

Potencijalna primena debeloslojne tehnologije u realizaciji mikrogeneratora sa aspekta pouzdanosti

Zdravko Stanimirović, Ivanka Stanimirović

Odeljenje za tehnologije
Institut za elektroniku i telekomunikacije IRITEL a.d. Beograd
Beograd, Republika Srbija
zdravkos@iritel.com; inam@iritel.com

Sažetak—Da bi se bežični uređaji učinili autonomnim intenzivirana su istraživanja vezana razvoj novih, čistih i obnovljivih izvora energije koji prikupljaju energiju iz okolne sredine. Jedno od potencijalnih rešenja se zasniva na konverziji vibracija u električni odziv. Sa pojavom poboljšanog olovo cirkonat titanata (PZT), piezoelektrične keramike sa visokim piezoelektričnim koeficijentima, i uvođenjem pomoćnih slojeva u procese formiranja samostojećih debeloslojnih struktura, tehnologija debelog filma se pridružila grupi tehnologija kojima se mogu realizovati poiezoelektrični mikrogeneratori kojima se mogu napajati razne mikroelektronske naprave. I pored njihove finansijske isplativosti i relativno lake izrade, primena debeloslojnih piezoelektričnih mikrogeneratora je još uvek u eksperimentalnoj fazi zbog problema vezanih za pouzdanost samostojećih debeloslojnih struktura.

Ključne riječi - debeloslojne samostojeće strukture; pomoćni sloj; prikupljanje energije iz okolne sredine

I. UVOD

Razvoj savremenih tehnologija je poslednjih godina doneo intenzivnu integraciju prenosive potrošačke elektronike i bežičnih komunikacionih mreža u svakodnevnom okruženju zahvaljujući stalnom napretku na polju digitalnih procesora. Njihove dimenzije se sve više smanjuju i potrošnja energije je manja sa svakom novom generacijom uređaja koja se pojavi na tržištu. Savremeni trend povezivanja sa okruženjem u cilju povećanja radne efikasnosti i kontrole životne sredine doveo je do većih ulaganja u razvoj bežičnih senzora. Međutim, razvoj tehnologije prenosivih bežičnih uređaja u velikoj meri zavisi od tehnologije baterija koja ugrožava životnu sredinu, a ne pokazuje značajan napredak u pogledu kapaciteta, dimenzija, ciklusa punjenja i pražnjenja. Iz tog razloga su u poslednjoj deceniji intenzivirana istraživanja vezana prikupljanje energije iz okolne sredine (tzv. energy harvesting) čime bi se bežični uređaji učinili autonomnim. Solarna energija je već tradicionalno jedan od glavnih izvora energije kada se radi o autonomnim uređajima. Međutim, u slučajevima kada nije moguće koristiti sunčevu energiju, piezoelektrični koncept nudi alternativno rešenje.

Kada je konverzija vibracija u električni odziv postala aktuelna, pored tehnologije tankog filma i tehnologija debelog

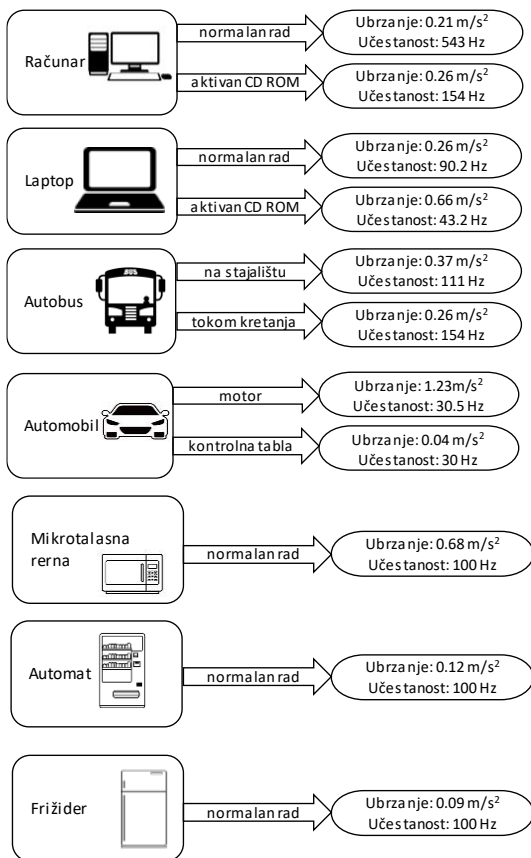
filma se učinila pogodnom za realizaciju minijaturnih samostojećih struktura koje su se mogle koristiti za prikupljanje energije iz okolne sredine zbog kompatibilnosti sa integrisanim kolima na bazi silicijuma. U prethodnom radu koji se bavi ovom tematikom [1] ukratko je dat prikaz realizacije debeloslojnih samostojećih struktura i njihovo poređenje sa strukturama realizovanim tehnologijom tankog filma. Pokazano je da je realizacija pouzdanih debeloslojnih samostojećih struktura naišla na niz prepreka. Iz tog razloga ovaj rad ima za cilj da detaljnije razmotri tehniku formiranja piezoelektričnih mikrogeneratora realizovanih tehnologijom debelog filma kao i pitanja njihove pouzdanosti.

