorijskom modeliranju svojstava grafita korištena je samo jedna atomska ravnina, što nas vodi do pojednostavljene definicije grafena kao jedne atomske ravnine grafita (Slika 4.).



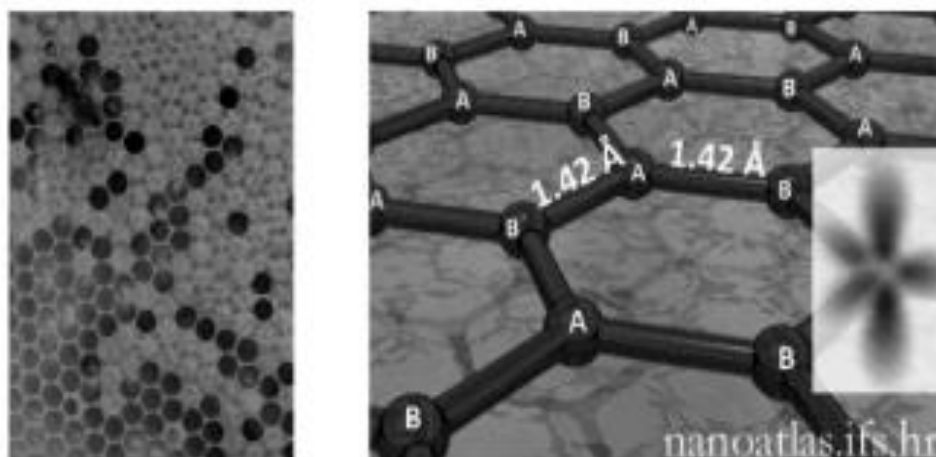
Slika 4. Prikaz grafena kao jedna atomska ravnina grafita [3]

Nekoliko desetljeća prije otkrića grafena dolazi do otkrića fulerena i ugljikovih nanocijevčica. Iako između grafena i navedenih formi postoji značajna strukturna povezanost, grafen se pokazao mnogo bolji i posebniji od drugih materijala.



Slika 5. Grafen: majka svih grafitских formi [3]

Struktura koju tvori grafen struktura je pčelinjeg saća. Prostorni raspored atoma određuje sp^2 hibridizirano stanje ugljikovog atoma. Tom prilikom dolazi do hibridiziranja tri od četiri valentna elektrona u „ σ “ orbitale. Kut koji navedene orbitale tvore u ravnini je kut od 120° . Četvrti, nespareni elektron smješten je okomito na ravninu. Ovaj način vezivanja predstavlja najjaču poznatu kemijsku vezu i samim time čini grafen najčvršćim poznatim materijalom.



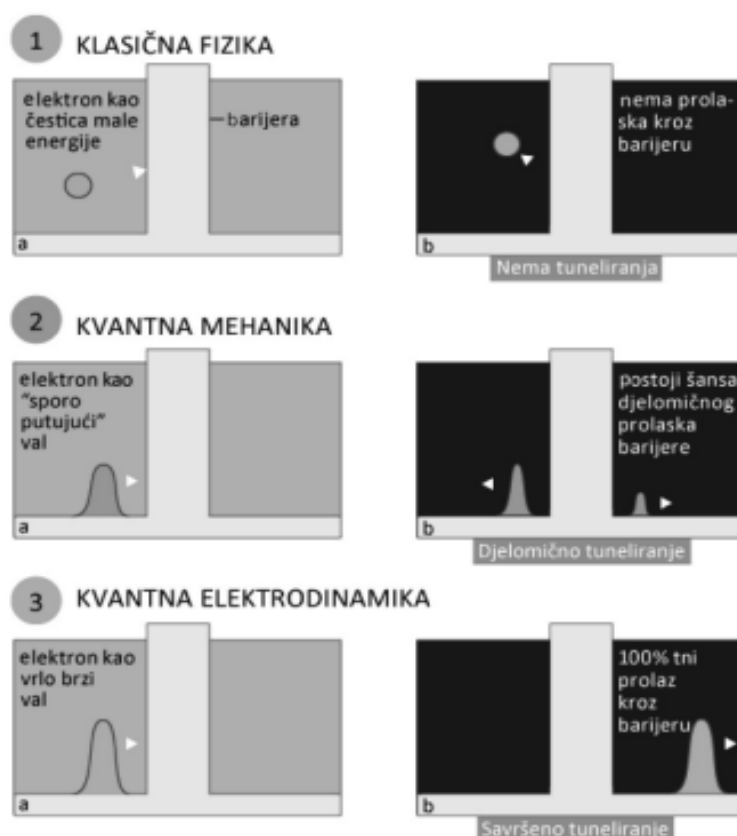
Slika 6. Struktura grafena – struktura pčelinjeg saća
Udaljenost između atoma ugljika iznosi 1.42 Å [3]

Govoreći nadalje o svojstvima grafena bitno je naglasiti da je on gotovo proziran. Kada opisujemo svojstva grafita, u odnosu na dijamant koji je jednako tako jedna od alotropskih modifikacija ugljika, vrlo je očigledno da on nije proziran. Procesom stanjivanja grafita do svega nekoliko grafenskih slojeva, on postaje poluproziran. Jedan soj, grafen, reflektira oko 5 % upadne svjetlosti, a propušta negdje oko 95 % svjetlosti.

