

## POBOLJŠANJE PERFORMANSI VIŠENAMENSKOG SENZORA SA TERMOPAROVIMA PRIMENOM SOPSTVENE MEMS TEHNOLOGIJE ZA IZRADU SOI PIEZOREZISTIVNIH SENZORA PRITISKA

Danijela Randelović, Milče M. Smiljanić, Žarko Lazić, Mirjana Popović, IHTM-Centar za mikroelektronske tehnologije i monokristale, Univerzitet u Beogradu, Njegoševa 12, Srbija, danijela@nanosys.ihtm.bg.ac.rs

**Sadržaj** – MEMS senzori na bazi Zebekovog efekta su tema dugogodišnjeg istraživanja u IHTM-CMTM-u. Oni su posebno interesantni zbog činjenice da imaju raznovrsnu primenu (senzori protoka, senzori vakuuma, termalni konvertori, IC detektori, akcelerometri, inklinometri, biološki i hemijski senzori, senzori vrste gasa, senzori sastava binarne smeše gasova, ...). U IHTM-u je do sada realizovano nekoliko varijanti ovog tipa senzora. Prilikom razvoja ovih senzora teži se da se iskoriste postojeći tehnološki procesi razvijeni za IHTM piezorezistivne senzore pritiska. Tako je poslednja generacija senzora sa termoparovima tehnološki kompatibilna sa IHTM Si piezorezistivnim sensorima pritiska. U međuvremenu je osvojena tehnologija izrade SOI piezorezistivnih senzora pritiska koja će biti primenjena za realizaciju sledeće generacije termalnih senzora. U ovom radu je dat osvrt na dizajn, tehnologiju izrade i poboljšanje performansi koje se očekuje kod SOI višenamenskih senzora sa termoparovima.

### 1. UVOD

MEMS senzori na bazi Zebekovog efekta su tema dugogodišnjeg istraživanja u IHTM-CMTM-u. Oni su posebno interesantni zbog činjenice da imaju raznovrsnu primenu (senzori protoka, senzori vakuuma, termalni konvertori, IC detektori, akcelerometri, inklinometri, biološki i hemijski senzori, senzori vrste gasa, senzori sastava binarne smeše gasova, ...) [1-7].

U IHTM-u je do sada realizovano nekoliko varijanti MEMS senzora sa termoparovima. Prilikom razvoja ovih senzora teži se da se iskoriste postojeći tehnološki procesi razvijeni za IHTM piezorezistivne senzore pritiska. Tako je poslednja generacija senzora sa termoparovima tehnološki kompatibilna sa IHTM Si piezorezistivnim sensorima pritiska. Ovi senzori imaju p<sup>+</sup>Si/Al termoparovime i Al grejač (A-tip), odnosno p<sup>+</sup>Si grejač (P-tip). Višenamenski senzori A- i P-tipa su tokom projekta TR6151B uspešno testirani kao senzori protoka, senzori vakuuma i termalni konvertori [5-7]. Za proučavanje performansi višenamenskih senzora razvijen je generalni 1D analitički model [5] iz kojeg su proistekli modeli za svaku primenu od interesa [6,7].

U međuvremenu je u IHTM-CMTM-u osvojena tehnologija izrade SOI piezorezistivnih senzora pritiska [8] koja će biti primenjena za realizaciju sledeće generacije termalnih senzora. U ovom radu je dat osvrt na dizajn, tehnologiju izrade i poboljšanje performansi koje se očekuje kod SOI višenamenskih senzora sa termoparovima. Budući da je jedan od zadataka na tekućem projektu TR32008 realizacija inteligentnog transmitera vakuuma sa ugrađenim sensorom sa termoparovima [9,10], biće dati rezultati simulacije koji se odnose na ovu primenu.