II. DEBELOSLOJNA TEHNOLOGIJA I PRIKUPLJANJE ENERGIJE IZ OKOLNE SREDINE

Konvencionalna debeloslojna tehnologija se već decenijama koristi za realizaciju velikog broja različitih elektronskih sklopova, kako komercijalnih tako i specifičnih. Kada se pojavila, koristila se uglavnom za realizaciju širokog spektra otpornih mreža, a kasnije, i za realizaciju hibridnih integrisanih kola specifične namene. Tokom vremena je interesovanje za primenu ove tehnologije opadalo ali se u poslednje dve decenije pojavilo zanimanje za njenu primenu u realizaciji senzora [2-4], za nove potencijalne primene u mikroelektro-mehaničkim sistemima (MEMS) [5-6] i u poslednje vreme za potencijalnu primenu u prikupljanju energije iz okolne sredine [7-9].

Kada se radi o primeni debeloslojne tehnologije u prikupljanju energije iz okolne sredine trenutno se može koristiti u slučaju konverzije vibracija nastalih radom elektromehaničkih uređaja, prevoznih sredstava i ljudskom aktivnošću u električnu energiju. Vibracije nastale ljudskom aktivnošću se mogu koristiti za napajanje u slučaju nosivih tehnologija (tzv. wearable technology). Međutim, pomoćna medicinska sredstva koja koriste vibracije ljudskog tela ne spadaju u tu kategoriju jer zahtevaju mikrogeneratore manjih dimenzija za koje debeloslojna tehnologija nije adekvatno rešenje. Oko nas se svakodnevno nalaze brojni izvori vibracija različitih učestanosti i nivoa ubzanja koji se mogu upotrebiti za prikupljanje energije iz okolne sredine kojom se mogu napajati razne mikroelektronske naprave. Nekoliko tipičnih primera izvora vibracija je prikazano na slici 1 [8].

Debeloslojni piezoelektrični materijali su se do sada tradicionalno koristili za realizaciju senzora i debeloslojnih MEMS naprava. Tek sa pojavom poboljšanog olovo cirkonat titanata (PZT), piezoelektrične keramike sa visokim piezoelektričnim koeficijentima, tehnologija debelog filma je mogla da bude upotrebljena za realizaciju poiezoelektričnih mikrogeneratora kojima se mogu napajati razne mikroelektronske naprave.



Slika 1. Tipični izvori vibracija

Do sada su realizovani debeloslojni mikrogeneratori u formi samostojećih struktura na podlogama od nerđajućeg čelika [7, 9] i alumine [8-9]. Iskustva su pokazala da kada se pristupa dizajnu, realizaciji i karakterizaciji debeloslojnih struktura ovog tipa, treba uzeti u obzir nekoliko važnih činjenica:

