

# Senzori bazirani na ugljeničnim nanotubama

PREGLEDNI RAD

Borivoje Milošević, Nenad Stojanović  
Visoka tehnička škola strukovnih studija, Niš  
[borivojemilosevic@yahoo.com](mailto:borivojemilosevic@yahoo.com)

Slobodan Obradović  
Matematički institut SANU, Beograd  
[slobo.obradovic@gmail.com](mailto:slobo.obradovic@gmail.com)

*Sadržaj*— Senzorske sisteme, sa izvanrednim karakteristikama u vidu najbolje osetljivosti, brzine rada, rekombinacije, pouzdanosti itd., do sada smo nalazili samo u okruženju prirode. Ovakve izvanredne prirodne senzorske strukture naučnici su pokušavali tokom zadnjih desetleća da razvijaju i izrađuju projektovanjem čitavog niza veštačkih senzorskih sistema kako bi što više smanjili jaz koji postoji između njih i prirodnih, a ogleda se u sposobnostima i veličini ovih uređaja. Međutim, nagli napredak nauke, tehnike i tehnologije i mogućnost pravljena uređaja u okviru nanometarske skale, a naročito razvoj i projektovanje nanosenzora, pruža nam priliku da napravimo novi korak u zatvaranju tog jaza i polako stupimo u novu eru senzorskih uređaja koji će imati karakteristike vrlo slične onima u prirodi. U radu će se govoriti o ovim uređajima, baziranim na nano skali i napravljenim od materijala koji su već podigli revoluciju u okviru tehnologije i proizvodnje elektronskih komponenata - grafenu i nanotubama.

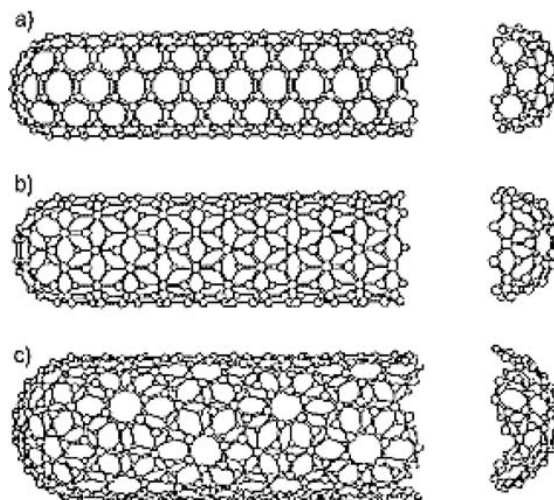
**Ključne reči** - Nanosenzori; CNT; NEMS; SWNT, MWNT;

## I. UVOD

Nanotube su otkrivene 1991 a pronašao ih je Sumio Iijima, istraživač japanskog NEC-a. Nanotube, veoma mali cilindri debljine nekoliko ugljenikovih atoma sa dobrim osobinama za izgradnju čipova, do skora se nisu mogle masovno proizvoditi, već je njihovo postojanje bilo vezano za laboratorijske uslove. Bilo je teško pretpostaviti da će se određene količine nanotuba i fullerena proizvoditi i van laboratorija, kako je to bilo do sada. Međutim, danas se one prave širom celog sveta i naučnici konstantno unapređuju proizvodne metode kako bi ih pravili u još većim količinama, brže i jeftinije. Nekoliko kompanija u SAD i u Evropi proizvodi nanotube, a dve kompanije u Japanu su upravo načinjene kako bi pravile nanotube u masovnim količinama: Frontier Carbon korporacija (udruženi projekat Mitsubishi Corp. i Mitshubishi Chemical Corp.) planira da proizvodi 40 tona nanotube godišnje, a Carbon Nanotech Research Institut planira da godišnje pravi 120 tona. To je mnogo nanotuba (uzimajući u obzir da je jedna nanotuba toliko minijatura da je nevidljiva za ljudsko oko i većinu konvencionalnih mikroskopa) i da kompanije u SAD (Carbolex, Carbon Nanotechnologies, itd.) sada preuzimaju narudžbine u kvantitetima težine manje od 100g.

Prosto rečeno, ugljenične nanotube postoje kao makromolekuli ugljenika, analogno grafitnoj ploči (čista, lomljiva forma ugljenika u koja se može naći npr. u olovci) i koja je savijena u cilindar. Grafit izgleda kao žičana ploča, podeljena heksagonalnim ugljenikovim prstenovima. Ploče od grafita u olovci leže pričvršćene jedna na drugu, ali klize i mogu se lako odvojiti, što olovci omogućuje pisanje. Međutim,

kada se namota, ugljenik postaje veoma čvrst. U stvari, nanotube mogu biti i do sto puta tvrđe od čelika čak i kada su duge samo 2 mm. Ove nanotube imaju hemisfernu kapu na svakom kraju cilindra. One su lake, fleksibilne, temperaturno stabilne i hemijski inertne. Mogu imati metalne ili poluprovodničke osobine [9], što zavisi od zavoja cevi, slika 1.