### 2. DIZAJN SENZORA I TEHNOLOGIJA IZRADE

Prethodna generacija IHTM-CMTM senzora na bazi Zebekovog efekta je bila izrađena tehnološkim postupcima koji su kompatibilni sa tehnologijom izrade Si piezootpornih senzora pritiska [5]. Jedan od karakterističnih tehnoloških

procesa u tom postupku je difuzija bora u Si podlogu n-tipa kojom se formiraju elementi of p-Si, koji služe kao jedan element termoparova, bočni termistor ili grejač kod termalnih senzora, odnosno, kao otpornici u Vitstonovom mostu kod piezorezistivnih senzora.

Za izradu sledeće generacije senzora sa termoparovima biće korišćen novi tehnološki postupak razvijen za izradu SOI piezorezistivnih senzora pritiska [8]. Osnovna razlika u odnosu na "Si tehnologiju" je što p-Si elementi nisu formirani u n-Si supstratu, već se nalaze na silicijum dioksidu kao meza strukture. U slučaju senzora sa termoparovima, to znači da je ostvarena mnogo bolja toplotna izolacija strukture. Nova tehnologija se razlikuje i po tome što se umesto postupka anizotropnog nagrizanja u vodenom rastvoru KOH koristi anizotropno nagrizanje u rastvoru TMAH. TMAH je odabran zbog boljeg kvaliteta nagrižene površi, zbog bolje kontrole procesa nagrizanja i zbog visoke selektivnosti u odnosu na oksid. Naime, eksperimentalno smo utvrdili da je hrapavost nagrižene površine znatno bolja u slučaju nagrizanja u TMAH [11]. Sam proces nagrizanja je lakše kontrolisati pošto je brzina nagrizanja u TMAH oko deset puta manja nego pri nagrizanju u KOH, pod uslovima koji se standardno koriste u našoj tehnologiji. Prilikom nagrizanja u TMAH potreban je znatno tanji oksidni sloj u odnosu na proces u KOH zbog visoke selektivnosti.

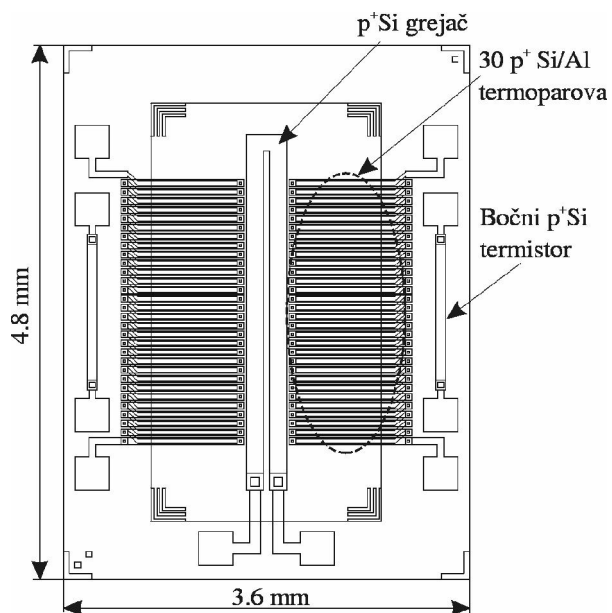
Na slici 1a dat je šematski prikaz IHTM senzora sa termoparovima (pogled odozgo). Na slici 1b dat je šematski prikaz poprečnog preseka ovog senzora izrađenog na SOI pločici. U ovoj fazi posmatramo strukturu koja ima identičan dizajn kao prethodna generacija senzora sa termoparovima (senzori A- i P-tipa REF) da bismo kasnije izvršili poređenje njihovih performansi i na taj način utvrdili doprinos primene SOI tehnologije poboljšanju performansi senzora.