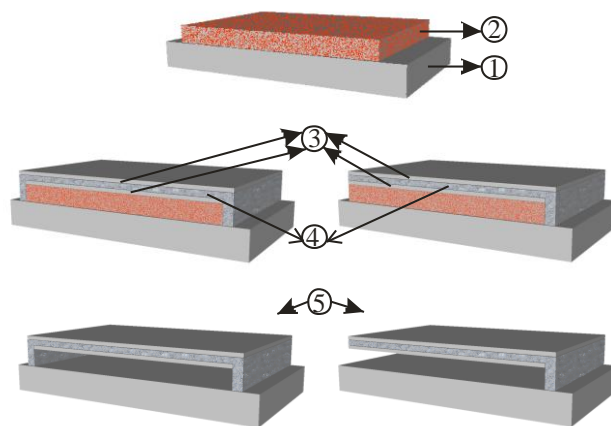
- Potrebno je detaljno poznavanje uslova procesiranja i ograničenja debeloslojne tehnologije, naročito kada je realizacija trodimenzionih struktura u pitanju. Debeloslojna tehnologija uključuje procese koji mogu oštetiti debeloslojne samostojeće strukture na keramičkim podlogama ili dovesti do njihovog katastrofalnog otkaza.
- Zatim, neslaganje koeficijentata termičkog širenja elektrode i piezoelektričnog materijala može uticati na formu samostojeće strukture. Treba imati na umu i da su

keramički materijali koji se koriste kao podloge u debeloslojnoj tehnologiji kruti, što je mana kada je u pitanju naprezanje izazavano radom strukture u modu savijanja.

- I na kraju, važno je dostići minimum električne energije potreban za napajanje mikroelektronske naprave. Keramičke samostojeće strukture imaju visok mehanički Q-faktor (oko 150) i da bi prikupile maksimalnu energiju iz okolne sredine, rezonantna učestanost strukture mora odgovarati prisutnim izvorima vibracija. Nepredvidiva priroda izvora vibracija u okolnoj sredini otežava primenu debeloslojnih samostojećih struktura u prikupljanju energije iz okolne sredine.

III. FORMIRANJE DEBELOSLOJNIH SAMOSTOJEĆIH STRUKTURA

Standardna tehnika koja se koristi za formiranje konvencionalnih debeloslojnih struktura je proces sito-štampe. Sito-štamptom se na podlogu, najčešće alumina keramiku, nanose slojevi različitih materijala, zavisno od tipa strukture koja se realizuje, pri čemu je ovaj proces praćen nivelacijom vlažnih slojeva na sobnoj temperaturi, sušenjem u infracrvenoj konvejserskoj sušnici i žarenjem u konvejserskoj peći. U praksi se tehnologijom debelog sloja najčešće formiraju provodni i otporni debeli slojevi, a vreme i temperature sušenja i žarenja zavise od vrste upotrebljenih materijala. Da bi podržala realizaciju samostojećih struktura (Slika 2) debeloslojna tehnologija je morala da prilagodi svoje tehnike formiranja strukture uvođenjem pomoćnih slojeva i materijala sa izraženim piezoelektričnim svojstvima [10]. Poređenje standardne tehnike sito-štampe, kojom se realizuju konvencionalne strukture, i adaptirane tehnike, kojom se realizuju debeloslojni mikrogeneratori, prikazano je u Tabeli 1.



Slika 2. Debeloslojne samostojeće strukture (1 - keramička podloga, 2 - pomoćni sloj, 3 - elektrode, 4 - PZT slojevi, 5 - samostojeće strukture)

TABELA I.

UPOREĐAN PRIKAZ STANDARDNE TEHNIKE SITO-ŠTAMPE KOJOM SE REALIZUJU KONVENCIONALNE STRUKTURE I ADAPTIRANE TEHNIKE KOJOM SE REALIZUJU DEBELOSLOJNI MIKROGENERATORI