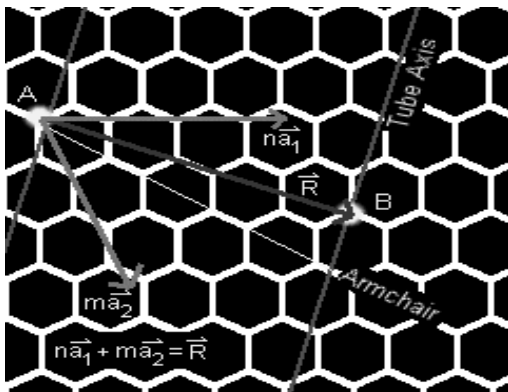
Slika 1. a) Sedlaste, metalne (provodne) – Armchair b) Zig-Zag (poluprovodne) c) Kiralne (poluprovodne) - Chiral nanotube.

Najvažnije karakteristike nanotuba date su u tabeli I.

TABELA I. PREGLED KARAKTERISTIKA NANOTUBA

<b>Veličina:</b>	prečnik 0,6 do 1,8 [nm], dužina 1 do 10 [μm]
<b>Gustina:</b>	1,33 do 1,40 [g/cm <sup>3</sup> ].
<b>Čvrstoća na istezanje:</b>	najmanje 10 puta veća od čvrstoće legiranog čelika
<b>Čvrstoća na pritisak:</b>	dva reda veličine veća nego kod dosad najčvršćih vlakana kevlar
<b>Tvrdoća:</b>	prosečno oko 2000 [GPa], što je dva puta više od dijamanta
<b>Elastičnost:</b>	mного veća nego kod metala ili ugljeničnih vlakana
<b>Toplotna provodljivost:</b>	predviđa se da je veća od 6000 [W/m·K] (dijamant 3320 [W/m·K])
<b>Temperaturna stabilnost:</b>	u vakuumu do 2800 [°C], a u vazduhu do 750 [°C] (metalni vodovi u čipovima tope se između 600 i 1000 [°C])
<b>Emisija elektrona:</b>	aktivira se pri 1 do 3 [V] uz razmak elektroda 1 [μm] (molibdenovi šiljci zahtevaju polje 50-100 [V/μm])

Postoje različite vrste nanotuba, što se može objasniti kiralnim vektorima, slika 2, gde su  $n$  i  $m$  integralni vektorske jednačine  $\vec{R} = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2$ .



Slika 2. Ponašanje nanotube u zavisnosti od Kiralnog vektora

Zamislimo da je nanotuba razvijena u grafitnu ravan. Ako povučemo dve linije duž osovine tube na mestu gde se ona deli, drugim rečima, ako presečemo ploču duž dve sive linije i sastavimo njihove krajeve u cilindar, dobićemo nanotubu. Sada odredimo bilo koju tačku na jednoj od dve sive linije koja seče jedan od ugljenikovih atoma (tačka A), pa nacrtamo tzv. liniju "sedla" - Armchair koja prolazi kroz svaki šestougao, deleći ih na dva jednaka dela. Sada, kada je određena linija sedla, odredimo tačku duž osovine druge cevi koja seče ugljenikove atome najbliže liniji sedla (tačka B). Spajamo tačke A i B kiralnim vektorom  $\vec{R}$ . Ugao omota  $\Phi$  (nije prikazan) formirao se između  $\vec{R}$  i linije sedla.

Ako  $\vec{R}$  leži duž linije sedla ( $\Phi=0$  stepeni), onda ona naziva "Sedlasta" nanotuba. Ako je  $\Phi=30$  onda je tuba "Cik-Cak" tipa, a ukoliko je  $0<\Phi<30$  onda je nanotuba "Kiralna". Vektor  $a_1$  leži duž cik-cak linije. Drugi vektor  $a_2$  ima drugačiju veličinu od  $a_1$ , ali je njegov pravac odraz vektora  $a_1$  preko linije sedla. Kada se spoje, oni daju kiralni vektor  $\vec{R}$ . Vrednosti  $n$  i  $m$  određuju kiralnost ili zavoj nanotube. Kiralnost ima uticaja na provodljivost, tvrdoću, rešetkastu strukturu i druge osobine. Smatra se da su SWNT metalne ako je vrednost  $n-m$  deljiva sa 3. U suprotnom, nanotuba je poluprovodna. Kada su nanotube formirane sa nasumičnim vrednostima za  $n$  i  $m$ , očekuje se da dve trećine nanotube budu poluprovodne a jedna trećina metalna. Karbonske nanotube prikazuju metalna ili poluprovodna svojstva. Metalne nanotube mogu da imaju ekstremno velike trenutne gustine, dok se poluprovodne nanotube mogu električno uključiti i isključiti kao field-effect tranzistori.

