

Mikro-elektro-mehanički sistemi (MEMS) – Tehnologija za 21. vek

Tatjana A. Djakov, Ivanka G. Popović, Ljubinka V. Rajaković

Tehnološko–metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

Izvod

Mikro-elektro-mehanički sistemi (MEMS) pripadaju minijaturnim elektromehaničkim sistemima (uređaji i strukture) koji mogu da registruju promene u okolini, da ih analiziraju i procesiraju pomoću mikroelektronike. MEMS čine mehanički elementi, senzori, pojačivači, električni i elektronski uređaji koji su smešteni na silicijumov supstrat (čip). MEMS uređaji su minijaturni (dimenzije), optimalni (energetski i ekonomski), adaptabilni (lako se integrišu u druge sisteme i lako se modifikuju), niskog koeficijenata toplotnog širenja, velike otpornosti na vibracije, udar i zračenje. Tehnologije koje se primenjuju za proizvodnju MEMS i MEMS prodiru u svakodnevni život, na sličan način kao mikroelektronika. Mogućnost šaržne proizvodnje u velikim serijama otvorila je široku, komercijalnu primenu MEMS uređaja u biomedicini, telekomunikacijama, bezbednosti i zabavi. MEMS povezuje oblasti koje nisu imale dodirne tačke kao što su biologija, mikroelektronika i nanotehnologija. MEMS se razvija u pravcima koji nadrastaju trenutna saznanja i otkrića tako da se smatra da je MEMS osnova za uređaje i tehnologije 21. veka.

Ključne reči: mikro-elektro-mehanički sistemi (MEMS), senzori, pokretači, čip.

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

PREGLEDNI RAD

UDK 621.38:681.586

Hem. Ind. 68 (5) 629–641 (2014)

doi: 10.2298/HEMIND131008091D

O MEMS

Mikro-elektro-mehanički sistemi (skraćeno MEMS) su mehanički ili elektromehanički sistemi (uređaji i strukture) koje pokreće električna energija [1]. Ovi sistemi mogu da registruju, kontrolišu i aktiviraju mehaničke procese (koji se odigravaju na nevidljivoj mikroskali) koje dalje pojedinačno ili u nizu generišu u efekte vidljive na makro skali. Svaki deo naziva za MEMS ima poseban smisao: mikro (strukture malih dimenzija koje se dobijaju mikrofabrikacijom), elektro (električni signal/kontrola), mehanički (mehanička funkcionalnost), sistemi (strukture, uređaji ili sistemi) [2]. MEMS su se razvili kao logičan nastavak mikroelektronike i integrisanih kola [3]. Za električna kola je karakteristično da su čvrste i kompaktne strukture, MEMS strukture imaju šupljine, kanale, konzole, membrane. MEMS se razlikuje od mikroelektronike, od molekularne nanotehnologije, kao i od molekularne elektronike. Na slici 1 dat je ilustrativan prikaz međusobnog prožimanja optike, mehanike i elektronike koje su osnova za razvoj MEMS, mikro-opto-elektro-mehaničkih sistema (MOEMS), optoelektronike i optomehanike [3].

MEMS čine mehanički elementi, senzori, pokretači (aktuatori), električni i elektronski uređaji koji su smešteni na supstrat silicijuma (čip) [4]. Senzori u okviru MEMS sakupljaju informacije iz okoline merenjem mehaničkih, toplotnih, bioloških, hemijskih, optičkih i magnetnih efekata. Elektronika procesira ove infor-

macije i uz mogućnost donošenja odluka usmerava pokretače (aktuatorne) da svrsishodno željenom odzivu reaguju prema okolini (na primer pomeranjem, pozicioniranjem, regulisanjem, pumpanjem i/ili filtriranjem) [5].



Slika 1. Osnovne tehnike (optika, mehanika i elektronika) za razvoj MEMS, MOEMS, optoelektronike i optomehanike.
Figure 1. Basic technics (optics, mechanics and electronics) for MEMS, MOEMS, optoelectronic and optomechanic development.

Veličina MEMS komponenti (senzora, pokretača i elektronike) iznosi od 1 do 100 μm , dok je sam MEMS uređaj veličine od 20 μm do 1 mm. Tipovi MEMS uređaja mogu da variraju od relativno jednostavnih – bez pokretnih delova, do izuzetno kompleksnih elektromehaničkih sistema sa mnogo pokretnih elemenata koje kontrololise integrisana mikroelektronika. U MEMS uređaje spadaju senzori za pritisak, merači ubrzanja-akcelerometri kao inertni senzori, mikroogledala, minijaturni roboti, zupčanici, pumpe za fluide, senzori za protok, generatori mikrokapljica, optički skeneri, uređaji za analizu i dobijanje slika, hemijski senzori, sonde i šiljci za ispitivanje površine [5].

Preписка: T.A. Djakov, Tehnološko–metalurški fakultet, Karnegijeva 4, 11000 Beograd, Srbija.

E-pošta: tdjakov@tmf.bg.ac.rs

Rad primljen: 8. oktobar, 2013

Rad prihvaćen: 10. decembar, 2013

Istorijat MEMS

Istorijat MEMS je vezan za razvoj svake od tehnika na kojima se zasniva MEMS tehnologija, ali se smatra da su prvi fenomeni koji su posledica ovih integrisanih sistema zabeleženi pedesetih godina dvadesetog veka [6]. U tabeli 1 prikazan je hronološki istorijat otkrića i proizvodnje uređaja koji su preteča MEMS.

Šest najvećih kompanija za proizvodnju MEMS uređaja u ovom trenutku u svetu su: Robert Bosch (Nemačka), ST MIKRO (Italija/Francuska), Lexmark (SAD) – ranije IBM, SEIKO-EPSON (Japan), Bei Technologies (SAD, Kalifornija) i Analog Devices (SAD, Boston). One proizvode merače ubrzanja, žiroskope, raznovrsne senzore za pritisak, štampače i glave za mlazne (ink džet) štampače.

Osnovne ideje za razvoj i primenu MEMS

Tri su osnovne ideje za razvoj i primenu MEMS:

1. minimizacija postojećih uređaja (primer proizvodnje žiroskopa na bazi silikona: masa postojećih ure-

đaja od kilograma i zapremine od 1 dm³ smanjena je na čip mase nekoliko grama i zapremine 0,5 cm³),

2. primena principa i otkrića moderne fizike (bio-čipovi koji koriste električno polje za doziranje reaktanta oko čipa, na osnovu elektro-osmotskog efekta u kanalima prečnika do 1 mm) i

3. primena mikrotehnika (izgradnja i razvoj uređaja kao što su delovi skenirajućeg mikroskopa sa tunelskim efektom, STM i mikroskopa atomskih sila, AFM). MEMS uređaji se primenjuju kao mikrogriperi (hvatači) za hvatanje ćelija koje treba analizirati.

MEMS uređaji se primenjuju u [3]:

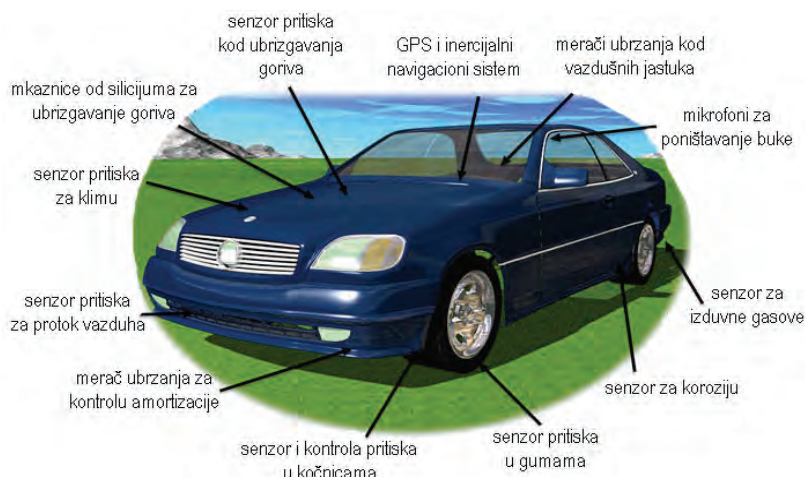
- automobilske industriji (u sistemima vazdušnih jastuka, bezbednosnim sistemima u vozilu, svetlima za kočnice, uređajima za pozicioniranje prednjih farova, detektovanje proklizavanja i automatsko zaključavanje). Na slici 2 prikazani su delovi automobila u kojima se nalaze MEMS uređaji,

- proizvodima široke potrošnje (u aparatima i spravama za sportske treninge, perifernim uređajima za

Tabela 1. Hronološki istorijat otkrića i izgradnje uređaja koji su preteča MEMS

Table 1. Historical overview of most important discoveries for development of MEMS (chronological order)

| Godina | Otkriće, fenomen ili uređaj bitni za razvoj i ugradnju MEMS | Ref. |
|--------|--|-------|
| 1947. | U laboratoriji AT&T Bell je napravljen prvi tranzistor | [1] |
| 1954. | Otkriven je piezootporni efekat silicijuma | [2] |
| 1958. | U kompaniji Texas Instruments napravljeno je prvo integrisano kolo | [2] |
| 1960. | Počinje proizvodnja senzora | [6] |
| 1979. | Dobijene su prve mlaznice za ink-džet patrone (kertridže) procesom mikrofabrikacije | [3] |
| 1988. | Napravljen je prvi mikromotor sa elektrostatičkom površinom | [1] |
| 1994. | Počela je proizvodnja uređaja koji se zasnivaju na digitalnom procesiranju svetla (<i>Digital Light Processing</i> , DLP tehnologija) | [4] |
| 2001. | U kompaniji Apple je proizveden i predstavljen prvi iPod | [2,5] |
| 2006. | Proizveden je uređaj za igrice, Nintendo Wii | [2,5] |
| 2007. | U kompaniji Apple je proizveden i predstavljen prvi iPhone | [2,4] |
| 2010. | Proizveden je prvi iPad | [2,5] |



Slika 2. Primena MEMS u automobilu.