<i>STANDARDNA TEHNIKA SITO-ŠTAMPE</i>	<i>ADAPTIRANA TEHNIKA SITO-ŠTAMPE</i>
Sito-štampa provodnog PdAg sloja, nivelacija na sobnoj temperaturi i sušenje u konvejskoj sušnici u ciklusu od 15 min na temperaturi od 150°C pri čemu iz vlažnih slojeva isparavaju organski rastvarači.	Sito-štampa pomoćnog sloja, nivelacija i sušenje. Potrebno je više puta ponoviti ovaj korak da bi se dobio sloj željene debljine, a vreme i temperatura sušenja zavise od upotrebljenog pomoćnog materijala.
Sito-štampa otpornih slojeva, nivelacija, sušenje u konvejskoj sušnici u ciklusu od 15 min na temperaturi od 150°C, žarenje provodnog i otpornih slojeva u konvejskoj peći u ciklusu od 30 ili 60 min zavisno od tipa kompozitnih materijala sa maksimalnom temperaturom žarenja od 850 °C u trajanju od 10 min.	Sito-štampa debeloslojne provodne PdAg paste pri čemu se formira elektroda koja se potom nivelira na sobnoj temperaturi i suši u konvejskoj sušnici u ciklusu od 15 min na temperaturi od 150°C.
U slučaju višeslojne štampe, sito-štamptom se nanosi više slojeva dielektričnog materijala koji se nakon svakog pojedinačnog nanošenja niveliraju na sobnoj temperaturi, suše u konvejskoj sušnici u ciklusu od 15 min na temperaturi od 150 °C i žare u konvejskoj peći pri čemu temperatura žarenja zavisi od izabrane vrste dielektrika ali je najčešće u pitanju ciklus od 60 min sa maksimalnom temperaturom žarenja od 850 °C u trajanju od 10 min .	Sito-štampa debeloslojnog materijala sa izraženim piezoelektričnim svojstvima, obično materijala na bazi olovo cirkonijum titanata koji je poznatiji kao PZT. Štampa se više PZT slojeva i svaki od njih se suši u infracrvenoj konvejskoj sušnici u ciklusima od 10 min na temperaturi od 140°C.
U slučaju višeslojne štampe, sito-štamptom se formira novi nivo provodnih i otpornih struktura koje se niveliraju, suše i žare na isti način kao i provodne i otporne strukture prvog nivoa (sušenje u konvejskoj sušnici u ciklusu od 15 min na temperaturi od 150°C, žarenje provodnog i otpornih slojeva u konvejskoj peći u ciklusu od 30 ili 60 min zavisno od tipa kompozitnih materijala sa maksimalnom temperaturom žarenja od 850 °C u trajanju od 10 min).	Na suve PZT slojeve se sito-štamptom nanosi još jedan sloj provodnog PdAg debeloslojnog materijala formirajući drugu elektrodu koja se nivelira i suši u konvejskoj sušnici u ciklusu od 15 min na temperaturi od 150°C. Svi slojevi kompozitnih materijala se žare zajedno pri čemu je maksimalna temperatura žarenja 850 °C. Tokom žarenja u konvejskoj peći sa odgovarajućom atmosferom, pomoćni sloj sagoreva bez ostataka oslobađajući samostojeću debeloslojnu strukturu. Formirana struktura može prijanjati za podlogu sa oba svoja kraja ili samo jednim krajem koji služi kao potpora dok se drugi kraj slobodno kreće.
Sito-štampa zaštitnog sloja, nivelacija na sobnoj temperaturi, sušenje u konvejskoj sušnici u ciklusu od 15 min na temperaturi od 150 °C i žarenje u konvejskoj peći u ciklusu od 25 min sa maksimalnom temperaturom žarenja od 500 °C.	Završni korak formiranja strukture je polarizacija piezoelektričnog sloja.

IV. POUZDANOST DEBELOSLOJNIH SAMOSTOJEĆIH STRUKTURA

Debeloslojni mikrogeneratori se obično realizuju u formi gredica (Slika 3) koje pokrivaju površine od nekoliko kvadratnih milimetara do nekoliko kvadratnih centimetara sa debljinama većim od 50 μm . Deblje strukture mogu generisati više energije ali su manje elastične pri čemu je za prikupljanje energije iz okolne sredine od ključne važnosti debljina gredice. Savijanje gredice se koristi za prikupljanje energije iz okolne sredine pri malim ubrzanjima i niskim frekvencijama pri čemu izlazni napon mikrogeneratora raste sa dužinom gredice. Pored toga, veći nivoi ubrzanja vibracija rezultuju većom izlaznom snagom mikrogeneratora uz ograničenje da nivoi ubrzanja variraju kada su u pitanju izvori vibracija u okolnoj sredini što zahteva projektovanje mikrogeneratora sa širim opsegom rezonantnih učestanosti da bi se prikupila energija izvora vibracija sa različitim i promenljivim nivoima ubrzanja vibracija. Izlazna snaga se može dodatno povećati kontrolisanim dodavanjem dodatne mase na vrh gredice.