Osnovni elementi senzora su prikazani na slici 1a:

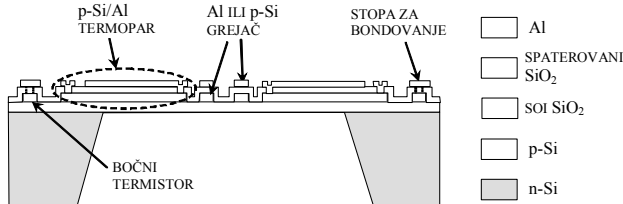
- 1) niz od 30 termoparova serijski povezanih u dve termobaterije pri čemu se topli krajevi nalaze blizu aktivne površi, dok su hladni krajevi na balku,
- 2) aktivna oblast u kojoj se nalazi toplotno generišući element otpornik-grejač koji može da bude izrađen od p-Si (senzor P-tipa) ili Al (senzor A-tipa)),
- 3) toplotno izolujuća struktura – membrana koja se sastoji od čistog SOI oksida, koja obezbeđuje gradijent temperature na čipu,
- 4) "hladnjak" - ivični nenagriženi delovi čipa koji se nalaze na obodu i služe za održavanje temperature hladnih krajeva na temperaturi ambijenta,
- 5) dva bočna termistora od p-Si koji služe za određivanje temperaturne razlike na čipu i Zebekovog koeficijenta termoparova.

Na slici 1b dat je šematski prikaz poprečnog preseka senzora sa termoparovima na SOI pločici. SOI pločica ima višeslojnu strukturu i sastoji se od masivnog Si supstrata, SiO<sub>2</sub> sloja debljine od nekoliko mikrona i tankog aktivnog Si sloja. Parametri komercijalne SOI pločice koja će biti korišćena su:

supstrat n-Si (100) specifične otpornosti 3-5  $\Omega\text{cm}$  nominalne debljine 450  $\mu\text{m}$ , ugrađeni oksid debljine 1  $\mu\text{m}$ , aktivni sloj p-Si (100) specifične otpornosti 0.01-0.04  $\Omega\text{cm}$ , nominalne debljine 2,5  $\mu\text{m}$ .



a)



b)

Sl.1. a) Šematski prikaz IHTM senzora sa termoparovima (pogled odozgo), b) Šematski prikaz poprečnog preseka senzora sa termoparovima na SOI pločici sa potpuno uklonjenim rezidualnim n-Si u oblasti membrane.

U nastavku je dat uprošćen opis procedure izrade senzora. Termalna oksidacija za formiranje debelog sloja oksida debljine oko 2  $\mu\text{m}$ . Fotolitografski postupak za definisanje membrane. Nagrizanje n-Si supstrata do formiranja membrane debljine oko 25  $\mu\text{m}$ . Uklanjanje oksida. Stanjivanje aktivnog sloja za 1  $\mu\text{m}$  u vodenom rastvoru TMAH na 60  $^{\circ}\text{C}$ . Termalna oksidacija za formiranje tankog osida (0,25  $\mu\text{m}$ ). Fotolitografski postupak kojim se definišu elementi p-tipa na čipu (trake termoparova, termistori i eventualno grejač). Oslobođanje p-Si traka na SOI oksidu nagrizanjem aktivnog Si sloja u vodenom rastvoru TMAH na 60  $^{\circ}\text{C}$ . Formiranje izolacionog sloja spaterovanjem  $\text{SiO}_2$  debljine 1  $\mu\text{m}$ . Fotolitografija za definisanje otvora za kontakte u oksidu. Spaterovanje Al sloja debljine 0,7  $\mu\text{m}$ . Fotolitografija za formiranje Al traka koje čine drugi deo termoparova i grejač. Sečenje pločice na čipove. Potpuno oslobođanje membrane dogrizanjem rezidualnog n-Si pojedinačnih čipova do samog SOI oksida.

Tehnološki postupci izrade su osmišljeni imajući u vidu efekat stanjivanja silicijuma pri termalnoj oksidaciji i osiromašenja primesa pri istom postupku [8].