Iako se ovo svojstvo povezuje uglavnom sa električnim izolatorima, u ovom se slučaju radi o odličnom vodiču, dapače najbolje poznatom električnom vodiču. Dobra svojstva grafena pokazuju se na sobnoj temperaturi: savršeno tuneliranje, velika mobilnost elektrona, kvantni Hall efekt, Andreeva refleksija, itd. Pritom ga nije potrebno izlagati visokim tlakovima ni hladiti tekućim helijem. To čini grafen idealnim materijalom, bez osiguravanja uvjeta za funkcioniranje, a samim time i bez dodatnih troškova.

Na slici 7. prikazane su razlike u svojstvima čestica u klasičnoj fizici, kvantnoj mehanici i kvantnoj elektrodinamici. Grafen je zaista poseban materijal koji se i na ovom polju ističe. U grafenu π elektroni, najznačajniji elektroni koji određuju fizikalna svojstva materijala, pokazuju takve karakteristike koje do sada nisu primijećene u kristalima. Ti se elektroni kreću brzinom svjetlosti, poput neutrina ili fotona, odnosno ponašaju se kao da im je masa nula. Elektroni su u grafenu zbog svojih karakteristika, ponajprije zbog brzine, dobili novu kvalitetu.

Ovdje ne govorimo konceptu klasične fizike ili kvantne mehanike, kod grafena je potrebno primijeniti metodu kvantne elektrodinamike. Iako elektroni u grafenu nemaju dovoljnu količinu energije uspoređujući ih sa visinom potencijalnog zida, π elektroni sa lakoćom savladavaju tu prepreku. Kod takvih se čestica, čija je brzina približna brzini svjetlosti, primjenjuju jednadžbe kvantne elektrodinamike. [2]



Slika 7. Razlike svojstava čestica u klasičnoj fizici, kvantnoj mehanici i kvantnoj elektrodinamici [3]

3. PRIMJENA GRAFENSKIH MATERIJALA

Zbog svojih izvanrednih svojstava kao što su neprobojnost, čvrstoća, odlična električna i toplinska vodljivost, izrazito mala debljina, rastezljivost, prozirnost i nereaktivnost prava primjena grafena se tek očekuje. Grafen se smatra materijalom koji će unaprijediti mnoge proizvode. Spomenut ćemo neke od poznatih njegovih primjena.

3.1. Energija

Posebno se svjetla budućnost primjene grafena očekuje na područjima koja se tiču energije. Ovim bi se supermaterijalom unaprijedila brzina punjenja, kao i energetska kapacitet baterija. Isto tako ističe se i značajno bolji kapacitet u pohrani energije, kao i poboljšanje katalizatora.

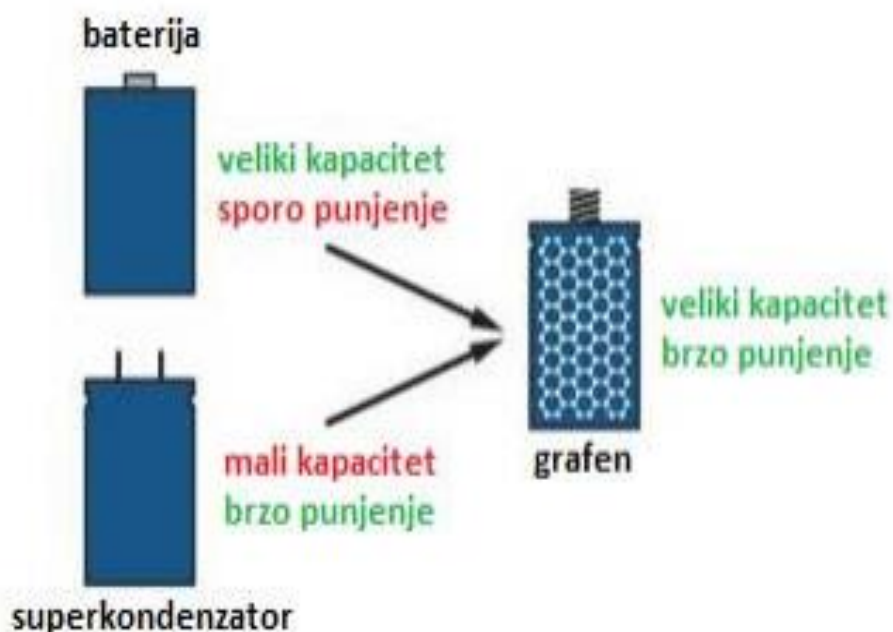
3.1.1. Baterije

Kad je riječ o baterijama bitno se dotaknuti velikog tehnološkog napretka na tom polju. Razvojni put kreće od prvih baterija (Voltin stup), preko prvih komercijalnih i energetski neučinkovitih baterija pa sve do današnjih, prihvatljivo energetski učinkovitih baterija.

Struktura grafenskih baterija slična je kao u onih konvencionalnih, radi se o dvije elektrode i otopini elektrolita kako bi se olakšao prijenos iona. Temeljna razlika između ovih baterija nalazi se u jednoj ili obje elektrode. Iako je ugljikove alotrope moguće koristiti i na anodi, promjena je prije svega na katodi. Kod konvencionalne se baterije katoda sastoji od čvrstih materijala. Kod grafenskih baterija nailazimo na sastav kompozitnog hibridnog materijala, točnije čvrstog metala i grafena. Performanse postojećih baterija poboljšavaju se dodavanjem grafena.