Prednosti ugljenične nanotube u odnosu na druge materijale su: mala veličina, velika snaga, velika električna i toplotna provodnost i specifičan oblik. Zbog tih osobina, one se mogu koristiti kao senzorski materijali u ispitivanju pritiska, toplote, gasova, optike, mase, pozicije, naprezanja, deformacije, hemijskih pojava i biologije. Senzori su bazirani na principu da se električne osobine nanotube menjaju kada su izložene nekom spoljnom uticaju. Slučajno orijentisani snopovi SWNTs - jednozidnih nanotuba se u ovim prilikama koriste kao film izotropne prirode koji omogućuje merenje naprezanja u više lokacija i različitih pravaca. Eksperimentalni rezultati pokazuju

skoro linearnu relaciju između merene promene napona i deformacije u CNT filmu kada su izložene određenom pritisku. Indukovano pritiskom, tranzicija između metala i poluprovodnika u sedlastim nanotubama postavila je osnove za dizajniranje senzora pritiska u domenu nanoskala.

Ugljenične nanotube se već koriste kao kompozitna vlakna u polimerima da bi se unapredile njihove mehaničke, toplotne i električne osobine kod ovih sve prisutnijih proizvoda.

Nanotuba kreirana spajanjem krajeva dve nanotube različitih prečnika može se ponašati kao dioda, izgrađena su prva logička kola pa sugerise da je moguće kreirati računar u celini od nanotuba. Zbog svojih veoma dobrih toplotnih osobina, ugljenične nanotube se mogu koristiti za odvođenje toplote sa malih kompjuterskih čipova. Tanak list, koji je kreiran od nanotube je 250 puta jači i 10 puta lakši od čelika može se koristiti kao hladnjak za električne čipove, pozadinsko svetlo za LCD displeje ili kao Faradejev kavez za zaštitu električnih uređaja. Nanotube se takođe mogu koristiti kao superprovodnici na niskim temperaturama, kao tranzistori, solarne ćelije, kompjuterska kola, vodeni i vazdušni filteri i čitav niz senzora.

Ne može se naći nijedan deo nauke i tehnologije gde nanotube ne mogu da nađu svoju primenu u budućnosti, i zbog toga su od neopisivog značaja za čovečanstvo.

Sa stanovišta veličine i funkcionalnih karakteristika, nanosenzori su suštinski manji, osetljiviji, zahtevaju manje električne energije, potencijalno su jeftiniji od drugih senzora.

Globalno tržište nanosenzora – po United Press International's Nano World nudi prilive od \$2.7 milijarde 2008. i \$27.2 milijarde u 2015. godini.

Istraživanja sugerisu da, dok tekući industrijski senzori koštaju desetine hiljada dolara, nano verzije iste stvari bi, u teoriji, bili napravljeni za desetine dolara. Nanosenzori mogu da detektuju pojedinačne ćelije ili čak i atome, čineći ih tako mnogo osetljivijim od svojih predhodnih kolega. Svi senzori zavise od neke vrste površinske hemije, i kako smanjujemo veličinu senzorskih komponenti, sve više i više komponenta se sa površine mogu posmatrati i meriti.

Na kraju, kapitalni i operativni troškovi proizvodnje nanosenzora mogu pasti dovoljno nisko, da će oni zbog toga, a naročito zbog svojih izvanrednih karakteristika, biti prisutni u raznim poljima istraživanja, pa će njihova funkcija biti sve prisutnija i imati viši nivo redundantnosti.

Postoje mnoge potencijalne primene nanosenzora. U vojnom i sigurnosnom području različitog okruženja postaje potreba za visoko osetljivim i široko distribuiranim sensorima za otkrivanje biotoksina i zračenja. U području medicinske zaštite, ultra-osetljive laboratorije-na-čipu mogu otkriti i analizirati male promene tkiva koje označavaju nastanak raka. U vazduhoplovnoj industriji nanosenzori u telima aviona mogu stalno pratiti gde i kada avion treba održavanje, na vreme dojaviti nastanak bilo kakvog kvara, u automobilskoj industriji se mogu koristiti nanosenzori u vozilima za poboljšanje potrošnje goriva i poboljšanje klime i ergonomije sedišta kod luksuznih vozila, ispitivanje pritiska, temperature motora itd. Nezamislivo je i to, koliko će ovakvi nanosenzori imati

primenu u istraživanju svemira i drugih planeta, poneti u nanobrodu konstruisanom na nivou nanoskala i oplemenjenom sa FPGA (Field Programmable Gate Array) kvantnim računarima tolerantnim na greške zasnovanim na novom qbit<sup>1</sup> brojnom sistemu.

U ovom radu razmatrani su rezultati nekoliko studija za projektovanje, konstruisanje i korišćenje uređaja napravljenih u vidu nanometarskih senzora baziranim na ugljeničnim nanotubama.