### 3. REZULTATI ANALITIČKOG MODELOVANJA

Svi tipovi mikrosenzora sa termoparovima se odlikuju zajedničkim elementima (termoparovi, toplotno generišuća oblast, toplotno izolujuća struktura, "hladnjak") i određenim skupom bazičnih parametara bez obzira na vrstu primene za koju su namenjeni. U nastavku su najpre date definicije karakterističnih bazičnih parametara, a zatim su prikazani rezultati modelovanja i očekivane vrednosti ovih parametara za Si i SOI termalne senzore, kao i poredenje performansi Si i SOI termalnog senzora vakuuma.

#### 3-1. DEFINICIJE ODABRANIH BAZIČNIH PARAMETARA SENZORA SA TERMOVAROVIMA

Funkcionalnost termalnih senzora je obezbeđena odgovarajućom toplotno izolujućom strukturom koja je okarakterisana toplotnom otpornošću  $R_t$  [K/W]. Osnova rada mikrosenzora na bazi Zebekovog efekta je detekcija temperaturne razlike,  $\Delta T$ , uspostavljene na čipu. Temperaturna razlika se uspostavlja usled toplotne snage,  $P$ , koja se generiše u aktivnoj oblasti. Bazična relacija koja povezuje sve navedene parametre ima oblik

$$\Delta T = R_t P. \quad (1)$$

Usled postojanja temperaturne razlike na krajevima termoparova javlja se Zebekov napon,  $U_i$ . Ukoliko je  $N$  termoparova serijski (u toplotnom smislu) povezano tako da čine jednu termobateriju, onda je ukupan napon na njenim krajevima dat formulom

$$U_i = N \alpha \Delta T, \quad (2)$$

gde je  $\alpha$  označen Zebekov koeficijent termoparova sačinjenih od materijala  $m_1$  i  $m_2$  sa Zebekovim koeficijentima  $\alpha_{m1}$ , odnosno,  $\alpha_{m2}$ , pri čemu je  $\alpha = \alpha_{m1} - \alpha_{m2}$ .

Statička osetljivost,  $S$  [V/W], ove vrste senzora se definiše kao odnos Zebekovog napona i ulazne toplotne snage

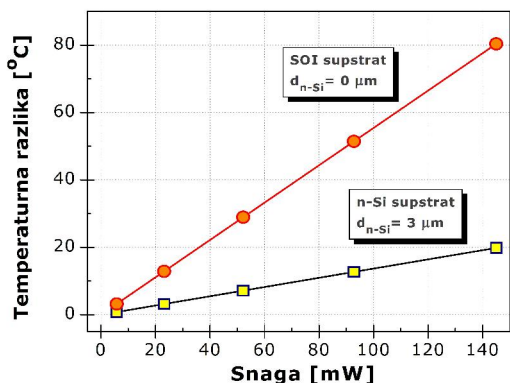
$$S = \frac{U_i}{P} = N \alpha R_t \quad (3)$$

#### 3-2. MODELOVANJE - BAZIČNI PARAMETRI SI I SOI SENZORA SA TERMOVAROVIMA

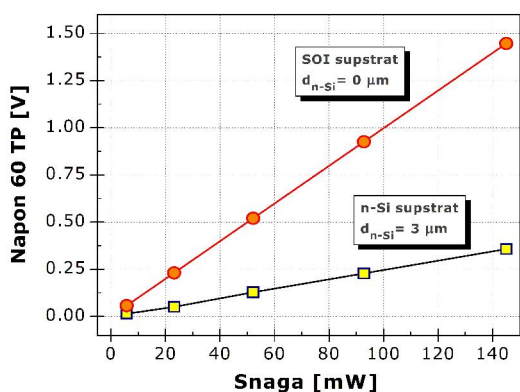
Analitički model i detaljni izrazi za navedene parametre su dati u [5]. Zbog složenosti formula, ovde ih nećemo navoditi već samo dajemo rezultate simulacija za strukture P-tipa izradene na Si, odnosno SOI pločici. Smatramo da je otpornost p-Si grejača 5.8 k $\Omega$  i da je Zebekov koeficijent p-Si/Al termoparova  $\alpha = 300 \mu\text{V/K}$  [5]. Takođe smatramo da je u slučaju strukture izradene na Si supstratu prisutan i sloj rezidualnog n-Si u oblasti membrane debljine  $d_{n-Si} = 3 \mu\text{m}$ . Ova pretpostavka je opravdana pošto je eksperimentalno utvrđeno da je moguće realizovati funkcionalne strukture na Si supstratu sa minimalnom debljinom rezidualnog n-Si od oko 3  $\mu\text{m}$ . Budući da su otpornost p-Si grejača i specifična toplotna provodnost vazduha zavisne od temperature, sve simulacije su rađene za konstantu temperaturu okoline od 20  $^{\circ}\text{C}$ .