Figure 2. Automotive applications of MEMS.

komputere, navigacionim uređajima za automobile i ličnu upotrebu, u mobilnim aplikacijama),

- industriji (u uređajima za detektovanje zemljotresa, za regulaciju/isključivanje gasa, za testiranje ispravnosti aparata i mašina, registrovanje udara i potresa),

- vojnoj industriji (u uređajima u tenkovima, avionima i opremi za vojnike),

- medicini, biomedicini i biotehnologijama (u koje spadaju i biočipovi za detektovanje opasnih hemijskih i bioloških supstanci, mikrosistemi za DNK identifikaciju, mikrofabrikovani STM uređaji, mikrosistemi za sortiranje i selekciju lekova i bio-MEMS uređaji u medicini i tehnologijama bliskim medicini (od tzv. „laboratorije na čipu“ do biosenzora i hemosenzora)) i

- vazduhoplovstvu i istraživanju svemira (to su merači ubrzanja i žiroskopi za unutrašnju navigaciju, senzori za pritisak, radiofrekventni prekidači i filteri za komunikaciju, harmonična ogledalca za optiku, mikroenergetski izvori i turbine, uređaji za kontrolu pokreta i položaja, bio-reaktori i bio-senzori, uređaji sa mikrofluidima, uređaji sa toplotnom kontrolom i atomski satovi).

Pravci razvoja MEMS do 2017. godine

Tržište MEMS uređaja predstavlja deo velikog tržišta poluprovodničkih čipova, a to je tržište koje pokazuje najbrži rast. U početku je automobilska industrija bila glavni pokretač tržišta za MEMS uređaje, ali se rast ove grane poslednjih godina industrije usporio. S druge strane, novije oblasti primene (primer su oblast medicine, telekomunikacija i proizvodi široke potrošnje) imaju značajniji uticaj na tržište MEMS [7].

Veliki zahtevi tržišta za elektronskim uređajima najnovije generacije, kao što su inteligentni telefoni (*smart phones*) i tablet uređaji utiču na porast proizvodnje i razvoj MEMS. Procena je da će tržište MEMS uskoro dostići nivo od 15-20 milijardi dolara. Ukoliko se u analizu tržišta uključi i oblast mikrofluidike na staklu,

polimerima i SiO₂, kao i digitalni kompasi koji nisu u pravom smislu reči MEMS uređaji, ali se sve više integrišu sa njima, predviđanja su da će godišnji finansijski rast biti oko 15, a čak 20% kada je reč o količini proizvedenih MEMS uređaja. Ako se razmatraju glavni MEMS uređaji, tržište za radiofrekventne (RF) MEMS uređaje će imati najveći rast (50%), zatim slede čipovi sa mikrofluidikom koji služe za distribuciju lekova (42%), mikrofoni na bazi silicijuma (32%), čipovi sa mikrofluidikom za dijagnostiku (23%), mikrosonde i mikrošpricevi (22%) i mikrobolometri (20%) [8].

MEMS u proizvodima široke potrošnje, mobilne aplikacije, na primer iPhone, iPad i iPod, koji su prikazani na slici 3, predstavljaju 50% ukupne količine MEMS uređaja. U 2012. godini je proizvedeno 7 milijardi MEMS uređaja, što predstavlja rast od 17% u odnosu na 2011. godinu, a čak 54% u odnosu na 2010. godinu.

Detekcija pomeraja (rotiranje ekrana od vertikalnog ka horizontalnom položaju) je našla široku primenu u mobilnim telefonima, pejsmejerima, inteligentnoj municiji što je uslovalo rast potražnje i proizvodnje merača ubrzanja, žiroskopa i elektronskih kompasa. MEMS mikrofoni se ugrađuju u mobilne telefone i zamenjuju do skora korišćene mikrofone na bazi elektrokondenzatora. Mikrofoni, merači ubrzanja, žiroskopi i magnetometri čine više od polovine svih MEMS uređaja napravljenih u 2011. godini [8].

Razvoj novih MEMS

Razvoj novih MEMS uređaja uključuje termoniti, mikrodispleje, mikroogledala za mobilne telefone i pikoprojektore u tablet uređajima, autofokus, RF MEMS prekidače i promenljive kondenzatore za mobilne uređaje, oscilatore, mikrozvučnike. Primena MEMS zapravo nema ograničenja. Tržišta novih MEMS uređaja će intenzivno rasti, a procenjeni rast u sledećem petogodišnjem periodu je najveći za mikroogledala koji se koriste za mobilne telefone i pikoprojektore u tablet



Slika 3. Proizvodi široke potrošnje u kojima se koriste MEMS uređaji: a) iPhone i iPad i b) iPod.
Figure 3. Consumer/mobile MEMS applications: a) iPhone and iPad and b) iPod.

uređajima, za RF MEMS prekidače i promjenljive kondenzatore za mobilne uređaje, za oscilatore, za termoiniti i za MEMS uređaje kao što su mikrozvučnici [8].

TEHNOLOGIJE I POSTUPCI ZA PROIZVODNJU MEMS

Proizvodnja MEMS proističe iz procesnih tehnologija razvijenih u proizvodnji poluprovodnika kao što su: depozicija slojeva materijala, fotolitografija za dobijanje šablona i nagrizanje za dobijanje željenih završnih formi. MEMS odlikuje velika vrednost odnosa površina/zapremina (takozvanog „aspekt odnosa“), pa su površinski efekti (kao što su kvašenje i elektrostatički efekti) dominantni u odnosu na zapreminske efekte (kao što su inercija i toplotna energija) [9].

Procesne tehnologije, razvijene za dobijanje poluprovodnika koriste se i za proizvodnju MEMS uređaja od kojih su tri najčešće primjenjivane:

- I. mikrofabrikacija u masi,
- II. mikrofabrikacija površine i
- III. LIGA proces.

Ove tehnologije su bile predmet intenzivnih istraživanja i razvijale su se u poslednjih dvadeset pet godina, a podrobno su opisane u literaturi [1,6,9–13].

Proces mikrofabrikacije u masi

Mikrofabrikacija u masi se zasniva na tehnikama nagrizanja pripremljenih silikonskih slojeva (pravac je od vrha ka dnu) sa ciljem da se stvore trodimenzionalne (3D) MEMS strukture [11]. To je proces u kojem mogu da se koriste mokri anizotropni postupak ili suvi postupak nagrizanja (pomoću reaktivnih jona, RIE – *reactive ion etching*), kako bi se dobile velike šupljine, brazde i kanali [4,9]. Materijali koji se koriste u mokrom postupku nagrizanja su silicijum i kvarc, dok se u postupku suvog nagrizanja koriste silicijum, metali, polimeri i keramika [11].

Mokri postupak nagrizanja

Kod mokrog postupka nagrizanja material se potapa u hemijsko sredstvo za nagrizanje [13] koje može biti izotropno (smeša HF, HNO₃ i CH₃COOH) ili anizotropno (KOH) [14]. Anizotropna sredstva za nagrizanje imaju svojstvo da brže nagrizaju u željenom pravcu. Brzina nagrizanja i kvalitet dobijene površine zavise od hemijskog sastava i kristalne orijentacije supstrata [15].

Suvi postupak nagrizanja

Kod suvog postupka nagrizanja koristi se plazma – joni se ubrzavaju i usmeravaju ka materijalu koji treba da se nagrije obezbeđujući energiju potrebnu za reakciju [4]. Najčešći korišćeni postupak za dobijanje MEMS struktura je nagrizanje pomoću reaktivnih jona (RIE) primenom dopunske energije radio frekvencija [16–18].

Proces površinske mikrofabrikacije

Kod površinske mikrofabrikacije, trodimenzionalne strukture se dobijaju simultanim dodavanjem ili uklanjanjem slojeva tankih filmova na površinu strukture [2,4]. Slojevi čiji se delovi uklanjaju su nazvani „žrtveni“ slojevi, a nanose se i zatim uklanjaju sa strukturnih slojeva da bi se formirale mehaničke rupe ili otvori između strukturnih slojeva [11]. Materijali koji se najčešće koriste za filmove kod površinskog mikroprocesiranja MEMS i tradicionalnih mikroelektričnih uređaja su silicijum-dioksid, silicijum-nitrid, polikristalni silicijum-dioksid (polisiloksan) i metali.

Dubinsko nagrizanje pomoću reaktivnih jona (DRIE)

Metoda dubinskog nagrizanja pomoću reaktivnih jona (DRIE – *deep reactive ion etching*) uključuje alternativni proces nagrizanja struktura jonizujućim gasom tzv. plazmom velike gustine (kao kod RIE), kao i postupak deponovanja polimera kao zaštitnog sloja, pa je odnos površina/zapremina mnogo više izražen [11].