## II. CNT NANOSENZORI - UVOD

Značajna istraživanja u toku zadnjih godina intenzivno se vrše na razvijanju CNT - baziranih hemijskih, bioloških i fizičkih senzora. Ove napore možemo generalno svrstati u dve kategorije: jedna koja koristi određena svojstva nanotuba (kao što su promene u provodnosti prilikom absorpcije gasova), i druga koja se oslanja na sposobnosti funkcionalizacije nanotuba sa grupama molekula koji bi dakle služili kao senzorski elementi.

Veruje se da će CNT senzori napraviti ogroman napredak u svim tehničkim oblastima (osetljivosti materijala na pritisak, senzora pritiska, brzine, toplotnih i gasnih senzora, senzora radijacije, optičkih, senzora mase, pozicije, napreznja), bioloških senzora i senzora za dijagnostiku i medicinu uopšte. Oni će moći, zbog svoje veličine, biti implantirani u telo pacijenta, gde bi mogli da daju stalne podatke o procentu šećera u krvi, masnoćama, da prate krvni pritisak, temperaturu i dijagnosticiraju bolesti ili u slučajevima kada su ljudi izloženi štetnim gasovima ili radijaciji da trenutno reaguju na njihovo prisustvo. Ovi senzori bi mogli da prate aktivnost srca i regulišu broj otkucaja, daju trenutne analize krvi i da služe i kao defibrilatori u kriznim situacijama. Tabela II prikazuje neke od njihovih osnovnih osobina.

TABELA II. PREGLED NANOSENZORA I ISTRAŽIVAČA

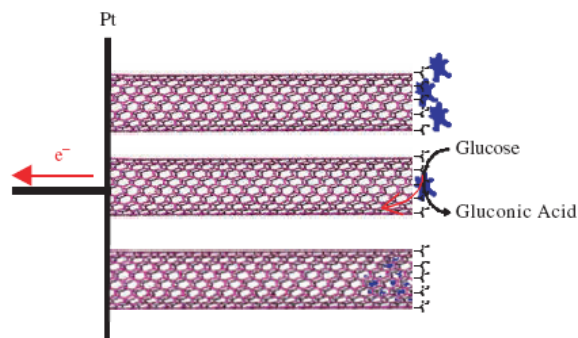
TIP	OPIS	Istraživač/Institut
Carbon Nanotube	Poluprovodne - SWNT registruju NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> i H <sub>2</sub> preko promene provodnosti	Hongjie Dai et al. Stanford University
Carbon Nanotube	SWNT pokazuju visoku osetljivost kada su izložene vazduhu ili kiseoniku, menjajući njihove električne osobine	A. Zettl et al., University of California at Berkeley
Carbon Nanotube	MWNT, generišu električno polje koriste se za minijaturne jonizujuće gas senzore	Pulickel Ajayan et al., Rensselaer Polytechnic Institute
Nanowire	Silikonske nanožice imaju mogućnost osećaja promene pH u određenim rastvorima kroz promenu provodnosti	Charles Lieber et al., Harvard University
Nanowire	Tanke oksidne nanožice registruju N <sub>2</sub> i CO promenom provodnosti	Martin Moskovits et al., University of California at Santa Barbara
Nanobelt	Tanke oksidne nanotrake jednodimenzionalne izdužene strukture, registruju CO, NO <sub>2</sub> promenom provodnosti	The National Institute for the Physics of Matter, Brescia, Italy, and Università di Brescia

<sup>1</sup> za opisivanje stanja sa više informacija uveden je "kvantni bit", kubit (engl. qubit od **quantum bit**), kao osnova jedne proširene binarne logike sa četiri moguća stanja

Nanohelix	Nanobelts familija – tanke strukture cink oksida u vidu gajtana sa poluprovodničkim i piezoelektričnim svojstvima	Georgia Tech School of Materials Science and Engineering
-----------	---	--

## III. GASNI SENZORI

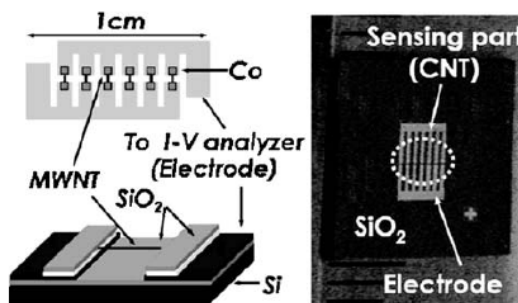
Gasni senzori se danas, već uveliko, mogu naći na tržištu. Sensor firme Nanomix, napravljen je za detektovanje industrijskog nivoa vodonika. Kada se parovi MWNTs koji rastu na supstratu od platine (Pt) postavje u obliku statične matrice razvija se gasni sensor. Supstrat platine služi kao transdukciona platforma za snimanje signala. Šematski dijagram CNT polja biosenzora [9] prikazan jer na slika 3.