Ovdje je bitno spomenuti Li-ionske baterije, koje već pokazuju prednosti uspoređujućih sa običnim baterijama. Njihova je primjena danas mnogostruka: prijenosna računala, mobilni telefoni i druga prijenosna elektronska računala. Dodavanjem grafena Li-ionskim baterijama značajno bi unaprijedilo njihova svojstva i time postiglo veću električnu vodljivost, veći kapacitet i bolju kemijsku postojanost. Zbog dobre vodljivosti grafena i smanjenog zagrijavanja unutar elektrode može se osigurati rad baterije na nižim temperaturama i time unaprijediti njenu sigurnost. Upotrebom grafena na ovom polju postiže se brži ciklus punjenja baterije s mogućnosti većeg skladištenja energije i sve to po pristupačnijoj cijeni.

Na slici 8. prikazane su prednosti grafenske baterije: veliki kapacitet i brzo punjenje.



Slika 8. Prednosti grafenske baterije [4]

3.1.2. Superkondenzatori

Kondenzatori pripadaju skupini uređaja za pohranu energije, a nazivaju se i elektrokemijski kondenzatori. Kao temeljni nedostatak kondenzatora ističe se mala količina energije koja se može pohraniti. Zbog svojih izvanrednih svojstava grafen je jedan od materijala koji se istražuje u svrhu poboljšanja svojstava superkondenzatora. Time bi se omogućilo skladištenje velikih količina energije uz istovremenu upotrebu malih količina uspoređujući ih sa konvencionalnim uređajima. Ne samo da bi se time unaprijedila količina pohranjene energije, već bi to zbog veoma male mase grafena značilo i značajno manju masu npr. prijevoznih sredstava kao što su automobili ili avioni, a samim time uštedu goriva. Također bi se primjena grafena mogla očekivati u pohrani energije vjetra, kao i sunčeve energije. Grafen u kontaktu sa svjetlom stvara električnu energiju. Pogođeni nekom vrstom svjetla elektroni u molekuli grafena prime dovoljno energije i počnu strujati, a ugljik ispod njih istovremeno ostaje hladan. Grafen bi na taj način solarnim ćelijama zamijenio platinu, mnogostruko skuplji element, zahvaljujući svojoj sposobnosti provođenja svjetla.

3.2. Elektronika

Zbog svojih superiornih svojstava grafen je prikladan materijal za izradu nove generacije elektronskih uređaja i dijelova, odnosno materijala naprednih elektronika.

Značajan utjecaj na području elektronike ima nanotehnologija, posebno na polju minijaturacije i mikroelektronike gdje se proučavaju i izrađuju komponente malih veličina kao što su kondenzatori, tranzistori, diode. Najviše obećava primjena grafena u proizvodnji tranzistora, detektora i regulatora topline. Dosad korišteni tranzistori na bazi silicija koji su još uvijek u upotrebi vremenom dosežu svoje fizikalne granice i dolazi do potrebe za novim materijalom. Tranzistori na bazi grafena mogući su i potencijalni nasljednici postojećih tranzistora, budući da elektroni brže putuju kroz grafen u odnosu na silicijev dioksidi i ti bi tranzistori bili značajno brži od sadašnjih. Iako mnogo toga govori u prilog grafenu, još je uvijek potrebno daljnje istraživanje na tom polju da bi se savladale moguće prepreke kao što je pojasni razmak da bi takav tranzistor funkcionirao.

Jedno vrlo interesantno polje na području elektronike predstavlja savitljiva elektronika bez prekida protoka struje. Elektronički uređaji su obično kruti i ne podliježu savijanju. Na slici 8 prikazana je budućnost savitljive elektronike, gdje se kao supstrat upotrebljava papir, a strujni krug na bazi grafena predstavlja konduktor. Prilikom savijanja supstrat ostaje čitav, a strujni krug se ne prekida. [4]



Slika 9. Savitljivi strujni krug na bazi grafena [4]

Osim savitljive elektronike na bazi papira, govori se i o opciji izrade istežljivih elektronskih dijelova gdje podlogu predstavlja polimerni supstrat nanesen na sloj grafena. Kao primjer navode se solarne ćelije i umjetna koža. Nadalje bi njegova potencijalna primjena mogla biti kao „e-papir“ sa mogućnošću interakcije. Postupak kojim bi se ovo omogućilo je kemijsko taloženje u parnoj fazi (CVD). Ishod tog postupka bio bi kompozit koji se zbog svojih svojstava može istežati i savijati bez promjene, odnosno pogoršanja električnih i mehaničkih svojstava. [5]

3.3. Senzori i biomedicina

Zbog svojih superiornih karakteristika grafen je izuzetno pogodan za izradu senzora. Izloženi okolini atomi u grafenu omogućavaju osjet vanjskih promjena. Izradom takvih mikrosenzora postojala bi mogućnost otkrivanja potencijalno štetnih tvari na molekularnoj razini. Nadalje je znanstveno dokazan rad senzorskih uređaja pri velikim brzinama putem specifične 2D strukture grafenovog oksida u kombinaciji sa permeabilnošću molekula vode. Budući da uz pomoć kemijskih para dolazi do promjene zvučnog spektra tranzistora na bazi grafena, taj bi princip omogućio ciljano otkrivanje plinova za razne vrste plinova. Ovo bi posebno naišlo na primjenu u prehrambenoj industriji. Izradom pametne prehrambene ambalaže izbjegla bi se trovanja putem ranog otkrivanja pokvarenih supstanci, a samim time smanjio i neželjeni otpad. Selektivnim otkrivanjem štetnih plinova omogućilo bi se kontroliranje usjeva u agrokulturi. Prepoznavanjem gore navedenih plinova moglo bi se spriječiti propadanje i moguća šteta.