LIGA i UV-LIGA procesi

LIGA je trostepeni proces – sastoji se od litografije X-zracima, galvanizacije i polimernog kopiranja-repliciranja [19]. Naziv procesa je nastao kao nemački akronim od slova LI (*Roentgen Litographie*, odnosi se na litografiju X-zracima), G (*Galvanik*, odnosi se na proces galvanizacije) i A (*Abformung*, odnosi se na modelovanje (izlivanje) struktura, koje imaju velike vrednosti aspekt odnosa, od potpuno različitih materijala). U poslednje vreme LIGA proces je prerastao u dvostepeni proces – sastoji se od litografije X-zracima i galvanizacije. U ovoj tehnici se debeli slojevi fotootpornog materijala izlažu dejstvu X ili UV zraka da bi se dobile matrice, koje se zatim koriste za formiranje trodimenzionalnih struktura sa velikim odnosom površina/zapremina, elektrolitičkom depozicijom [20]. Materijali koji se koriste u LIGA procesu za litografiju X-zracima su poli(metil metakrilat) (PMMA) i epoksidne smole, a u UV-LIGA procesu se pored epoksidnih smola koriste i materijali osetljivi na UV zračenje [21]. Pomoću LIGA procesa mogu da se dobiju mikrostrukture, koje su manje od onih dobijenih konvencionalnim procesima fabrikacije, a veće od površinski mikrofabrikovanih delova.

MATERIJALI

MEMS i delovi za MEMS uređaje proizvode se od silicijuma, polimera, metala, keramike i kompozitnih materijala.

Silicijum je, kao materijal koji se koristi za proizvodnju integrisanih kola, najzastupljeniji u modernom svetu. Dostupnost finansijski povoljnih visokokvalitetnih materijala i mogućnost ugrađivanja elektronske

funktionalnosti, omogućile su da silicijum bude atraktivan za široku primenu kod MEMS aplikacija [4,10,22].

Iako se veliki deo elektronske industrije oslanja na industriju silicijuma, proizvodnja kristalnog silicijuma je još uvek kompleksna i relativno skupa. Pored toga što je krto i nefleksibilan, silicijum mora da se prečisti pre primene. Zamena za silicijum su polimeri, jer mogu da se proizvode u velikim količinama uz raznovrsne karakteristike.

Polimeri se intenzivno koriste kao strukturni i funkcionalni materijali za mikrouređaje. Osnovne prednosti polimera su elastičnost, optička svojstva i biokompatibilnost. Različiti polimerni uređaji se prave od tankih i/ili debelih polimernih filmova i trodimenzionalnih (3D) polimernih mikrostrukture. Neki polimeri koji se koriste su polimididi [23–25], polisiloksani (na primer poli(dimetil siloksan) – PDMS) [26,27], epoksidne smole (na primer SU-8) [28–35], poli-*p*-ksilen tzv. parilen C [36–38], poliuretani, polisulfoni, polimetakrilati [39], silikonske gume, poliakrilati, poliestri i polikarbonati. Ovi polimeri mogu takođe da se koriste za konstrukciju osetljivih i pokretnih komponenti za MEMS, kao što su mikrosenzori i mikropokretači. Procesi koji se koriste za dobijanje MEMS uređaja su injekciono brizganje, utiskivanje ili stereolitografija. Polimeri su kao materijali posebno pogodni za primenu u mikrofluidici [40–48] (primer su patrone za jednokratnu upotrebu pri testiranju krvi).

Metali za proizvodnju MEMS elemenata su zlato, nikl [49], bakar, volfram, aluminijum, hrom, titan, platina i srebro.

Keramički materijali koji se sve više koriste za proizvodnju MEMS su nitridi silicijuma [50], aluminijuma i titana, kao i silicijum-karbid [51,52].

MIKROSENZORI I MIKROPOKRETAČI

Najznačajniji i najinteresantniji elementi MEMS sistema su mikrosenzori i mikropokretači. To su uređaji koji konvertuju energiju iz jednog oblika u drugi. Kod mikrosenzora, tipično je da uređaj pretvara mereni mehanički signal u električni signal. Mikrosenzori takođe mogu da detektuju promene u okolini merenjem toplotnih, magnetnih, hemijskih ili elektromagnetnih efekata. Ove informacije se obrađuju pomoću mikroelektronike, koja daje signal mikropokretačima da reaguju u vidu promene prema okolini.

Mikrosenzori

Poslednjih decenija razvijeni su brojni mikrosenzori koji omogućavaju očitavanje temperature, pritiska, inercijalnih sila, hemijskih vrsta, magnetnih polja, zračenja [3,25,53–57]. Sposobnost MEMS senzora da mere različite parametre se zasniva na ograničenom broju mehanizama pretvaranja koji su kompatibilni sa procesom minimizacije, a u koje spadaju piezootporni [53],

kapacitivni [54], piezoelektrični [55,56] i u nekoliko slučajeva induktivni efekat.

Tri osnovna tipa senzora su: senzori za pritisak (piezootpornost), hemijski senzori (kapacitivnost) i inercijalni senzori (akcelerometri zasnovani na kapacitivnom efektu i žiroskopi zasnovani na piezoelektričnom efektu).

MEMS senzori za pritisak koriste fleksibilnu dijafragmu za detektovanje promene. Ovaj tip senzora je našao veliku primenu u automobilskoj industriji (pritisak u gumama, ulju i gorivu, merenje protoka vazduha i u vazдушnim jastucima), u biomedicini (za merenje krvnog pritiska, kod endoskopa, infuzionih pumpi i mikrosenzori koji se ugrađuju unutar lobanje). Barometarski mikrosenzori za pritisak se koriste za praćenje vremenskih prilika, kao i u tunelima gde ima vetra. Milioni MEMS senzora za pritisak se ugrađuju u putnu infrastrukturu za dobijanje i skupljanje podataka o uslovima na putevima. Primenuju se u raznim oblastima, od sporta preko igrice široke potrošnje (*Playstation*) do vazdušnog prostora i svemira.

U inercijalne MEMS senzore spadaju merači ubrzanja i žiroskopi pomoću kojih se mere promene u ubrzanju, vibraciji, orijentaciji i nagibu. Najjednostavniji MEMS senzor merač ubrzanja je inercijalna masa koja je zakačena za opruge. Pri ubrzanju, dolazi do otklona mase od polazne pozicije što se prevodi u električni signal. MEMS žiroskopi imaju oblik diska ili točka koji rotira. Kod pojedinih MEMS žiroskopa koriste se vibrirajuće strukture umesto tradicionalnih rotirajućih diskova. U automobilu se inercijalni senzori koriste kod vazdušnih jastuka, za navigaciju, podešavanje i pozicioniranje visine prednjih farova, sistem protiv krađe, za izbegavanje sudara i detektovanje proklizavanja. Takođe se primenuju kod merenja i detektovanja vibracija, nagiba, pokreta i udara, a koriste se kod uređaja za zumiranje u kompjuterima, kao stabilizatori slike u telefonima i kamerama i za igrice.

Hemijski senzori

Minijturni senzori dobijeni mikrofabrikacionim procesima mogu da se koriste za detektovanje gasova, u medicinskim, biomedicinskim i biohemijskim analizama, kod kontrole kvaliteta i procesa. Razvijeni su izuzetno osetljivi postupci mehaničke konverzije bio- (hemijskih) ili fizičkih procesa u signale koji mogu da se zabeleže, korišćenjem mikrofabrikovanih senzora.

Senzori su konzole (štapići pravougaonog oblika debljine ne veće od 1 μm) koje su najčešće napravljene od silicijuma [57]. Adsorpcija molekula na površini ovih mikromehaničkih konzola (funkcionalizovanih receptorskim molekulima) izaziva savijanje konzole usled površinskog naprezanja. Konzolni senzori mogu da se koriste u sredinama kao što su vakuum, vazduh ili razne tečnosti. Glavne prednosti ovih minimizovanih senzora

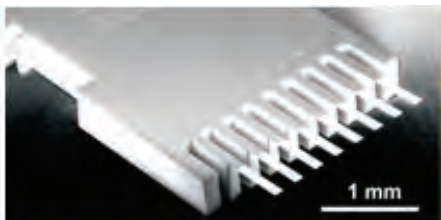
su njihova mala veličina, kratak vremenski odziv, velika osetljivost i direktno prevođenje pobude u odziv.

Mikrofabrikovane konzole se uglavnom koriste kao senzori sile za snimanje topografije površine korišćenjem tehnika kao što su SFM (skenerajuća mikroskopija sila) [58] i AFM [59]. Kod ovih metoda se koristi konzola sa oštrim šiljkom koji skenira površinu uzorka (piezoelektrični skener). Šiljak na konzoli može da bude u direktnom kontaktu sa površinom (kontaktni) ili da osciluje i bude u interakciji sa površinom u jako kratkim intervalima tokom oscilatornog ciklusa (dinamički, nekotaktni). Savijanje konzole se meri optičkim detektovanjem pozicije skrenutog laserskog zraka na vrhu konzole ili merenjima piezootpornih deformacija. Interakcija vrha konzole sa površinom je uobičajena kod svih SFM tehnika.

AFM se razvila u najjači i najsvestraniji instrument za karakterisanje površine na molekulskom i atomskom nivou. Metode su dobro razvijene i intenzivno se primenjuju.