Slika 3. Šematski dijagram CNT polja biosenzora

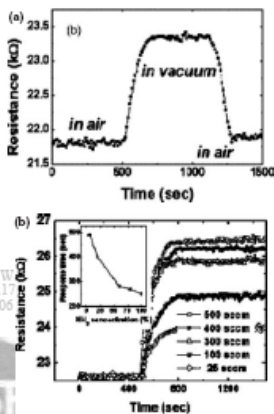
Polja su izložena tretmanu vazduha i kiseline. Tretmanom sa kiselinom uklanjaju se sve nečistoće nastale u fazi produkcionog procesa. Izlaganje vazduhu ima za zadatak da oljušti sve spoljnje slojeve grafita iz nanotube.

Snopovi SWNT nanotuba prečnika 1.5 nm, koji su gusto upakovani između dve metalne elektrode čine sensor koji je  $1 \times 10^{-3}$  m. dugačak,  $2 \times 10^{-4}$  m. tanak i  $2 \times 10^{-3}$  m. širok. Kroz eksperimente je ustanovljeno da struja jona u njima značajno utiče na indukovanje napona na elektrodama. Ustanovljeno je takođe, da se električna otpornost poluprovodne SWNTs dramatično menja, kada je ona izložena molekulima gasa kao što je naprimer vodonik, nitrogen dioksid, amonijak ili kiseonik. Tada je izmereno da je vreme rekombinacije takvog SWNTs senzora barem za jednu veličinu brže od standardnih senzora. I pored svoje vrlo male veličine, SWNTs senzori rade na sobnim temperaturama sa osetljivošću većoj od  $10^3$ . Ovo je formiralo osnove za izgradnju hemijskih senzora baziranih na poluprovodnom SWNTs, slika. 4.



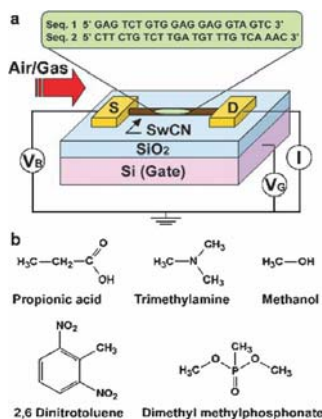
Slika 4. Kompletan CNT MWNT hemijski sensor

Katoda korišćena u ovom slučaju je od aluminijuma, dok je anoda vertikalno postavljena MWNT film (25-30 nm. u prečniku, 30 nm. dug i sa rastojanjem između SWNTs od 50 nm. koje rastu na silicijum-dioksid supstratu). Elektrode su razdvojene izolatorom od stakla. Ovako razvijen senzor ima dobre selektivne i senzitivne karakteristike, koje mogu da prate razne uslove okoline (vlažnost, temperatura i tok nekog gasa). Jedan takav senzor gasa prikazan je na slici. 4. Njegova električna otpornost se menja u slučajevima kada je izložen vazduhu ili amonijaku, slika 5.



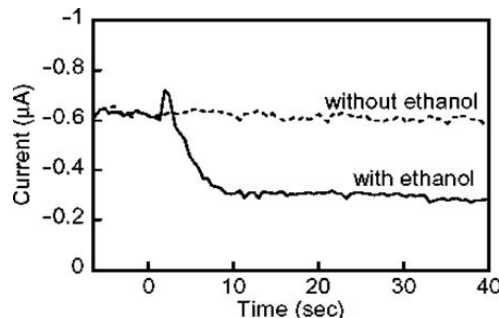
Slika 5. Promena CRT otpornosti u zavisnosti od ambijenta

Struktura jednog CRT FET [9] (Field Effect Tranzistora)-gasnog senzora i njegova eksperimentalna geometrija prikazana je na slici 6, dok je merenje struje drejna u funkciji vremena posmatrano uz uslove  $V_{sd} = -100$  mV i  $V_g = -10$ V, dato na slici 7.



Slika 6. a) Prototip senzora b) Gasovi korišćeni u eksperimentu

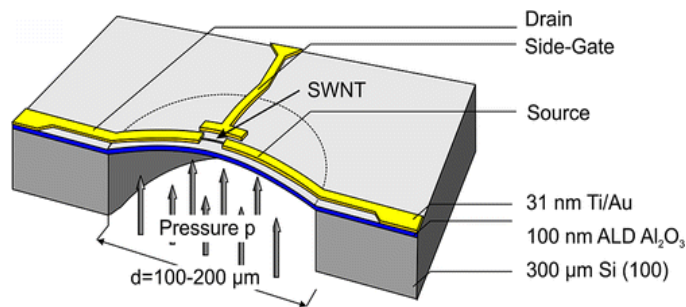
Kada se parom etanola tretira senzor, onda posle kratkog pika od nekoliko sekundi struja drejna značajno opada na jednu konstantnu vrednost. Tako se merenjem struje i utvrđivanjem zavisnosti može pouzdano utvrditi prisustvo etanola. Međutim, ovi senzori se mogu tretirati i sa mnogim drugim vrstama gasova, pa na taj način mogu vrlo brzo i sa odličnim vremenom rekombinacije da utvrde o kojim gasovima je reč i čak koje su njihove koncentracije.