Na slici 2 data je zavisnost temperaturne razlike uspostavljene na čipu od toplotne snage na p-Si grejaču kada se menja u rasponu (5.8 – 145) mW. Vidi se da se u slučaju SOI supstrata ostvaruje četiri puta veća temperaturna razlika

između toplih i hladnih krajeva termoparova pri istoj toplotnoj snazi razvijenoj na grejaču. Slika 3 prikazuje zavisnost ukupnog izlaznog napona svih 60 termoparova prisutnih na čipu od toplotne snage na p-Si grejaču.



Sl.2. Zavisnost temperaturne razlike između toplih i hladnih krajeva p-Si/Al termoparova od toplotne snage razvijene na p-Si grejaču za dve strukture: senzor na SOI supstratu sa membranom od čistog oksida i senzor na Si supstratu sa dvoslojnom membranom oksid/rezidualni n-Si ( $d_{n-Si} = 3 \mu m$ ). Modelovanje urađeno za temperaturu ambijenta  $20^\circ C$ .



Sl.3. Zavisnost ukupnog izlaznog napona svih 60 termoparova prisutnih na čipu od toplotne snage na p-Si grejaču grejaču za dve strukture: senzor na SOI supstratu sa membranom od čistog oksida i senzor na Si supstratu sa dvoslojnom membranom oksid/rezidualni n-Si ( $d_{n-Si} = 3 \mu m$ ). Modelovanje urađeno za temperaturu ambijenta  $20^\circ C$ .

Toplotna otpornost senzora se određuje kao nagib linearnih karakteristika prikazanih na slici 2. Proračun pokazuje da SOI termalni senzor ima toplotnu otpornost  $R_t = 554 K/W$ , što je poboljšanje od četiri puta u odnosu na strukturu izradenu na Si podlozi.

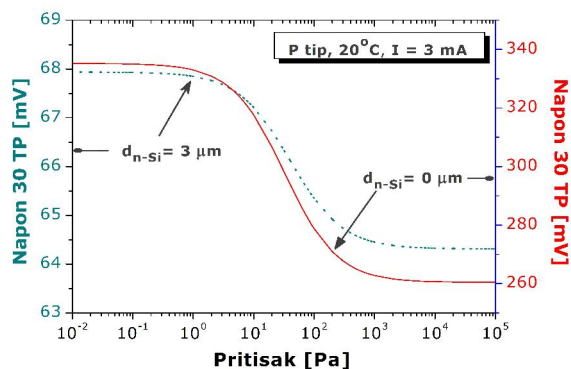
Statička osetljivost senzora u stacionarnom stanju se određuje kao nagib linearnih karakteristika prikazanih na slici 3. Statička osetljivost SOI termalnog senzora je  $9,98 V/W$ , odnosno četiri puta je veća od osetljivosti strukture izradene na Si podlozi.