Korišćenjem konzola u nizu koje su prevučene slojem osetljivim na specifične molekule dobijaju se ultrasetljivi nanomehanički senzori za detektovanje hemijskih ili biohemijskih reakcija u gasnoj fazi i tačnom okruženju [57]. Prevučeni sloj može da bude potpuno ili delimično osetljiv za prepoznavanje pojedinih molekula. Ukoliko je svaka od konzola u nizu prevučena različitim (delimično specifičnim) senzorskim slojem, može da se dobije odziv za različite analite [60].

Kod senzora prikazanog na slici 4 gornja površina konzola je prevučena slojem titana (debljine 2 nm) i slojem zlata (debljine 20 nm) da bi se obezbedila refleksija površine i omogućila adsorpcija funkcionalnih grupa molekula iz probnih uzoraka. Uticaj tankih metalnih slojeva na naprezanje konzole je zanemarljiv pri konstantnoj temperaturi. U gasnoj sredini, ova konfiguracija može da se koristi kao „veštački nos“ za prepoznavanje i karakterisanje isparljivih mirisa i para [60]. U tačnoj sredini, konzolni senzori omogućavaju brzo, kvantitativno i kvalitativno detektovanje neobebeženih biomolekula (na primer specifičnih delova DNK, kod molekulskog prepoznavanja antitelo–antigen i protein–protein) [61].



Slika 4. SEM slika senzora na bazi silicijuma sa osam konzola u nizu (dimenzija konzole 500/100/0,5 μm dužina/širina/debljina). Figure 4. Scanning electron micrograph of a cantilever sensor array (console dimensions 500/100/0.5 μm l/w/t).

Konzolni senzori mogu da se koriste u statičkom, dinamičkom i toplotnom režimu [61,62]. Na slici 5 prikazan je konzolni senzor u statičkom, dinamičkom i toplotnom režimu.

U statičkom režimu se na gornjoj površini konzole nalazi sloj osetljiv na adsorpciju. Površinsko naprezanje tokom procesa adsorpcije utiče na statičko savijanje konzole. U dinamičkom režimu konzola osciluje spolja na svojoj rezonantnoj frekvenci (korišćenjem piezoelektričnog pobuđivača). Konzola može da bude prevučena sa gornje ili donje strane molekulskim slojem osetljivim na adsorpciju. Kada se na konzoli adsorbuje masa, rezonantna frekvencija se pomera ka nižim vrednostima. Iz ovog pomeraja u frekvenciji moguće je izračunati masu koja se adsorbovala na konzoli [61]. Mehanička svojstva konzole se ne menjaju značajno sa adsorbovanjem mase. Promena rezonantne frekvence od 1 Hz, grubo odgovara promeni mase od 1 pg [60].

U toplotnom (bimetalnom) režimu, razlika u koeficijentima toplotnog širenja materijala od kojih je napravljena konzola (uobičajeni materijal je kristalni Si koji je prevučen metalnim slojem debljine 100 nm na jednoj od površina) izaziva savijanje konzolnog senzora, ako se temperatura promeni. Promena temperature od 10^{-5} K izaziva skretanje konzole od nekoliko nm. Piezootporne mikrokonzole u nizu mogu da se koriste za pobuđivanje i za čuvanje podataka.

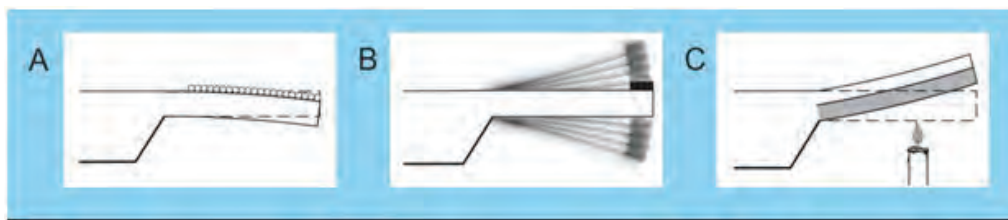
Mogućnosti primene konzolnih senzora su velike, a osnovni pravci razvoja su usmereni ka:

1. detektovanju para i isparljivih komponenata pomoću pojedinačnih konzola koje se koriste u statičkom režimu [61,63],
2. primeni za detektovanje gasne faze kod rastvarača korišćenjem piezootpornih konzola [60],
3. biohemijskoj primeni u statičkom režimu [64] (senzor za glukozu) i
4. detektovanju proteina pomoću piezootpornih konzola koje rade u dinamičkom režimu [61,65].

Razvijeni su mikrokonzolni senzori kao detektori za eksplozive [66] i za bakteriju *Escherichia coli* [67]. Kada se mikrokonzola prevuče slojem hidrogela dobija se pH mikrosenzor [64]. Teorija adsorpcije molekula na mikrokonzole [68], kao i elektrohemijske redoks reakcije [69] su opisane u literaturi.

MEMS senzori mogu da se koriste u kombinaciji sa drugim sensorima. Na primer MEMS može da se dizajnira sa sensorima tako, da meri protok tečnog uzorka, a u isto vreme da detektuje i najmanju količinu zagađujućih materija, ako ih u uzorku ima.

Razvoj mikrokonzolnih senzora će ići u pravcu tehnoloških primena, odnosno novih načina karakterisanja realnih materijala (primer su klinički uzorci krvi). Razvoj sredstava za medicinsku dijagnostiku će zahtevati povećanje osetljivosti određenog broja genetskih testova koji se obavljaju sa malim količinama tečnih uzoraka



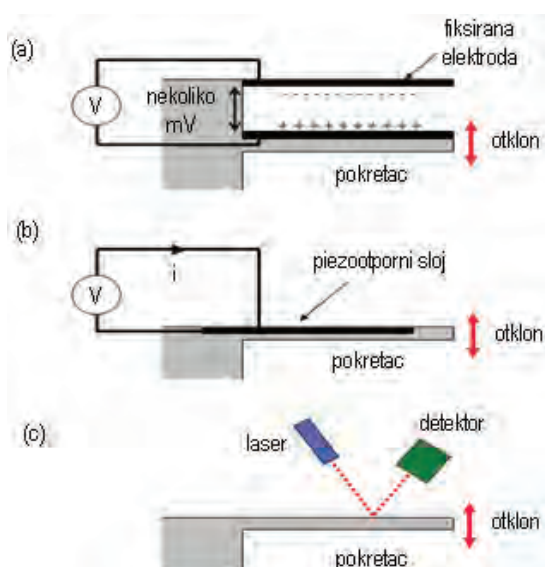
Slika 5. Radni režimi za konzolni senzor: A) režim statičkog savijanja, B) režim dinamičkog rezonovanja i C) toplotno bimetalni režim. Figure 5. Cantilever sensor operating modes: A) static deflection mode, B) dynamic resonance mode and C) bimetallic heat mode.

(krvi ili telesnih tečnosti). Sa naučne strane, izazovi leže u optimizaciji [57,62,65] konzolnih senzora (sa ciljem da se poboljša osetljivost do krajnjih granica – a to je nanomehanička detekcija pojedinačnih molekula [70]). Značajno je to da su mnogi od ovih mikrosenzora pokazali performanse koja prevazilaze performanse svojih makroduplikata.

Mikropokretači

Mikropokretači predstavljaju jednu od osnovnih komponenti MEMS uređaja. Oni mogu da se koriste za mehaničko pokretanje delova uređaja, za merenje određenih fizičko–hemijskih svojstva iz čovekove okoline ili čak da obezbede kretanje robota [71]. U osnovi, mikropojačivači proizvode mehanički otklon kao odziv na pobudu nastalu iz energetskog izvora. Uobičajeni oblici pobude su elektrostatička, toplotna i magnetna. Tehnike koje se koriste za detektovanje mehaničkog otklona zasnivaju se na kapacitivnim, piezootpornim i optičkim efektima [72].

Na slici 6 prikazane su uobičajene tehnike za detektovanje skretanja (otklona) konzole: a) kapacitivna, b) piezootporna i c) optička.



Slika 6. Uobičajene tehnike za detektovanje skretanja (otklona) konzole: a) kapacitivna, b) piezootporna i c) optička. Figure 6. Common techniques of detecting beam deflection: a) capacitive, b) piezoresistive and c) optical.

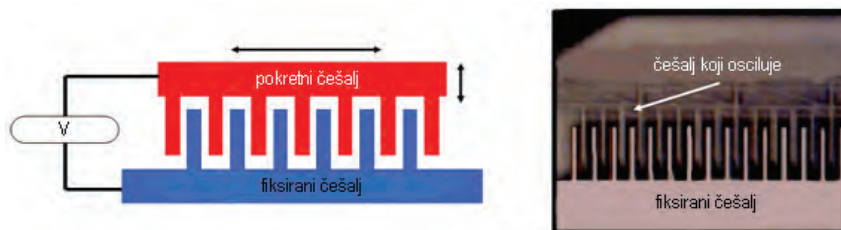
U slučaju elektrostatičke pobude, tehnike kojima se detektuju otkloni zasnovani su na kapacitivnosti. Detektovanje na bazi piezootpornosti zasniva se na korišćenju integrisanih materijala čiji se otpor menja pod dejstvom naprezanja. Postoji nekoliko načina upotrebe izvora svetlosti sa odgovarajućim detektorom koji koriste za registrovanje savijanja mikropojačivača kod optičkog detektovanja otklona.