Slika 7. Merenje struje drejna u različitim gasnim sredinama

#### IV. SENZORI PRITISKA

Elektromehanički senzor pritiska, slika 8, se sastoji od jedne električno SWCNT absorbovane na vrhu 100nm tankog sloja cirkularne membrane  $Al_2O_3$ , sa radijusom od 50–100  $\mu m$ . Interferometer bele svetlosti se u ovom slučaju koristi za merenje defleksije membrane u zavisnosti od diferencijalnog pritiska i mehaničkih osobina uređaja prouzrokovanih njenim ispučanjem. Na kraju, izvršena su laboratorijska elektromehanička merenja sa blokovima metalnih SWCNTs spojenih na membranu i određen piezorezistivni meri faktor za metalne SWCNT aproksimativno u iznosu 210. Utvrđeno je da deformacija CNT bloka gradi linearnu zavisnost sa njegovom električnom otpornošću. Kako se CNT blok više savija, tako se njegova otpornost smanjuje. Međutim, kako se smanjuju mehaničke osobine membrane, tako se i ova linearna zavisnost smanjuje. Mogu se koristiti u hirurgiji očiju, uređajima za respiraciju, bolesničkim krevetima, inhalatorima ali i uređajima za dijalizu bubrega.



Slika 8. Elektromehanički CNT senzor pritiska

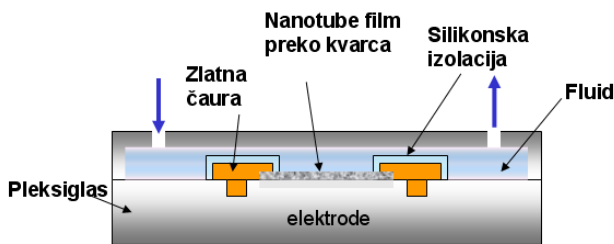
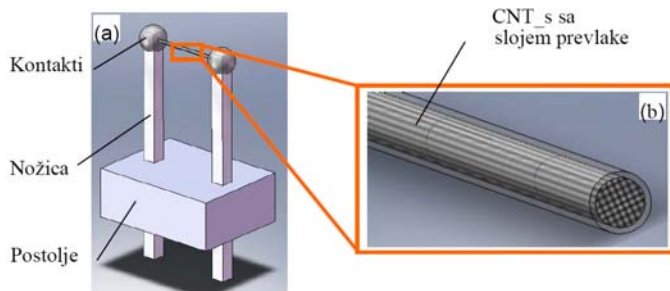
Zbog linearnog odnosa između opterećenja i napreznja, ovakvi nano senzori mogu biti vrlo dobri senzori pritiska, sa izvanrednim karakteristikama i velikom preciznošću merenja.

#### V. SENZORI PROTOKA

Mogu se napraviti od makro CNT senzorskih elemenata sa mogućnošću praćenja toka fluida i njegove turbulencije. Za sada se koriste za manje brzine protoka, a prate ih visoka vremenska i prostorna rezolucija, široki frekventni opseg, mali pozadinski šumovi, jednostavna konstrukcija i mala cena. Oni naprimer, mogu vrlo precizno da regulišu protok gasova prilikom anestezije pacijenta ili da daju trenutni presek podataka potrebnih za određeni medicinski tretman pacijenta.

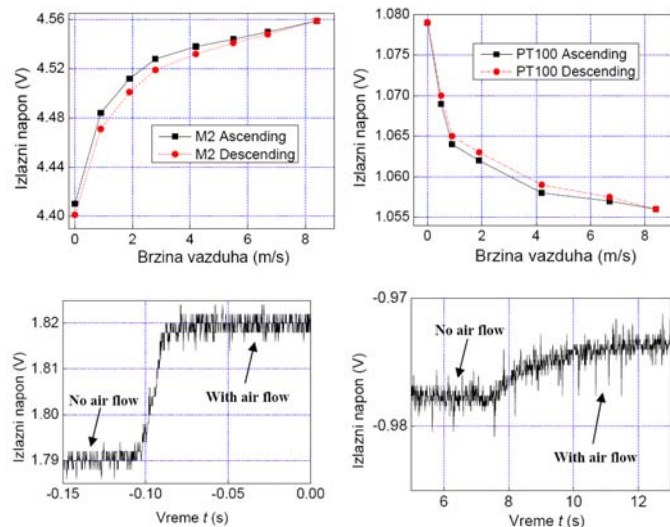


Baziraju se na odgovarajućem prenosu toplote sa zagrejane CNT žice ili filma potopljenog u neki fluid, pa se brzina protoka meri u odnosu na takav transfer toplote [12]. Nanotube u ovom senzoru su višezidne, sa prečnikom od 5nm do 30nm i dužine oko 4 milimetra, slika 9.