### 3-3. MODELOVANJE - PERFORMANSE SI I SOI TERMALNOG SENZORA VAKUUMA

Vakuum je oblast pritiska ispod atmosferskog, tako da se pod senzorom vakuuma podrazumeva naprava koja meri

pritisak niži od atmosferskog. Rad termalnih senzora vakuuma [4,5,7] se zasniva na zavisnosti specifične toplotne provodnosti gasa od pritiska u kućištu. Sam proces detekcije se odvija u tri faze. Najpre, za dati pritisak i temperaturu ambijenta,  $T$ , imamo određenu vrednost specifične toplotne provodnosti gasa koji ispunjava kućište senzora,  $\lambda_{GAS}(p, T)$ . Zatim se za datu specifičnu toplotnu provodnost gasa uspostavlja određena razlika temperature između toplih i hladnih krajeva čipa,  $\Delta T(p, T)$ . Na kraju se vrši termoelektrična konverzija usled Zebekovog efekta i na krajevima termobaterija se generiše napon koji takođe zavisi od pritiska i temperature ambijenta  $U(p, T)$ . Detaljno izvođenje formule koja opisuje zavisnost  $U(p, T)$  je dato u [7]. Prilikom modelovanja pretpostavljeno je da je temperatura ambijenta  $20^\circ C$  i da se p-Si grejač napaja konstantnom strujom od 3 mA.

Na  $U(p, T=const)$  karakteristiku termalnih senzora vakuuma utiče oblik karakteristike zavisnosti specifične toplotne provodnosti okolnog gasa od pritiska. Posledica toga su dva "platoa"  $U(p, T=const)$  prisutna u karakteristici, odnosno odziv senzora je za pritiske ispod 1 Pa i iznad 5 kPa praktično konstantan, što je posledica konstantne specifične toplotne provodnosti okolnog gasa za te pritiske. Ovo je očigledno na slici 4 koja prikazuje zavisnosti napona termobaterije od 30 termoparova za pritisak vazduha u opsegu ( $10^{-2} - 10^5$ ) Pa.



Sl.4. Napon jedne termobaterije od 30 p-Si/Al termoparova u zavisnosti od pritiska vazduha proračunata za termalni Si ( $d_{n-Si} = 3 \mu m$ ) i SOI ( $d_{n-Si} = 0 \mu m$ ) senzor vakuuma P-tipa pri konstantnoj struji napajanja p-Si grejača od 3 mA i temperaturi ambijenta  $20^\circ C$ .

Kao parametar kvaliteta termalnog senzora vakuuma obično se uzima razlika napona između ova dva platoa. Utvrđeno je da se kod SOI termalnog senzora ostvaruje promena napona od 74,8 mV, što je oko 20 puta bolje u odnosu na odgovarajuću promenu napona koja se postiže kod Si termalnog senzora.

### 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu izvršeno je teorijsko razmatranje opravdanosti razvoja sledeće generacije IHTM višenamenskih senzora sa termoparovima primenom SOI tehnologije. Osnovna ideja je da se primene tehnološki postupci koji su osvojeni za izradu visokotemperaturnih IHTM piezootpornih senzora pritiska. Od značaja za realizaciju SOI senzora sa termoparovima je postupak formiranja p-Si traka na SOI oksidu kao meza struktura. Kod SOI termalnih senzora će biti izvršeno i potpuno uklanjanje rezidualnog n-Si u oblasti membrane što

je od presudnog značaja za ostvarivanje optimalnih performansi senzora.

Prilikom modelovanja posmatrana su dve strukture P-tipa, jedna izrađena na SOI podlozi sa membranom od čistog oksida i druga, izrađena na Si supstratu sa dvoslojnom membranom oksid-rezidualni n-Si minimalne debljine da bi se očuvala funkcionalnost strukture.