Jedna od tehnika za primenu senzora zasniva se na upotrebi nekoliko elektrostatičkih pokretača koji se preklapaju. Pokretači se još nazivaju elektrostatički češljevi [73] u skladu s karakterističnim oblikom. Na slici 7 prikazan je elektrostatički češalj-pokretač. Veće preklapanje između stacionarnih i pokretnih naelektrisanih konzola daje veće otklone i jači povratni signal. Elektrostatički češalj pokretači su postali popularan izbor kod savremene primene senzora i pokretača zbog njihove sposobnosti kontrole otklona preko povratne kapacitivnosti i linearno pojačanih signala jednostavnim dodavanjem više prstasto isprepletenih konzola.

Glavne prednosti elektrostatičke pobude su mali utrošak energije, velike sile i gustina energije, koji mogu da se dobiju smanjenjem rastojanja između naelektrisanih ploča. Osnovni princip pobude pod dejstvom toplote je da se oblik i zapremina materijala menjaju pri grejanju ili hlađenju. Veličina promene dimenzija zavisi od koeficijenta toplotnog širenja materijala. Tehnika se zasniva na korišćenju učvršćenih konzola koje mogu da se savijaju pri grejanju. U ovoj geometriji, savijanje može da se ostvari kombinovanjem slojeva dva ili više materijala sa različitim koeficijentima toplotnog širenja. Pri grejanju se svaki sloj širi drugačije, generišući linearnu razliku u naprezanju, a kao rezultat se dobija pobuda u strukturi. U početnim istraživanjima predloženi su toplotni pokretači sa dve pokretne konzole (koje su napravljene od istog materijala, ali su različite debljine). Pokretač se savija pri grejanju, jer se tanji deo konzole širi više nego deblji deo konzole [74]. Koncept pomeranja u jednoj ravni (zasnovan na savitljivim toplotnim pokretačima sa dve uniformne konzole) kasnije je razvijen u smeru dobijanja toplotnih pokretača koji se kreću u dva pravca i to van jedne ravni.

Toplotni bimorfni pokretači

Alternativni pristup korišćenju tehnike „dve konzole” je slaganje slojeva u bimorfnim strukturama [75].



Slika 7. Elektrostatički češalj pokretač. Levo: princip funkcionisanja, desno: u aktivnom – radnom stanju.

Figure 7. Left: operating principal of electrostatic comb drive actuators. Right: video image of electrostatic comb drive actuators in operation.

Toplotna pobuda može da se ostvari provođenjem električne struje kroz integrisani (umetnuti) otpornik u obliku trake ili grejanjem preko spoljnog izvora (optičko grejanje usmerenim laserom ili pomoću ploče koja se kontrolisano greje).

Na slici 8 prikazan je toplotni bimorfni pokretač (TBP) sa integrisanom toplotnom trakom. Ovakve strukture generišu velike otklone pri grejanju usled razlike vrednosti koeficijenta toplotnog širenja materijala od kojih su napravljene. Tehnike za registrovanje otklona kod konzole uključuju integrisane piezootporne elemente, kao i optičke metode detektovanja. Strukture se inicijalno uvijaju na gore u odnosu na supstrat, što je posledica naprezanja koje preostaje između bimornih slojeva (slika 8b).

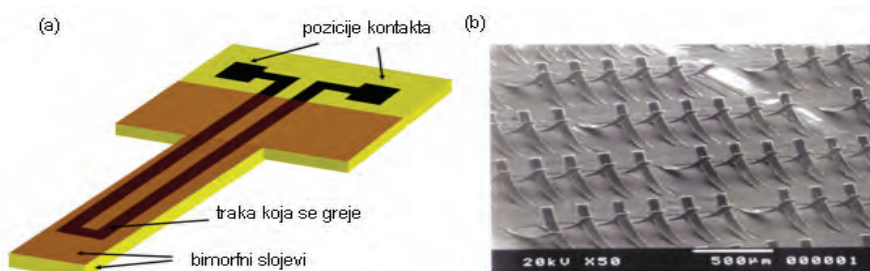
TBP su pogodni za primenu u MEMS/MOEMS uređajima kod kojih su potrebni veliki otkloni van ravni (nekoliko stotina mikrometara) i mala potrošnja energije (nekoliko milivati). Jednu od prednosti predstavlja činjenica da toplotni bimorfi daju skoro linearan odziv na primenjenu silu. TBP koji su zasnovani na „hodajućim“ mikrozočicama počeli su da se razvijaju sredinom poslednje decenije prošlog veka sa ciljem da se primene kod nove generacije MEMS uređaja. Istraživanja su se vodila u pravcu dobijanja velikih otklona mikrooptičkih komponenti [76], u specifičnim AFM merenjima (na primer ćelija raka [77]). Oblast istraživanja toplotnih bimornih pojačivača je široka, a prednosti njihove primene se stalno potvrđuju (koriste se kod barkod skenera, za čuvanje podataka, kao mikroventili, u displej tehnologiji, u optici).

Konvencionalni bimorfni pojačivači su sastavljeni od sloja silicijuma i sloja odgovarajućeg metala [78]. Deponovanje slojeva se odigrava na uslovima visokih temperatura i visokog vakuuma. Ovakvi procesni parametri zahtevaju duže vreme u procesu proizvodnje (pritisak treba da se spusti na zadovoljavajuće nisku vrednost), pa troškovi proizvodnje rastu. Polimeri, s druge strane predstavljaju alternativu konvencionalnim strukturnim materijalima, nudeći niz prednosti kao što su jednostavne metode proizvodnje, koje su brze i finansijski povoljne. Polimeri obezbeđuju izolaciju bilo kog metalnog elementa (koji služi za grejanje), pa su primenljiviji za primenu u vodenim medijumima, kao hemijski ili biološki senzori.

Polimeri mogu da se koriste kao jedan ili dva sloja u bimornim strukturama [78]. Uobičajeno je da se kombinuje jedan sloj polimera (na primer poliimida ili epoksidne smole) sa strukturnim slojem zlata [79,80] ili aluminijuma [78], iako je moguće koristiti i dva različita polimerna (na primer poliimidna) sloja [81]. Ključna stvar za dobijanje ovakvih struktura je specifičan izbor svojstava materijala (sa ciljem da se obezbedi dobar početni otklon van ravni s jedne i osetljivost s druge strane).

Piezoelektrični pokretači

Piezoelektrična pobuda se izaziva električno indukovanim naprezanjem duž piezoelektričnog materijala (na primer kvarca). Složene piezoelektrične konzole obezbeđuju izuzetno dobru kontrolu samog otklona, pa se koriste kod preciznih tehnologija (kod AFM). Piezoelektrični pokretači su razvijani da obezbede velike otklone



Slika 8. Toplotni bimorfni pokretač sa integrisanom toplotnom trakom. a) Šematski prikaz; b) mikrofografija TBP u radu (SEM prikaz).
Figure 8. Thermal bimorph actuator with integrated heater track. a) Schematic view; b) photograph of a TBA system (working mode).

koji mogu da se porede sa onima dobijenim pomoću toplotnih pojačivača ili memorijski oblikovanih legura [4,56].

IZAZOVI, PRAVCI RAZVOJA I ZAKLJUČCI

Sadašnji izazovi za MEMS

U razvoju MEMS minimizacija je najvažniji zadatak, jer se smanjuju troškovi (potrošnja materijala je manja i omogućena je šaržna proizvodnja). Smanjenjem mase i veličine omogućava se smeštanje MEMS na mesta gde tradicionalni sistemi zbog velikih dimenzija ne mogu da se smeste. Najbolji primer za modernu primenu i izazov za dalji razvoj MEMS su merači ubrzanja, koji su se devedesetih godina prošlog veka počeli uspešno koristiti, a danas se razvijaju i unapređuju kao senzori u vazдушnim jastucima, u kvalitetnim kamerama, fotoaparata i sličnim uređajima za stabilizaciju slike, u poslednjim generacijama mobilnih telefona (*smartphone*). Nedavno su razvijeni MEMS mikropretvarači koji sadrže: mikroventile za kontrolu protoka gasa ili tečnosti, optički prekidači ili ogledala koji preusmeravaju ili menjaju snop svetla, nezavisno kontrolisano polje mikroogledala za displeje, mikrorezonatori za različite primene, mikropumpe za ostvarivanje pozitivnog pritiska u fluidu, mikrozakrilca za korigovanje vazdušnih struja na krilu aviona, kao i mnogi drugi. MEMS tehnologije omogućavaju ugradnju smanjenih, „inteligentnih“ komponenti. Široka primena moguća je zbog niskih troškova proizvodnje. Ali procesi mikrofabrikacije u velikom broju slučajeva još uvek nisu konkurentni kada su u pitanju troškovi sa konvencionalnim metodama masovne proizvodnje.

Naučni aspekti

U ovom preglednom radu prikazan je razvoj MEMS tehnologija i uređaja, od polazne ideje koja se javila devedesetih godina prošlog veka do primena u raznim oblastima koje se svakodnevno proširuju. Dat je pregled istorijski bitnih naučnih i tehnoloških dostignuća za razvoj MEMS, kao i pregled tehnika dobijanja materijala od kojih se prave i sastavnih delova MEMS uređaja sa osvrtom na mikrosenzore i mikropokretače.