Slika 9. Šematski prikaz senzora protoka

Merenja su izvedena u vazдушnom tunelu kada je maksimalna brzina fluida 15 m/sec, pri konstantnoj struji i naponu koji proporcionalno zavisi od brzine fluida (slika 10).

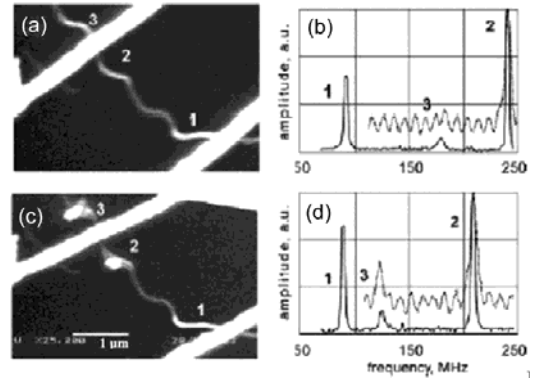


Slika 10. Dijagrami brzina fluida u zavisnosti od napona

## VI. SENZORI MASE

Volodin et al. [26] su razvili elektromehanički rezonantni senzor mase korišćenjem obmotane MWCNT kao rezonatora. Struktura ovog uređaja je obmotana MWCNT obešena između dve elektrode. Uređaj je fabrikovan lociranjem snopa CNT na substrat a zatim, korišćenjem tehnologije electron-beam litografije definisani su parovi elektroda sa kontaktima na

nanotubi. slika 11 (a) prikazuje nepobuđeni uređaj, a slika 11 (c) uređaj pobuđen karbonskim prahom.



Slika 11. ATM - Atomic Force Microscop slika stanja CNT rezonatora za merenje mase

Radio-frekventno kolo (RF) konektovano je na elektrodama uređaja da bi obradilo rezultate merenja generisanog signala i signala generisanog pobudom u rezonatoru. Frekventni odziv rezonatora prouzrokovan je vrhom ATM.

Frekventni odziv je takođe sagledan kada je rezonator posut prahom karbonskih čestica. Može se videti, da frekventni odziv kola posle punjenja, slika 11(d), pokazuje rezonantni skok u odnosu na slika 11(c). Ovo pokazuje da se uređaj može koristiti za merenje mase u rangu od 10 atomgrama.

## VII. ZAKLJUČAK

Imajući u vidu ogroman potencijal i osobine ugljeničnih nanotuba koji se može iskoristiti za izgradnju senzora izvanrednih performansi, minijaturnih dimenzija i male cene, autori u zaključku donose prikaz još nekoliko oblasti u kojima je moguće primeniti i u kojima se primenjuju opisani CRT nanosenzori.

*Saobraćaj:* Zbog zahteva poboljšanja performansi, cene, povećanja pouzdanosti CNT senzori imaju sve veći značaj u automobilske industriji. Oni se koriste da prikupe informacije o pritisku, brzini vozila i ubrzanju, temperaturi, vlažnosti, ispuštanju štetnih gasova i mehaničkom stanju mašine. Mogu dati podatak kada je vazdušni filter prljav ili kada treba zameniti ulje u motoru i u deliću sekunde utvrditi da li je potrebno izbacivanje vazdušnih jastuka. Mogu poslužiti kod: VDC (Vehicle Dynamic Control) sistema koji asistira vozaču kada automobil počinje da se naginje pa kočenjem jednog točka ili torzijom vozilo se vraća na pravac, detekcije prevrtanja i proklizavanja, protiv-provalnih alarmnih sistema. Kada vozila imaju visok centar gravitacije (težište), CNT senzori se upotrebljavaju za snimanje ugla okretanja i daju potrebne parametre za izvođenje kontra akcija.

*Industrija hrane:* Biosenzori od CNT se već široko koriste u ovoj industriji da bi obezbedili sigurnost i kvalitet proizvoda snimajući moguću prisutnost patogenih bakterija. CNT bazirani hemijski senzori se mogu koristiti da detektuju nedozvoljene hemijske resurse kao što su aditivi hrane, herbicidi, pesticidi, itd. Mogu pratiti i utvrđivati kvalitet voća i povrća detektovanjem njihovog stanja.

*Okruženje okoline:* CNT senzori mogu poboljšati performanse alarma za nadzor zapaljivih gasova, detekcije tečnih gasova, nadgledanja eksplozivnih naprava TNT, RDX i nervnih otrova kao GB ili VX, nivoa ugljendioksida u vazduhu. Mogu detektovati zagađivanje sredine, kontrolisati proces kuvanja, zagrevanja i hlađenja prostorija a što ih razlikuje od standardnih senzora ne zahtevaju veliki temperaturni nivo da bi reagovali.