Uz kemijske senzore grafen nailazi na pogodnosti i na području biomedicine, gdje i se izradom biosenzora mogle pravovremeno uočiti pojedine bolesti.

Materijali srodni grafenu svoju bi primjenu mogli naći u neuroznanosti. Posebni značaj pridaje se prijenosu lijekova i gena putem grafenskih nanoprijenosnika, neuralna regeneracija, snimanje i stimulacija na grafenskim kompozitima. Primjena grafena na tom području još je uvijek ograničena. Nakon intravenske injekcije dolazi do akumulacije materijala i do formiranja biomolekularne korone čime bi se mogla izazvati upalna reakcija. Ti bi se nedostaci mogli ublažiti oplemenjivanjem površine grafena, budući da se zbog svojih svojstava čini prikladnim za transport gena, lijekova, proteina i protutijela. To ga čini materijalom vrijednog daljnjeg proučavanja i oplemenjivanja. [5]

3.4. Prevlake i kompoziti

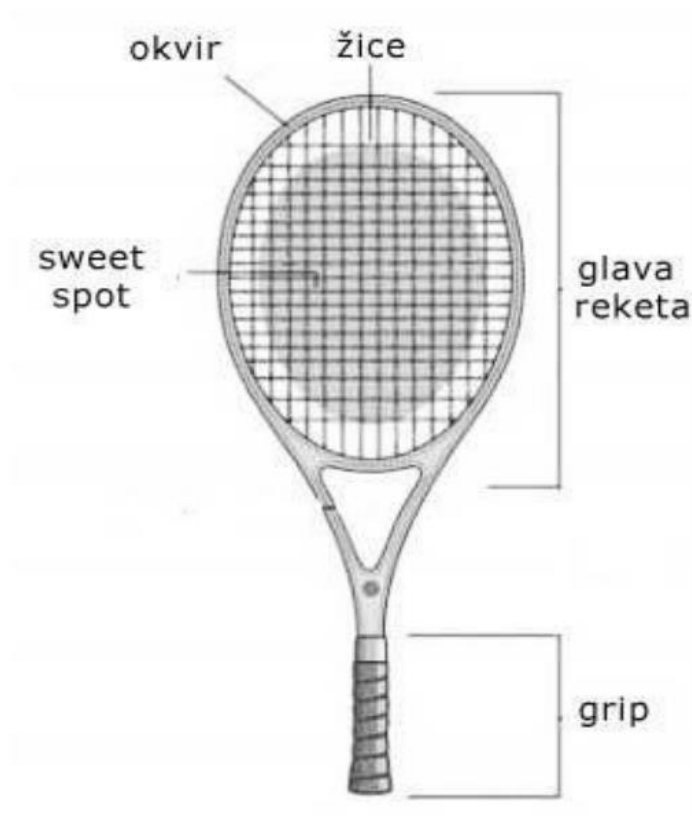
Općenito svaki poznati materijal zauzima neku masu i neki prostor. Materijal također mora imati neko specifično svojstvo, na primjer električnu vodljivost, toplinsku vodljivost ili otpornost na koroziju. Zbog poboljšanih svojstava koji zasebni materijali nemaju, spajanjem dvaju pojedinih materijala nastali su kompoziti.

Kompoziti su kao što je i navedeno materijali sastavljeni od najmanje dva materijala, jedan materijal služi za očvršćivanje a drugi materijal je osnovi materijal. Kao materijal koji također ima izuzetno dobru čvrstoću, grafen se u posljednje vrijeme sve više koristi upravo kao dodatni materijal u kompozitima, materijal za povećanje čvrstoće. Kada usporedimo Grafen sa materijalom poput čelika, tada dolazimo do rezultata koji su sljedeći. Grafen ima pet do šest puta manju gustoću, čvrstoća je oko 10 puta veća, grafen je također i 2 puta tvrdi te oko trinaest puta savitljiviji materijal od čelika. Zbog ovakvih svojstava ovaj supermaterijal Grafen ima posebno veliki potencijal za primjenu u avioindustriji kod koje je najvažniji odnos čvrstoće i težine. Avio-industrija teži za što čvršćim materijalima, no veliku ulogu ima i težina samih materijala koji se ugrađuju. Trenutno avio kompanije kod proizvodnje letjelica ugrađuju ugljična vlakna u svoje proizvode, no očekuje se da će grafen u bližoj budućnosti potisnuti dosadašnje materijale u ovoj grani industrije.

Grafen bi se u budućnosti u avio-industriji trebao pojaviti u kombinaciji s epoksidnim smolama i polimerima. Ta kombinacija za rezultat bi davala kompozit koji bi imao izrazito veliku čvrstoću a opet bi masa samog materijala bila manja nego kod dosadašnjih materijala koji se ugrađuju. Sa tim rezultatima avio-industrija bi ostvarila znatno bolju iskorištenost goriva te veći domet same letjelice. Na ove bolje rezultate direktno bi utjecalo samo smanjenje mase letjelica koja bi uvođenjem novog kompozitnog materijala bila smanjena. U skorijoj budućnosti grafen će zasigurno izbaciti trenutne materijale iz upotrebe te tako avio-industriji dati mnogo prednosti. [5]

Grafen se danas može već naći u nekim proizvodima, naime sportski proizvodi odnosno sportska industrija idealna je za početna testiranja novih materijala. Jedan od glavnih razloga je taj da se novi materijal odnosno proizvod sastavljen od novih materijala može relativno brzo predstaviti tržištu, to jest testiranja nisu tako složena kao za neke druge industrije. Drugi razlog je taj da proizvod s greškom ili sa ne dovoljnim testiranjem u sportu ne može dovesti do katastrofalnih posljedica.