S naučne tačke gledišta, postoji više izazova u tehnološkom smislu na koje bi se trebalo fokusirati u cilju poboljšanja performansi MEMS-a, a najvažniji su:

- optimizacija fizičko–hemijskih svojstava materijala koji se koriste kao gradivni elementi MEMS uređaja (na primer: uvođenjem novih materijala, hemijskim ili fizičkim modifikovanjem materijala ili njegove površine). Problemi koje bi trebalo rešiti su slaba adhezija materijala za supstrat, pojava apsorpcije i/ili adsorpcije vode, kvašenje površine organskog materijala, odnosno svih efekata koji imaju veliki uticaj na mikrostruk-

turnom nivou (mogući izvor strujnih udara, kratkih spojeva),

- ispitivanje mogućnosti zamene klasičnog silikonskog supstrata MEMS uređaja, novim materijalima (na primer polimerima),

- proširenje primene MEMS uređaja (mikrosenzora i mikropokretača) na nivo ultrasetljivog detekovanja komponenti (na molekulskom nivou) i

- modifikacija i optimizacija postojećih tehnoloških postupaka dobijanja MEMS uređaja nove generacije

U sledećem periodu akcenat istraživanja grupe sa TMF [82–92], biće optimizacija svojstava materijala (različitih tipova polimera) od kojih su napravljeni MEMS uređaji, mikrosenzori i mikropokretači, a najveći doprinos u radu očekuje se u izgradnji fleksibilnih mikrokonzola. Odgovarajućim izborom materijala za polimerne bimorfne konzole optimizovaće se njegove performanse, sa ciljem da se proširi oblast primene nove generacije MEMS uređaja. Dobijanje super hidrofobnih slojeva kao novih materijala u cilju zaštite organskog supstrata od vlage (kako bi se sprečila adsorpcija/aporpcija vode i neželjeni efekti kao što su kratki spojevi) i razvoja novih polimernih materijala modifikacijom unutar strukture polimera jedan je od važnijih pravaca istraživanja.

Predviđanja i razvoj MEMS u budućnosti

Pravci razvoja MEMS i bio-MEMS tehnologija u budućnosti će biti usmereni i oslonjeni na multidisciplinarnu naučnu timove sastavljene od stručnjaka iz oblasti elektro, mašinskog i hemijskog inženjerstva, kao i naučnika iz oblasti fizike i materijala, kliničke medicine i biohemije, i na njihovu kreativnu razmenu znanja. Ovakvim pristupom bi se omogućio razvoj i primena MEMS i bio-MEMS sistema u pravcu iznalaženja novih metoda, primarno, iz oblasti koja sjedinjuje naučni interes i interes čoveka za zdrav i kvalitetan život, to je oblast medicinskog dijagnostifikovanja jer su MEMS sistemi osetljivi, selektivni, brzi, finansijski povoljni i lako primenljivi. MEMS sistemi se lako mogu prilagoditi i za novi pristup u korišćenju lekova. U tradicionalnim oblastima poput elektronske industrije, integracija MEMS sa mikroprocesorima i postojećim tehnologijama omogućiće stvaranje nove generacije interaktivnih, kompaktnih, mobilnih uređaja (kao što su na primer inteligentni mobilni telefoni i interaktivne konzolne igre). Nove primene MEMS i nanotehnologija se očekuju već u narednim godinama, a razvoj će ići u pravcima koji se mogu nazreti na osnovu današnjih, poznatih i definisanih saznanja, ali će svakako razvoj biti uslovljen novim znanjima i budućim tehnologijama.

LITERATURA

- [1] C.W. Pouton, Formulation of poorly water-soluble drugs for oral administration: physicochemical and physio-

- logical issues and the lipid formulation classification system, *Eur. J. Pharm. Sci.* **29** (2006) 278–287.
- [2] M. Kahlweit, *Microemulsions*, *Annu. Rep. Prog. Chem., C* **95** (1999) 89–115.
- [3] J. Sjöblom, R. Lindbergh, S.E. Friberg, *Microemulsions - phase equilibria characterization, structures, applications and chemical reactions*, *Adv. Colloid Interfac.* **65** (1996) 125–287.
- [4] R. Strey, *Microemulsion microstructure and interfacial curvature*, *Colloid Polym. Sci.* **272** (1994) 1005–1019.
- [5] C.J.H. Porter, C.W. Pouton, J.F. Cuine, W.N. Charman, *Enhancing intestinal drug solubilisation using lipid-based delivery systems*, *Adv. Drug Delivery Rev.* **60** (2008) 673–691.
- [6] J.A. Yáñez, S.W.J. Wang, I.W. Knemeyer, M.A. Wirth, K.B. Alton, *Intestinal lymphatic transport for drug delivery*, *Adv. Drug Delivery Rev.* **63** (2011) 923–942.
- [7] R. Holm, A. Müllertz, H. Mu, *Bile salts and their importance for drug absorption*, *Int. J. Pharm.* (2013), doi: 10.1016/j.ijpharm.2013.04.003.
- [8] K. Kawakami, *Modification of physicochemical characteristics of active pharmaceutical ingredients and application of supersaturatable dosage forms for improving bioavailability of poorly absorbed drugs*, *Adv. Drug Delivery Rev.* **64** (2012) 480–495.
- [9] Nacionalni registar lekova, NRL 2012. Agencija za lekove i medicinska sredstva Srbije, Beograd, 2012.
- [10] *European Pharmacopoeia*, seventh ed., Council of Europe, Strasbourg, 2010.
- [11] M. Meloun, S. Bordovská, L. Galla, *The thermodynamic dissociation constants of four non-steroidal anti-inflammatory drugs by the least-squares nonlinear regression of multiwavelength spectrophotometric pH-titration data*, *J. Pharmaceut. Biomed.* **45** (2007) 552–564.
- [12] H. Potthast, J.B. Dressman, H.E. Junginger, K.K. Midha, H. Oeser, V.P. Shah, H. Vogelpoel, D.M. Barends, *Bio-waiver Monographs for Immediate Release Solid Oral Dosage Forms: Ibuprofen*, *J. Pharm. Sci.* **94** (2005) 2121–2131.
- [13] B.A. Khan, S. Bakhsh, H. Khan, T. Mahmood, A. Rasul, *Basics of Self Micro Emulsifying Drug Delivery System*, *Journal of Pharmacy and Alternative Medicine*, 2012 (dostupno na: www.iiste.org).
- [14] H. Araya, S. Nagao, M. Tomita, M. Hayashi. *The novel formulation design of self-emulsifying drug delivery systems (SEDDS) type O/W microemulsion I: enhancing effects on oral bioavailability of poorly water soluble compounds in rats and beagle dogs*, *Drug. Metab. Pharmacokinet.* **20** (2005) 244–256.
- [15] B.B. Subudhi, S. Mandal, *Self-Microemulsifying Drug Delivery System: Formulation and Study Intestinal Permeability of Ibuprofen in Rats*, *J. Pharm.* (2013), Article ID 328769 (<http://dx.doi.org/10.1155/2013/328769>).
- [16] *The United States Pharmacopoeia*, 30/National Formulary 25, *Pharmacopoeia Convention Inc.*, Rockville, MD, 2007.
- [17] M.J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2002.
- [18] R.Ghodssi, L. Pinyen: *MEMS Materials and Processes Handbook*, Springer, New York, 2011.
- [19] F. Chollet, H. Liu, *A Short Introduction to MEMS*, CC Publ. Franche-Comte, France, 2011.
- [20] G. Jia, M.J. Madou, *MEMS Fabrication*, in M. Gad-el-Hak (Eds.), *The MEMS Handbook*, 2nd ed., Vol. 2: MEMS Design and Fabrication, CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL, 2006.
- [21] M.R. Douglass, *DMD Reliability: A MEMS Success Story*, *Proceedings of the Reliability, Testing and Characterization of MEMS/MOEMS II*, Bellingham, WA, 2003.
- [22] S.A. Campbell, *Fabrication Engineering at the Micro- and Nanoscale*, Ch. 12, Oxford University Press, New York, 2008.
- [23] J.-C. Eloy, *MEMS market outlook*, Yole Development, 2011.
- [24] J.-C. Eloy, *MEMS market outlook*, Yole Development, 2012.
- [25] N. Maluf, *An introduction to micro-electro-mechanical systems engineering*, Artech House, Boston, 2000.
- [26] K.A. Reinhardt, W. Kern (Eds.), *Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology*, 2nd ed., William Andrew, Norwich, NY, 2008.
- [27] M. Gad-el-Hak (Ed.), *MEMS: Design and Fabrication*, Chapter 3, CRC Press, Boca Raton, FL, 2006.
- [28] H. Geng (Ed.), *Semiconductor Manufacturing Handbook*, Chapter 11, McGraw-Hill, New York, NY, 2005.
- [29] T. Ohmi (Ed.): *Scientific Wet Process Technology for Innovative LSI/FPD Manufacturing*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2006.
- [30] A. Goyal, V. Hood, S. Tadigadapa, *High speed anisotropic etching of Pyrex for microsystems applications*, *J. Non-Cryst. Solids* **352** (2006) 657–663.
- [31] K.R. Williams, K. Gupta, M. Wasilik: *Etch rates for micromachining processing – Part II*, *J. Micromech. Syst.* **12** (2003) 761–778.
- [32] H. Liu, F. Chollet, *Layout Controlled One-Step Dry Etch and Release of MEMS Using Deep RIE on SOI Wafer*, *IEEE/ASME J. MEMS* **15** (2006) 541–547.
- [33] K. Breitschwerdt, V. Becker, F. Laermer, A. Schilp, *Device and Method for Etching a Substrate by using an Inductively Coupled Plasma Patent 6,709,546 and 7,094,706*, Office, U.S.P., US (2004).
- [34] K.O. Abrokwah, P.R. Chidambaram, D.S. Boning, *Pattern based prediction for plasma etch*, *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* **20** (2007) 7–86.
- [35] J. Goettert, *The LIGA Process, A Fabrication Process for High-Aspect-Ratio Microstructures in Polymers, Metals, and Ceramics*, In S. Soper, W. Wang (Eds.), *BioMEMS: Technologies and Applications*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2006, pp. 46–94.
- [36] Y. Desta, J. Goettert, *X-ray Mask for LIGA Microfabrication*, In V. Saile, U. Wallrabe, O. Tabata, J.G. Korvink (Eds.), *LIGA and Its Applications*, *Advanced Micro & Nanosystems*, Vol. 7, Wiley-VCH, New York, 2009.
- [37] U. Gengenbach, I. Sieber, U. Wallrabe, *Design for LIGA and Safe Manufacturing*, in: O. Brand, G. Fedder, C. Hierold, J. Korvink, O. Tabata (Eds.), *Advanced Micro &*