CNT-bazirani ugljenmonoksid (CO) senzori mogu se koristiti za kontrolu ventilacionih sistema u parkiralištima. Kada bi se postigao visok nivo CO, automatski bi se uključili ventilatori ventilacionog sistema promenljive brzine. Tamo gde se očekuje pojačan saobraćaj dizel vozila, projektovani su CNT-bazirani NO<sub>2</sub> senzori CNT - bazirani optički senzori mogu biti odlični uređaji za nadgledanje značajnih mesta u gradu.

*Industrija:* Senzori bazirani na CNT mogu se koristiti za monitoring hidrogena i kontrolu transformacije petroleja, topljenju, raketnim motorima, gorivnim ćelijama. U avionskoj industriji merenje naprezanja tela aviona je od presudne važnosti. Senzori deformacije i pritiska u ovom slučaju imaju značajnu ulogu.

CNT senzori se upotrebljavaju u IC industriji za poboljšanje karakteristika integralnih kola.

#### ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta III 44006 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

#### LITERATURA

- [1] " There's Plenty of Room at the Bottom ", lecture given by physicist Richard Feynman at an American Physical Society meeting at the California Institute of Technology in Pasadena, California, United States on December 29, 1959.
- [2] Handbook of nanoscience, engineering, and technology / editors, William A. Goddard, III ... [et al.]. CRC PressTaylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 3000, NY,USA.
- [3] Engines of Creation, The Coming Era of Nanotechnology. Eric Drexler , Oxford University Press, Oxford, 1990.
- [4] Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation, Eric Drexler's 1991 MIT dissertation.
- [5] ELECTRONIC DEVICE ARCHITECTURES FOR THE NANO-CMOS ERA, From Ultimate CMOS Scaling to Beyond CMOS Devices, Editor Simon Deleonibus, 2009 Pan Stanford Publishing Pte. Ltd. 5 Toh Tuck Link Singapore 596224.
- [6] Perspectives on the computer revolution, Zenon W. Pylyshyn, Prentice-Hall 1970.

- [7] ANNUAL REVIEW OF NANO RESEARCH Series Editors: Guozhong Cao (University of Washington, USA), C Jeffrey Brinker (University of New Mexico & Sandia National Laboratories, 2008 USA)
- [8] Carbon Nanotube-Based Sensors Niraj Sinha, Jiazhi Ma, and John T. W. Yeow, Department of Systems Design Engineering, University of Waterloo, 200 University Avenue (W), Waterloo, ON N2L 3G1, Canada, Copyright © 2006 American Scientific Publishers
- [9] Toward Nanometer-Scale Sensing Systems: Natural and Artificial Noses as Models for Ultra-Small, Ultra-Dense Sensing Systems, Brigitte Rolfe, Nanosystems Group, The MITRE Corporation, November 2004
- [10] Coiled carbon nanotubes as self-sensing mechanical resonators, A. Volodin, D. Buntinx, M. Ahlskog, A. Fonseca, J. B. Nagy, and C. Van Haesendonck, Nano Lett., vol. 4, no. 9, 2004
- [11] High Sensitivity Flow-Rate Sensors and Their Performance Improvement by Coating, Xing Yang, Zhaoying Zhou, Dingqu Wang, and Xiaoli Liu, Sensors ISSN 1424-8220 www.mdpi.com/journal/sensors
- [12] UGLJENIČNE NANOTUBE - STRUKTURA, OSOBINE I NANOELEKTRONSKI UREĐAJI, Borivoje Milošević, Zoran Milivojević, Viša tehnička škola Niš, YUINFO 2005. Kopaonik.
- [13] NANOKOMPJUTERI - NOVA GENERACIJA SUPERRAČUNARA ? Borivoje Milošević, Zoran Milivojević, Viša tehnička škola, Niš, INFOTEH 2005, Jahorina.
- [14] Nanotechnology : health and environmental risks, Jo Anne Shatkin, 2008 CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300.
- [15] Design Guidelines for Metallic-Carbon-Nanotube-Tolerant Digital Logic Circuits. Jie Zhang, Nishant P. Patil, Subhashish Mitra Stanford University, Stanford, 2008 CA

#### ABSTRACT

Sensor systems, with outstanding characteristics in regard to the best sensitivity, speed of operation, recombination, reliability, etc., have been encountered only in the natural environment so far. Scientists have been attempting to develop and produce such remarkable natural sensor structures over the last decades by designing a whole range of artificial sensor systems longing to further diminish the gap between them, which is reflected in the size and performances of these devices. However, rapid advances in science, engineering and technology, the possibility to make devices within the nanometer scale, and in particular the development and design of nanosensors, give us the opportunity to make a new step in closing this gap and move slowly into a new era of sensor devices that will have characteristics very similar to the ones found in nature. The paper is about these devices, based on the nano scale and made of materials that have already started a revolution in technology and production of electronic components - graphene and nanotube.

#### CARBON NANOTUBE BASED SENSORS

Borivoje Milošević, Slobodan Obradović, Nenad Stojanović