Kada je u pitanju pouzdanost debeloslojnih samostojećih struktura čest uzrok pojave katastrofalnih otkaza je rigidnost podloge od alumine koja mora da pruži adekvatne performanse prilikom rada u modu savijanja. Uzroci pojave katastrofalnih

otkaza se mogu pojaviti i u fazi realizacije i u fazi eksploatacije debeloslojnog mikrogeneratora.

U fazi realizacije do otkaza podloge može doći:

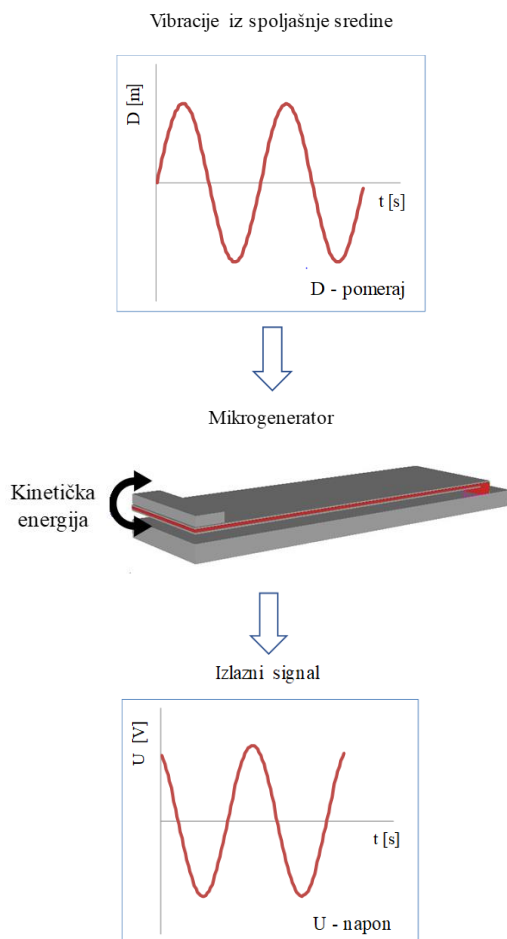
- tokom procesa sito-štampe koji uključuje visoke kontaktne sile prilikom štampanja debelih slojeva,
- uled jakog strujanja vazduha u konvejskoj peći tokom procesa žarenja,
- usled visokotemperaturnog tretmana u konvejskoj peći kada dolazi do skupljanja samostojeće strukture usled različitih koeficijenata termičkog širenja upotrebljenih materijala.

Do narušavanja pouzdanog rada strukture usled narušenog integriteta debelih slojeva mogu dovesti i:

- neadekvatan izbor materijala,
- nekontrolisani uslovi sito-štampe u pogledu parametara štampe, unošenja kontaminacija ili neuniformnosti debljine slojeva
- formiranje nekompaktnih žarenih debelih slojeva sa mogućom pojavom pukotina

što za posledicu može imati loše piezoelektrične performanse mikrogeneratorskog uređaja.

Tokom eksploatacije debeloslojnih mikrogeneratorskih uređaja do katastrofalnog otkaza najčešće dolazi usled otkaza keramičke podloge koja je rigidna i trpi dodatno opterećenje kada gredica vibrira u rezonantnom području učestanosti.



Slika 3. Prikupljanje energije iz okolne sredine pomoću debeloslojnog mikrogeneratorskog uređaja u formi gredice

Većina pomenutih pitanja kada se radi o pouzdanosti samostojnih debeloslojnih struktura može se eliminisati strogo procesnom kontrolom uz pravilan odabir materijala koji može obezbediti kompaktno debele slojeve uniformnih debljina. Ekonomski isplativ, jednostavan i ponovljiv proces realizacije uz mogućnost integracije sa drugim elektronskim sklopovima čini debeloslojne mikrogeneratorske uređaje atraktivnim ali je zbog brojnih pitanja pouzdanosti njihova primena još uvek u eksperimentalnoj fazi.