- Nanosystems, Vol. 7, LIGA and Its Applications, Wiley-VCH, Weinheim, 2009.
- [38] S.B. Patil, T. Adrega, V. Chu, J.P. Conde, Thin film silicon MEMS microresonators fabricated by hot-wire chemical vapor deposition, *J. Micromech. Microeng.* **16** (2006) 2730–2735.
- [39] A. Georgiev, E. Spassova, J. Assa, G. Danev, Preparation of Polyimide Thin Films by Vapour Deposition and Solid State Reactions, *Polymer Thin Films*, Abbass A Hashim ed., 2010.
- [40] A. Georgiev, D. Dimov, E. Spassova, J. Assa, P. Dineff, G. Danev, Chemical and Physical Properties of Polyimides: Biomedical and Engineering Applications, in M. Abadie (Ed.): *High Performance Polymers - Polyimides Based – From Chemistry to Applications*, In Tech ed., 2012.
- [41] A. Pashan, Sensor Applications of Polyimides, in: M. Abadie (Ed.), *High Performance Polymers - Polyimides Based – From Chemistry to Applications*, In Tech ed., 2012.
- [42] A.A.S. Bhagat, P. Jothimuthu, I. Papautsky, Photodefinable polydimethylsiloxane (PDMS) for rapid lab-on-a-chip prototyping, *Lab Chip* **7** (2007) 1192–1197.
- [43] H.L. Cong, T.R. Pan, Photopatternable conductive PDMS materials for microfabrication, *Adv. Funct. Mater.* **18** (2008) 1912–1921.
- [44] D. Bachmann, B. Schoberle, S. Kuhne, Fabrication and characterization of folded SU-8 suspensions for MEMS applications, *Sens. Act. A Phys.* **130** (2006) 379–386.
- [45] S. Jiguet, M. Judelewicz, S. Mischler, SU-8 nanocomposite coatings with improved tribological performance for MEMS, *Surf. Coatings Technol.* **201** (2006) 2289–2295.
- [46] Y.L. Wang, J.H. Pai, H.H. Lai, Surface graft polymerization of SU-8 for bio-MEMS applications, *J. Micromech. Microeng.* **17** (2007) 1371–1380.
- [47] P. Abgrall, V. Conedera, H. Camon, SU-8 as a structural material for labs-on-chips and microelectromechanical systems, *Electrophoresis* **28** (2007) 4539–4551.
- [48] A. Mata, A.J. Fleischman, S. Roy, Fabrication of multi-layer SU-8 microstructures, *J. Micromech. Microeng.* **16** (2006) 276–284.
- [49] S.L. Tao, K.C. Papat, J.J. Norman, Surface modification of SU-8 for enhanced biofunctionality and nonfouling properties, *Langmuir* **24** (2008) 2631–2636.
- [50] M. Joshi, N. Kale, R. Lal, A novel dry method for surface modification of SU-8 for immobilization of biomolecules in bio-MEMS, *Biosens. Bioelectron.* **22** (2007) 2429–2435.
- [51] D. Sameoto, S.H. Tsang, I.G. Foulds, Control of the out-of-plane curvature in SU-8 compliant microstructures by exposure dose and baking times, *J. Micromech. Microeng.* **17** (2007) 1093–1098.
- [52] S.W. Youn, H. Goto, M. Takahashi, Thermal imprint process of parylene for MEMS applications, *Key Eng. Mater.* **340–341** (2007) 931–936.
- [53] E. Meng, P.Y. Li, Y.C. Tai, A biocompatible parylene MEMS thermal flow sensing array, *Sens. Act., A Phys.* **144** (2008) 18–28.
- [54] P.J. Chen, D.C. Rodger, R. Agrawal, Implantable micromechanical parylene-based pressure sensors for unpowered intraocular pressure sensing, *J. Micromech. Microeng.* **17** (2007) 1931–1938.
- [55] B. Bilenberg, T. Nielsen, B. Clausen, PMMA to SU-8 bonding for polymer based lab-on-a-chip systems with integrated optics, *J. Micromech. Microeng.* **14** (2004) 814–818.
- [56] K. Tsougeni, A. Tserepi, E. Gogolides, Photosensitive poly(dimethylsiloxane) materials for microfluidic applications, *Microelectron. Eng.* **84** (2007) 1104–1108.
- [57] S. Rajaraman, S.O. Choi, R.H. Shafer, Microfabrication technologies for a coupled three-dimensional microelectrode, microfluidic array, *J. Micromech. Microeng.* **17** (2007) 163–171.
- [58] J.H. Park, Y.K. Yoon, S.O. Choi, Tapered conical polymer microneedles fabricated using an integrated lens technique for transdermal drug delivery, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **54** (2007) 903–913.
- [59] R. Lo, E. Meng, Integrated and reusable in-plane microfluidic interconnects, *Sens. Act., B Chem.* **132** (2008) 531–539.
- [60] P. Abgrall, A.M. Gue, Lab-on-chip technologies: making a microfluidic network and coupling it into a complete microsystem – a review, *J. Micromech. Microeng.* **17** (2007) 15–49.
- [61] P.J. Chen, D.C. Rodger, E.M. Meng, Surface-micromachined parylene dual valves for on-chip unpowered microflow regulation, *J. Microelectromech. Syst.* **16** (2007) 223–231.
- [62] P.J. Chen, D.C. Rodger, M.S. Humayun, Floating-disk parylene microvalves for selfpressure-regulating flow controls, *J. Microelectromech. Syst.* **17** (2008) 1352–1361.
- [63] P.Y. Li, J. Shih, R. Lo, An electrochemical intraocular drug delivery device, *Sens. Act., A Phys.* **143** (2008) 41–48.
- [64] P. Abgrall, A.M. Gue, Lab-on-chip technologies: making a microfluidic network and coupling it into a complete microsystem – a review, *J. Micromech. Microeng.* **17** (2007) 15–49.
- [65] Y. Sverdlov, Y. Rosenberg, Y.I. Rozenberg, R. Zmood, R. Erlich, S. Natan, Y. Shacham-Diamand, The electrodeposition of cobalt-nickel-iron high aspect ratio thick film structures for magnetic MEMS applications, *Microelectron. Eng.* **76** (2004) 258–265.
- [66] A. Kaushik, H. Kahn, A.H. Heuer, Wafer-level mechanical characterization of silicon nitride MEMS, *J. Microelectromech. Syst.* **14** (2005) 359–367.
- [67] J. Zhang, C. Carraro, R.T. Howe, R. Maboudian, Electrical, mechanical and metal contact properties of polycrystalline 3C-SiC films for MEMS in harsh environments, *Surf. Coatings Technol.* **201** (2007) 8893–8898.
- [68] G. Rehder, M.N.P. Carreño, Thermally actuated a-SiC:H MEMS fabricated by a PECVD process, *J. Non-Crystalline Solids* **352** (2006) 1822–1828.
- [69] J.C. Doll, S.-J. Park, B.L. Pruitt, Design optimization of piezoresistive cantilevers for force sensing in air and water, *J. Appl. Phys.* **106** (2009) 064310.