Primjenu grafena možemo naći u teniskim reketima. U počecima ovog sporta, reketi za tenis bili su drveni. U ranim 1970 – im situacija s reketima se mijenja, igra napreduje te igrači teže ka boljim svojstvima reketa. Traži se veća čvrstoća, dulja trajnost te veća otpornost na udarce. Na tržište tada dolaze metalni reketi koji nude veću čvrstoću, dulju trajnost te veću otpornost na vibracije. Metalni reketi zbog svoje mase nisu se uspjeli dugo zadržati u teniskom svijetu. Već 1980-ih proizvođači reketa pokušavaju smanjiti masu samih reketa, tako kreću u nove izazove. Pokušavaju ubaciti ugljična vlakna u kombinaciji su metalom. Sa ovim kompozitom teniski svijet dolazi do znatnih poboljšanja. Reketi na bazi ovih kompozita imaju veću krutost te zavidno manju masu od metalnih reketa, to dovodi do smanjena apsorpcije energije u okviru kod kontakta s loptom što za rezultat ima veću brzinu teniske loptice.



Slika 10. Dijelovi teniskog reketa [6]

Danas se reketi izrađuju od kompozita koji kao sekundarni materijal ima grafen, zbog izuzetno dobrih svojstava čvrstoće te male mase ovaj supermaterijal se nametnuo te se trenutno svi reketi izrađuju na bazi grafena.

U sportu zvanom golf također se kod opreme odnosno golf palice traži što veća čvrstoća i krutost palice te što manja masa. Kada se koristi lakša drška onda se težina može iskoristiti za glavu palice što automatski doprinosi jačem udarcu golf loptice. Drška proizvedena od grafenskih vlakana je otprilike do 40% lakša od čelične, što je znatno smanjenje mase u odnosu na čeličnu dršku.



Slika 11. Drška golf palice od grafenskih vlakana [7]

4. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Dosadašnja istraživanja odnose se na primjenu grafena u raznim područjima.

Istraživači Andre Geim i Konstantin Novoselov su 2004. godine uspjeli, mikromehaničkim raslojavanjem, pomoću ljepljive trake odvojiti tanke slojeve kristalnog grafita i u fragmentima dobiti dvodimenzionalni kristalni materijal, grafen. Od tada pa sve i do danas traju intenzivna istraživanja, zanimanja i rasprave oko ovog materijala.

Andre Geim i Konstantin Novoselov su 2010. godine dobili Nobelovu nagradu za fiziku koja je nagradila njihova istraživanja i za svoje inovativne eksperimente na dvodimenzionalnom materijalu grafen. Geim i Novoselov su od samog početka bili usmjereni prema fizici i istraživanjima, te su ta otkrića veliki potencijal za promjene i dobrobit samom čovječanstvu.

Naime, Geim, Novoselov i njihovi suradnici uspjeli su dobiti strukturu koja se sastojala od samo nekoliko ili čak jednog atomskog sloja grafita što je i bilo ključno za fiziku i ovu nagradu. Na te su uzorke spojili sitne kontakte, te su zatim mjerili svojstva vođenja elektrona kroz taj materijal. Geim i Novoselov su zapravo izradili tranzistor koji je temeljen na materijalu grafenu. Nadalje, osim svojstva vođenja elektrona također su dodatno promatrali kako se ponašaju elektroni u grafenu i to pod utjecajem magnetskih polja. Rezultati su objavljeni u dva znanstvena časopisa.

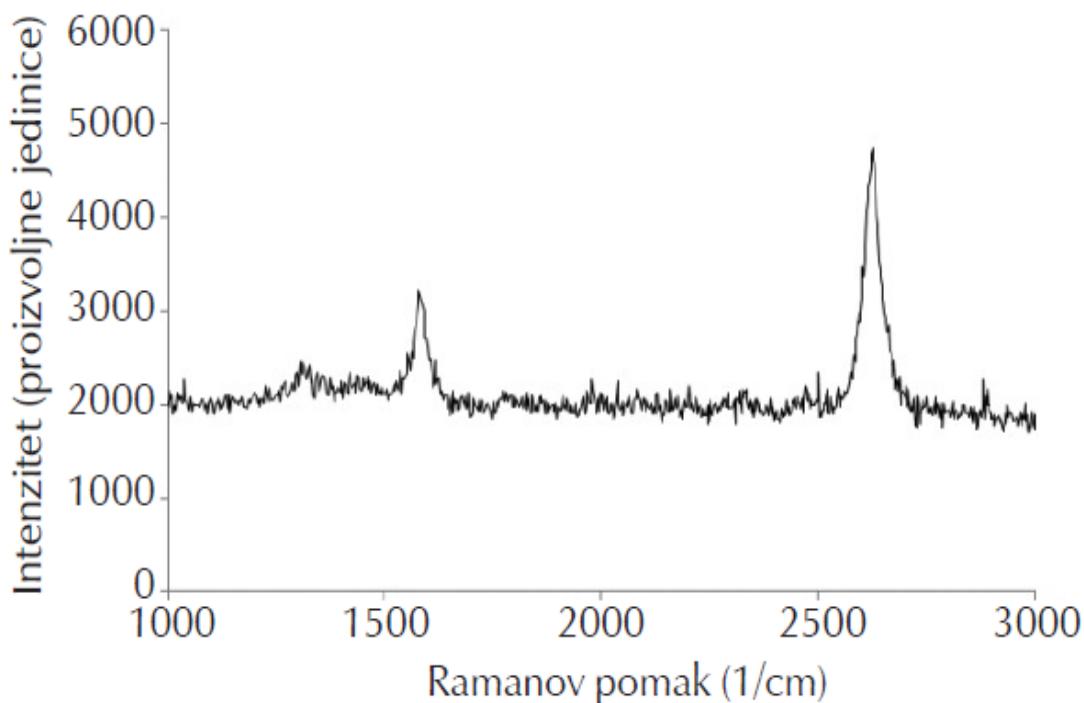
U časopisima otkrivaju rezultate istraživanja o eksperimentalnoj studiji sustava kondenzirane tvari (jedan atomski sloj grafena) u kojem je prijenos elektrona bio vođen Diracovom jednadžbom. U nastavku spominju kako nosioci naboja u grafenu oponašaju relativističke čestice s nultom masom mirovanja i imaju učinkovitu 'brzinu svjetlosti' $c^* \approx 10^6 \text{ m s}^{-1}$.