V. ZAKLJUČAK

Uprkos ekonomski efikasnom i jednostavnom procesu realizacije proizvodnje debeloslojnih mikrogeneratorskih uređaja je još na

nivou realizacije prototipova [7-9]. Da bi došlo do njihove komercijalizacije potrebno je rešiti brojna pitanja pouzdanosti. Činjenica je da su promenljive frekvencije vibracija karakteristične za izvore vibracija u okolnoj sredini. Nestalna priroda izvora vibracija u kombinaciji sa rigidnom keramičkom podlogom ograničavaju performanse samostojnih debeloslojnih struktura. Da bi ove strukture doživele punu komercijalizaciju potrebna je stroga kontrola proizvodnog procesa uz izbor optimalnih materijala koji mogu obezbediti pouzdan rad u modu savijanja bez obzira na dimenzije strukture. Da bi debeloslojna tehnologija bila u mogućnosti da konkuriše tehnologiji tankog filma i mikromašinstvu koji su ekonomski manje efikasni ali konkurentniji u pogledu dimenzija i pouzdanosti performansi, dalja istraživanja bi trebalo da se kreću u pravcu razvoja i izbora novih materijala, optimizacije parametara procesa i osmišljavanja novih alternativnih formi samostojnih struktura.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan zahvaljujući podršci Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru angažovanja na projektima III44003 i III45007.

LITERATURA

- [1] Z. Stanimirović, I. Stanimirović, "Thick-Film technology for Energy Harvesting", 6th International Conference on Renewable Electrical Power Sources, Belgrade, Republic of Serbia, pp. 143-145, 2018.
- [2] N.M. White and J.D. Turner, "Thick-film sensors: past, present and future", Measurement Science and Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 1-20, 1997.
- [3] O. Aleksić, M.V. Nikolić, M. Luković, Z. Stanimirović, I. Stanimirović, L. Sibinoski, "The Response of a Heat Loss Flowmeter in a Water Pipe Under Changing Flow Conditions", IEEE Sensors Journal, Vol. 16, No. 9, pp. 2935 – 2941, May 1, 2016.
- [4] I. Stanimirović, Z. Stanimirović, "Modelling and simulation of standard TFRs as strain sensing elements", Proceedings, Small Systems Simulation Symposium, Niš, Republic of Serbia, pp. 54-57, 2016.
- [5] D. Belavić, M. Hrovat, J. Holc, M. Zarnik, M. Kosec, M. Pavlin, "The application of thick-film technology in C-MEMS", Journal of Electroceramics, 19(4), pp. 363-368, 2007.
- [6] R.A. Dorey, R.W. Whatmore, "Electroceramic Thick Film Fabrication for MEMS", Journal of Electroceramics, Vol.12, Issue 1-2, pp. 19-32, 2004.
- [7] N.M. White, P. Glynne-Jones, and S.P. Beeby, "A novel thick-film piezoelectric micro-generator", Smart Mater. Struct, vol. 10, pp. 850-852, 2001.
- [8] S.L. Kok, N.M. White and N.R. Harris, "A Free-Standing, Thick-Film Piezoelectric Energy Harvester", Proceedings, SENSORS 2008 Conf., IEEE, Lecce, Italy, pp. 589 – 592, 2008.
- [9] S.L. Kook, "Energy Harvesting Technologies: Thick-Film Piezoelectric Microgenerator" in Sustainable Energy Harvesting Technologies – Past, Present and Future Dr. Yen Kheng Tan (Ed.), ISBN: 978-953-307-438-2, InTech, 2011, pp. 191-214.
- [10] G. Stecher, "Free supporting structures in thick-film technology: A substrate integrated pressure sensor", Proceedings, 6th European Microelectronics Conf., Boumemouth, UK, pp. 421-427, 1987.

ABSTRACT

The increasing interest in autonomous wireless devices induced research activities related to development of novel, clean and renewable energy sources that derive energy from external ambient sources. One of the potential solutions is

vibration-based energy harvesting. With new and improved lead zirconate titanate (PZT), piezoelectric ceramics with large piezoelectric coefficients and introduction of sacrificial layers in formation processes of free-standing thick-film structures, thick-film technology joined the group of technologies capable of producing piezoelectric micro generators that can be used in powering various types of microelectronic devices. Apart from the low cost and relatively simple production processes, application of thick-film piezoelectric micro generators is still

in the experimental phase due to a certain number of issues related to the reliability of free-standing thick-film structures.

**RELIABILITY ASPECT OF POTENTIAL
APPLICATION OF THICK-FILM FREE-STANDING
STRUCTURES IN ENERGY HARVESTING**

Zdravko Stanimirović, Ivanka Stanimirović