- [70] J.N. Palasagaram, R. Ramadoss, MEMS-capacitive pressure sensor fabricated using printed circuit-processing techniques, *IEEE Sens. J.* **6** (2006) 1374–1375.
- [71] S. Tadigadapa, K. Mateti, Piezoelectric MEMS sensors: state of art and perspectives, *Meas. Sci. Technol.* **20** (2009) 092001.
- [72] P. Muralt, R.G. Polcawich, S. Trolrier-McKinstry, Piezoelectric thin films for sensors, actuators, and energy harvesting, *MRS Bull.* **34** (2009) 658–664.
- [73] A. Boisen, S. Dohn, S.S. Keller, S. Schmid, M. Tenje, Cantilever like micromechanical sensors, *Rep. Prog. Phys.* **74** (2011) 036101.
- [74] G. Julius Vancso, H. Schoenherr, *Scanning Force Microscopy of polymers*, Springer, Berlin, 2010.
- [75] P. Eaton, P. West, *Atomic Force Microscopy*, Oxford University Press Inc., New York, 2010.
- [76] P. Xu, X. Li, H. Yu, M. Liv, J. Li, Self-assembly and sensing group of pre-modified CNTs of resonant micro-cantilevers for specific detection of volatile organic compound vapors, *J. Micromech. Microeng.* **20** (2011) 115003.
- [77] H. Pan, Y. Xu, S. Wu, B. Zhang, J. Tang, Molecular interactions in self-assembly monolayers on gold-coated microcantilever electrodes, *Nanotechnology* **22** (2011) 225503.
- [78] X. Li, D.W. Lee, Integrated microcantilevers for high resolution sensing and probing, *Meas. Sci. Technol.* **23** (2012) 022001.
- [79] N. Nelson-Fitzpatrick, S. Evoy, Highly compliant static micro cantilevers fabricated in gold nanocomposite materials, *J. Micromech. Microeng.* **21** (2011) 115021.
- [80] O. Korostynska, K. Arshak, A. Arshak, E. Gill, P. Creedon, S. Fitzpatrick, Polymer-based microsensors arrays for pH and glucose monitoring, *Key Eng. Mater.* **437** (2010) 354–358.
- [81] M. Godin, V. Tabard-Cossa, Y. Miyahara, T. Monga, P.J. Williams, L.Y. Beaulieu, R. Bruce Lennox, P. Gruffer, Cantilever-based sensing: the origin of surface stress and optimization strategies, *Nanotechnology* **21** (2010) 075501.
- [82] Y. Yang, X. Xia, X. Gang, P. Xu, H. Yu, X. Li, Self-assembling siloxane bilayer on SiO₂ surface of microcantilevers for long term highly repeatable sensing to trace explosives, *J. Micromech. Microeng.* **20** (2010) 050101.
- [83] K.Y. Gfeller, N. Nugaeva, M. Hegner, Micromechanical oscillators as rapid biosensor for the detection of active growth of *Escherichia coli*, *Biosens. Bioelectron.* **21** (2005) 528–533.
- [84] M.Z. Ansari, C. Cho, Thermal characteristics of microcantilever biosensors, in: A. Fred, J. Felipe, H. Gamboa (Eds.), *Biomedical Engineering Systems and Technologies*, Springer, Berlin, 2011.
- [85] F. Tian, J.H. Pei, D.L. Hedden, G.M. Brown, T. Thundat, Observation of the surface stress induced in microcantilevers by electrochemical redox processes, *Ultramicroscopy* **100** (2004) 217.
- [86] Y. Yang, X. Xia, X. Gang, P. Xu, H. Yu, X. Li, Nano-thick resonant cantilever with a novel specific reation-induced frequency-increase effect for ultra-sensitive chemical detection, *J. Micromech. Microeng.* **20** (2010) 055022.
- [87] K. Oldham, J. Pulskamp, R. Polcawich, Thin-film piezoelectric actuators for bio-inspired micro-robotic applications, *Integr. Ferroelectr.* **95** (2007) 54–65.
- [88] D. Yan, A. Khajepour, R. Mansour, Design and modelling of a MEMS bidirectional vertical thermal actuator, *J. Micromech. Microeng.* **14** (2004) 841–850.
- [89] V. Mukundan, P. Ponce, H.E. Butterfield, B.L. Pruitt, Modeling and characterization of electrostatic comb-drive actuators in conducting liquid media, *J. Micromech. Microeng.* **19** (2009) 1–9.
- [90] R. Hickey, D. Sameoto, T. Hubbard, M. Kujath, Time and frequency response of two-arm micromachined thermal actuators, *J. Micromech. Microeng.* **13** (2003) 40–46.
- [91] F. Carta, Y.J. Hsu, J. Sarik, I. Kymissis, Bimorph actuator with monolithically integrated CMOS OFET control, *Org. Electr.* **14** (2013) 286–290.
- [92] G. Lammel, S. Schweiser, P. Renaud, *Optical Microscanners and Microspectrometers using Thermal Bimorph Actuators*, Kluwer Acad. Publ., Boston, MA, 2002.
- [93] J. Henriksson, M.R. Gullo, J. Brugger, Integrated long-range thermal bimorph actuators for parallelizable Bio-AFM applications, *Sens. J.* **13** (2013) 2849–2856.
- [94] S. Mouaziz, G. Boero, R.S. Popovic, Polymer-based cantilevers with integrated electrodes, *J. Microelectromech. Syst.* **15** (2006) 890–895.
- [95] R.H. Ibbotson, R.J. Dunn, V.A. Djakov, P. Ko. Ferrigno, S.E. Huq, Polyimide microcantilever surface stress sensor using low-cost, rapidly-interchangable, spring-loaded microprobe connections, *Microelectron. Eng.* **85** (2008) 1314–1317.
- [96] M.C. Mieux, M.E. McConney, Y.H. Lin, S. Singamaneni, H. Jiang, T.J. Bunning, W. Tsukruk, Polymeric nanolayers as actuators for ultrasensitive thermal bimorphs, *Nano. Lett.* **6** (2006) 730–734.
- [97] J.W.L. Zhou, H.Y. Chan, Tony K.H To, Wen J. Li, Polymer MEMS Actuators for Underwater Micromanipulation, *IEEE-ASME Transactions Mechatronics* **9** (2004) 334–342.
- [98] Lj.V. Rajaković, A New Metodology for Testing and Characterization of Sorption Materials in a gas Flow System Based on Piezoelectric Sensors, Ch. 12, pp. 139–149; N. Akmal, A. Usmani (Eds.), *Polymers in Sensors – Theory and Practice*, ACS Symposium Series 690, ACS Books, Washington DC, 1998.
- [99] I.G. Popović, L. Katsikas, S. Čurović, B. Čosić, Lj.S. Čerović, The thermal degradation of poly(methyl methacrylate)/silicon carbide nanocomposites, *Hem. Ind.* **56** (2002) 478–482.
- [100] A. Onjia, Lj.V. Rajaković, The Potential of Piezoelectric Sensor for Characterization of Activated Carbon Cloth Applied in Adsorption of Phenols from Air, Ch. 15, pp. 168–173; N. Akmal, A. Usmani (Eds.), *Polymers in Sensors – Theory and Practice*, ACS Symposium Series 690, ACS Books, Washington DC, 1998.
- [101] J.M. Filipović, L. Katsikas, I.G. Popović, S. J. Veličković, T.A. Djakov, D.M. Petrović-Djakov, The Thermal Degradation of Some Alkali Metal Salts of Poly(Itaconic acid), *J. Therm. Anal.* **49** (1997) 335–341.

- [102] Lj.V. Rajaković, S.B. Štrbac, Surface Morphology and the Response of Piezoelectric Gas Sensor, *Anal. Chim. Acta* **315** (1995) 83–91.
- [103] T.A. Djakov, I.G. Popović, The Kinetics of the Radical Polymerisation of Di-2-Chloroethyl Itaconate, *Hem. Ind.* **53** (1999) 361.
- [104] Lj.V. Rajaković, M. Bastić, S.A. Tunikova, N.V. Bel'skih, Ya.I. Korenman, Potential of the Application of Piezoelectric Sensor for the Phenol Determination in the Air, *Anal. Chim. Acta* **318** (1995) 77–87.
- [105] S.J. Veličković, M.T. Kalagasidis-Krušić, R.V. Pjanović, N.M. Bošković-Vragolović, I.G. Popović, The diffusion of water in poly(ditetrahydrofurfuryl itaconate), *Polymer* **46** (2005) 7982–7988.
- [106] S. Simić, B.M. Dunjić, S.V. Tasić, B.R. Božić, D.M. Jovanović, I.G. Popović, Synthesis and characterization of interpenetrating polymer networks with hyperbranched polymers through thermal-UV dual curing, *Progr. Org. Coat.* **63** (2008) 43–48.
- [107] L. Katsikas, N. Nišević, M. Ignjatović, V. Adamović, T. Djakov, I. Popović, Radikalna polimerizacija monoetil itakonata, *Hem. Ind.* **57** (2003) 553–558.
- [108] S. Štrbac, M. Nenadović, Lj.V. Rajaković, Z. Rakočević, Chemical surface composition of the polyethylene implanted by Ag⁺ ions studied by phase imaging atomic force microscopy, *Appl. Surf. Sci.* **256** (2010) 3895–3899.

SUMMARY

MIKRO-ELEKTRO-MECHANICAL SYSTEMS (MEMS) – TECHNOLOGY FOR THE 21ST CENTURY

Tatjana A. Djakov, Ivanka G. Popović, Ljubinka V. Rajaković

Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

(Review paper)

Micro-electro-mechanical systems (MEMS) are miniaturized devices that can sense the environment, process and analyze information, and respond with a variety of mechanical and electrical actuators. MEMS consist of mechanical elements, sensors, actuators, electrical and electronics devices on a common silicon substrate. Micro-electro-mechanical systems are becoming a vital technology for modern society. Some of the advantages of MEMS devices are: very small size, very low power consumption, low cost, easy to integrate into systems or modify, small thermal constant, high resistance to vibration, shock and radiation, batch fabricated in large arrays, improved thermal expansion tolerance. MEMS technology is increasingly penetrating into our lives and improving quality of life, similar to what we experienced in the microelectronics revolution. Commercial opportunities for MEMS are rapidly growing in broad application areas, including biomedical, telecommunication, security, entertainment, aerospace, and more in both the consumer and industrial sectors on a global scale. As a breakthrough technology, MEMS is building synergy between previously unrelated fields such as biology and microelectronics. Many new MEMS and nanotechnology applications will emerge, expanding beyond that which is currently identified or known. MEMS are definitely technology for 21st century.

Keywords: Micro-electro-mechanical systems (MEMS) • Sensors • Actuators • Chip