Njihovo istraživanje zapravo otkriva niz neobičnih pojava koje su karakteristične za dvodimenzionalne Diracove fermione. Neke od primijećenih jesu:

- vodljivost grafena nikada ne pada ispod minimalne vrijednosti koja odgovara kvantnoj jedinici vodljivosti, čak i kada koncentracije nositelja naboja teže nuli
- cjelobrojni kvantni Hallov efekt u grafenu je anomalan po tome što se javlja pri polucijelim faktorima punjenja
- ciklotronska masa m_c bezmasenih nosača u grafenu opisana je s $E = m_c c^{*2}$

Ovaj dvodimenzionalni sustav ne samo da je zanimljiv sam po sebi, već također omogućuje pristup suptilnoj i bogatoj fizici kvantne elektrodinamike. [8]

Nadalje nakon same proizvodnje grafena, to jest dobivanja ovog supermaterijala ili materijala budućnosti kako ga mnogi nazivaju bilo je potrebno također odraditi karakterizaciju uzoraka kako bi se dokazala prisutnost samog grafena a isto tako i odredila njegova kvaliteta odnosno kvaliteta površine materijala. Kod ovog istraživanja pratili su se uzorci kod kojih se tražila prisutnost jednoslojnog te višeslojnog grafena. Način na koji je najjednostavnije obaviti karakterizaciju je Ramanova spektroskopija pomoću koje je vrlo jednostavno zaključiti o koliko se slojeva grafena radi , te se također može vidjeti i koncentracija defekata u samom materijalu.

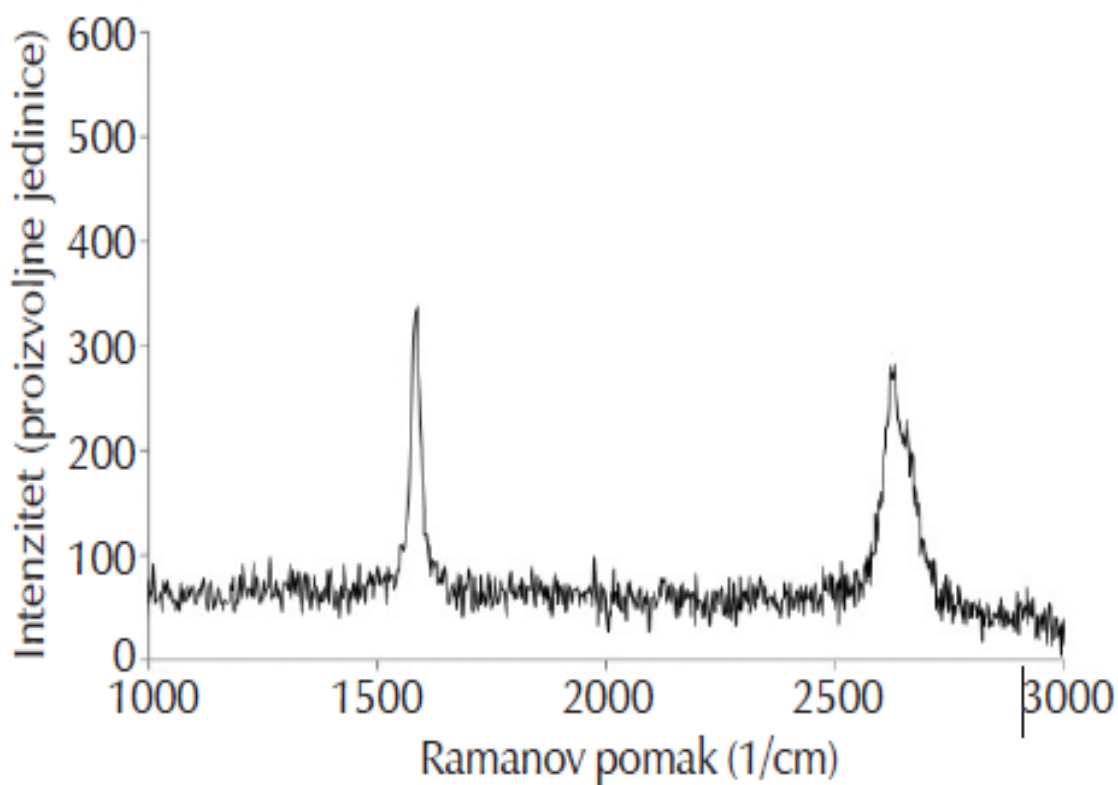


Dijagram 1. Ramanova spektroskopija jednoslojnog grafena [9]

Broj slojeva kod grafena može se odrediti omjerom G vrha koji se na prikazu spektroskopije nalazi na 1580(1/cm) te 2D vrha koje se nalazi na 2700(1/cm). Kada se radi o jednoslojnom grafenu G vrh je puno manjeg intenzita nego 2D vrh. [9]

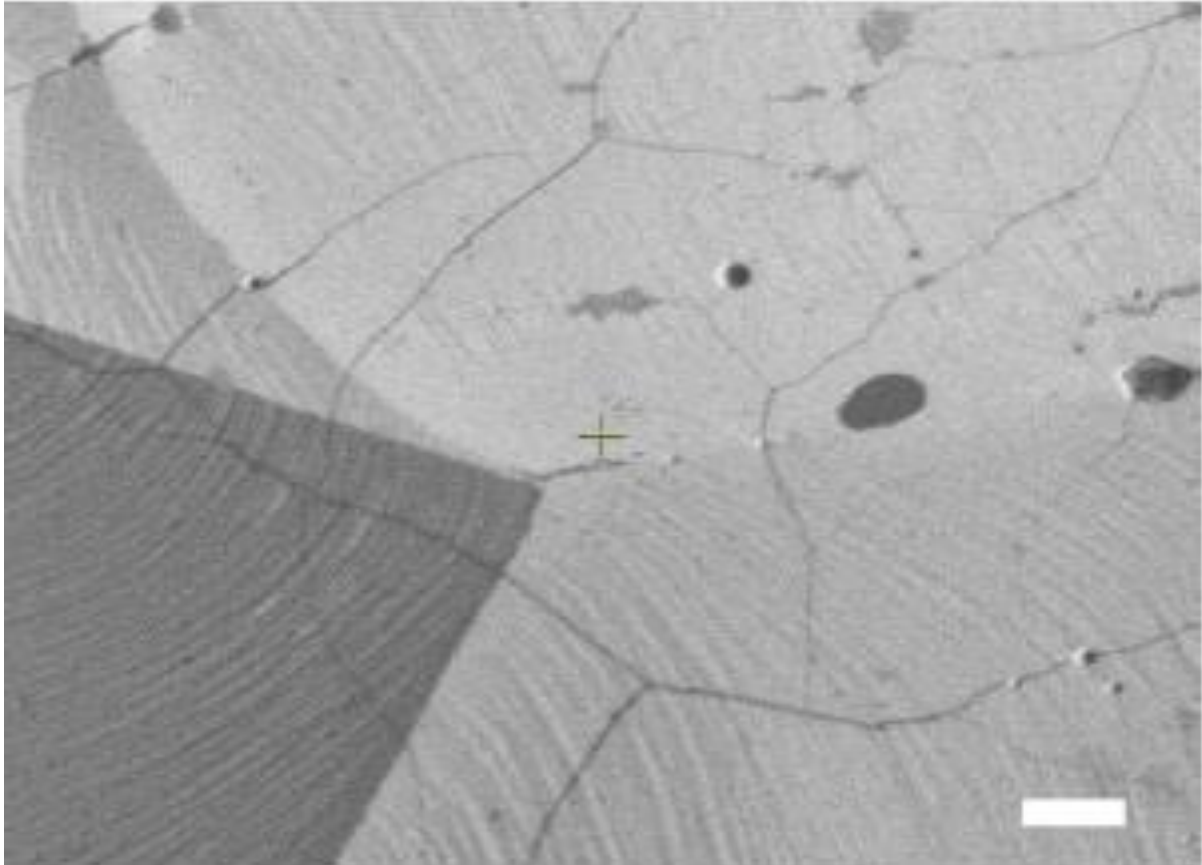
Kod dvoslojnog grafena dolazi se do situacije da G vrh i 2D vrh imaju približno jednak intenzitet dok je kod višeslojnog grafena slučaj sljedeći, G vrh koji se nalazi na 1580(1/cm) ima veći intenzitet nego 2D vrh koji je smješten na 2700(1/cm).

Kada se govori o defektima materijala, oni su zapravo čitljivi kroz Ramanovu spektroskopiju i to kao koncentracija defekata, a njihova koncentracija proporcionalna je točki D, odnosno D vrhu koji se na dijagramu nalazi na 1350(1/cm). D vrh je na dijagramu 1 slabo izražen, to znači da je koncentracija defekata vrlo niska, dok na dijagramu 2 D vrh uopće nije uočljiv.



Dijagram 2. Ramanova spektroskopija višeslojnog grafena grafena [9]

Kod istraživanja ovog supermaterijala također se u obzir uzima i morfologija površine. Morfologiju površine grafena moguće je napraviti mikroskopijom. Ovaj pokus izvodi se na način da se uzorak grafena koji može biti jednoslojni ili višeslojni postavi na bakrenu foliju. [9]



Slika 12. Elektronska mikroskopija grafena na bakru(bijeli kvadrat u donjem desnom kutu dužine je jednog mikrometra) [10]

Na slici 12. možemo vidjeti primjer elektronske mikroskopije grafena koji je postavljen na bakrenu foliju. Kristalne domene od bakra na slici se prezentiraju kao nepravilni oblici, te imaju različiti kontrast. Kod tih kristalnih domena je tipično to da im promjer varira između 10 i 100 mikrometara. Veće kristalne domene imaju za rezultat grafen koji ima puno bolju kvalitetu.

Kristalne terase su na slici 12. vidljive u obliku svjetlijih i tamnijih pruga koje svojim oblikom znaju podsjetiti na zeburu.

Tamne linije koje nalikuju kao rijeke i korita s pritocima na satelitskim snimkama iz zraka zapravo su nabori grafena. Upravo su ti grafenski nabori karakteristični za postupak kemijske depozicije iz parne faze jer oni nastaju posljedicom završetka sinteze dok se uzorak hladi na sobnu temperaturu. Također treba naglasiti kako tijekom hlađenja bakrena podloga odnosno bakrena folija znatno smanjuje svoj volumen. Volumen bakrene folije smanjuje se iz razloga što bakreni katalizator ima puno veći koeficijent toplinske ekspanzije nego grafen. Kada govorimo o površini samog supermaterijala grafena, njegova površina je konstantna, te on uslijed kontrakcije bakrene podloge ostaje nagužvan na površini bakrene podloge u obliku struktura koje se nazivaju nabori ili bore grafena.

Mnoštvo lokaliziranih kružnih oblika koji imaju različite radijuse na slici 12. ukazuju na kontaminaciju površine. Svjetliji kontrast od podloge ukazuje na anorganske čestice, dok vrlo tamni kontrast kojeg je vrlo lako vidjeti i iščitati ukazuje na amorfni ugljik. Anorganske čestice na površinu uzorka jednoslojnog ili višeslojnog materijala budućnosti pojavljuju se netom prije ili kasnije same sinteze i to zbog dodirivanja bakrene folije lateks rukavicama. Čestice amornog ugljika ukazuju na loše parametre kod sinteze ili također mogu ukazivati na kontaminaciju. [11]

5. ZAKLJUČAK

Grafen je svojom Nobelovom nagradom, odnosno nagradom Geima i Novoselova dokazao svoj veliki potencijal, međutim još uvijek ne postoje uređaji odnosno proizvodi koji su bazirani na grafenu, osim sportskih rekvizita, gdje grafen već i sad ima svoju primjenu. Elektronička tehnologija danas kao jedna od zasigurno najvećih industrijskih grana na svijetu žudi za novim izazovima i rezultatima, od nje se traži da postigne veće brzine, gustoće, količine memorijskog prostora te manje cijene. Jedna od očitih prednosti ovog supermaterijala je nevjerovatno velika brzina elektrona u grafenu. Ovo svojstvo grafena automatski ga kvalificira kao ozbiljnog kandidata za visokofrekvencijske primjene kao što su ultrabrzi tranzistori i kompjutori. Kada pogledamo dosadašnja istraživanja grafena, vrlo se jasno vidi da njegova svojstva imaju za pravo buditi nadu kako je baš grafen materijal koji će se u budućnosti nalaziti u uređajima to jest u novim proizvodima. Broj potencijalnih upotreba odnosno spektar buduće primjene je vrlo širok. Bilo kako bilo, svaki oblik proizvodnje, odnosno komercijalne primjene zahtijeva proizvodnju velikih količina grafena. Metoda kojom su se koristili nobelovci Geim i Novoselov nikako nije prigodna za takav zadatak, veliku proizvodnju. Očekivanja su velika, elektronička tehnologija treba nova inovativna rješenja, treba materijale koji će zamijeniti elektroniku baziranu na siliciju. Ostaje za vidjeti koje će se tehnologije oslanjati na grafen i kada će to biti. Pred grafenom je svakako svijetla budućnost, te je s pravom nazvan materijalom budućnosti.

LITERATURA

- [1] N. Miličević: Primjene grafena u inženjerstvu materijala, Zagreb, 2015. [view.pdf](#)
- [2] H. Trinki: Utjecaj grafenovog oksida na pseudokapacitivna svojstva poli(3,4- etilendioksitiofena), Sveučilište u Zagrebu, 2018. <https://repozitorij.fkit.unizg.hr/islandora/object/fkit:911>
- [3] Marko Kralj: Grafen: zvijezda je rođena, Nobelova nagrada za fiziku 2010. godine, Matematičko - fizički list, Izvanredni broj (J), Zagreb, 2020. <https://hrcak.srce.hr/file/354082>
- [4] Članak, url: <https://www.graphene-info.com/graphene-batteries>
- [5] R. Mićanović: Karakterizacija slojeva grafena na bakrenoj podlozi, Zagreb, 2017. http://repozitorij.fsb.hr/7849/1/Micanovic_2017_diplomski.pdf
- [6] Ž. Garafulić: Tenis kao cjeloživotno iskustvo, Sveučilište u Zagrebu, 2016. <https://core.ac.uk/download/pdf/197877836.pdf>
- [7] Članak, url: <https://mygolfspey.com/shaft-review-fujikura-ventus/>
- [8] “The Nobel Prize in Physics 1986”, Nobelprize. org. 2011. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/
- [9] Z. Ereš: Osvježimo znanje, Kem. Ind. 68 (3-4) 137–138, , Zagreb, 2019. <https://hrcak.srce.hr/file/319018>
- [10] Z. Ereš, S. Hrabar: Low-cost synthesis of high-quality graphene in do-it-yourself CVD reactor, Automatika 59 (3) 255–261, 2018. doi: <https://doi.org/10.1080/00051144.2018.1528691>
- [11] S. Stankovich i sur.: Synthesis of graphene-based nanosheets *via* chemical reduction of exfoliated graphite oxide, Carbon 45 (7) 1558–1565, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.02.034>