Rezultati modelovanja pokazuju da SOI termalni senzor ima toplotnu otpornost  $R_t = 554 \text{ K/W}$ , što je poboljšanje od četiri puta u odnosu na strukturu izrađenu na Si podlozi. Statička osetljivost SOI termalnog senzora je  $9,98 \text{ V/W}$ , odnosno četiri puta je veća od osetljivosti strukture izrađene na Si podlozi. Kao ilustracija očekivanog poboljšanja performansi, urađeno je modelovanje performansi opisanih SOI i Si struktura kada su primenjene kao senzori vakuuma. Kao parametar kvaliteta termalnog senzora vakuuma uzeta je razlika napona između ova dva platoa. Utvrđeno je da se kod SOI termalnog senzora ostvaruje promena napona od  $74,8 \text{ mV}$ , što je oko 20 puta bolje u odnosu na odgovarajuću promenu napona koja se postiže kod Si termalnog senzora.

Rezultati simulacije su dati za strukture kod kojih je debljina  $p^+Si$  traka termoparova  $1 \mu\text{m}$ . Zaključeno je da se ostvaruje znatno poboljšanje performansi senzora. Dalja istraživanja će biti usmerena na optimizaciju debljine  $p^+Si$  traka, pošto preliminarni rezultati modelovanja pokazuju da se još izraženije poboljšanje performansi može očekivati sa daljim smanjivanjem debljine  $p^+Si$  sloja. Pri tome će se voditi računa i o ostalim parametrima, kao što je električna otpornost termoparova, koja utiče na granične performanse termalnih senzora. Ovaj uticaj se ogleda na šum i minimalnu vrednost ulaznog signala koja se može registrovati, odnosno rezoluciju senzora. Šum i snaga ekvivalentna šumu nisu analizirani u ovom radu. S druge strane, nivo dopiranja p-Si traka i njihova električna otpornost utiču na parametar dobrote termoparova, što će takođe biti uzeto u obzir pri optimizaciji SOI senzora na bazi Zebekovog efekta.

Rezultati modelovanja prikazani u ovom radu nedvosmisleno pokazuju da je potpuno opravdan prelazak sa Si na SOI tehnologiju u daljem razvoju višenamenskih IHTM senzora sa termoparovima.

## 6. ZAHVALNOST

Ovaj rad je delimično finansiran od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije u okviru projekta TR32008.

## LITERATURA

- [1] G. C. M. Meijer, A. W. Herwaarden, *Thermal Sensors*, Bristol, IOP Publishing 1994.
- [2] S. Udina, M. Carmona, G. Carles, J. Santander, L. Fonseca, S. Marco, "A micromachined thermoelectric sensor for natural gas analysis: Thermal model and experimental results", *Sens. & Actuators B: Chemical*, vol. 134, pp. 551-558, 2008.
- [3] S. Silvestri, E. Schena, "Micromachined Flow Sensors in Biomedical Applications", *Micromachines*, vol. 3, pp. 225-243, 2012.
- [4] Xensor Integration, Thermal Conductivity Gauge TCG-3880 for gas type measurement and vacuum measurement, <http://www.xensor.nl/pdf/files/sheets/tcg3880.pdf>
- [5] D. Randjelović, A. Petropoulos, G. Kaltsas, M. Stojanović, Ž. Lazić, Z. Djurić, M. Matic,

"Multipurpose MEMS Thermal Sensor Based on Thermopiles", *Sens. & Actuators A*, vol. 141, pp. 404-413, 2008.

- [6] D. Randjelović, Z. Djurić, A. Petropoulos, G. Kaltsas, Ž. Lazić, M. Popović, "Analytical modelling of thermopile based flow sensor and verification with experimental results", *Microelectronic Engineering*, vol. 86, pp. 1293-1296, 2009.
- [7] D. Randjelović, V. Jovanov, Ž. Lazić, Z. Djurić, M. Matic, "Vacuum MEMS Sensor Based on Thermopiles – Simple Model and Experimental Results", *Proc. 26th Int. Conf. on Microelectronics MIEL 2008*, Vol 2, Niš, Serbia, 2008, May 11-14, pp. 367-370.
- [8] M. Smiljanić, Ž. Lazić, K. Radulović, V. Jović, B. Popović, "Visokotemperaturni piezootporni senzor za niske pritiske SOI SP-11", 55. ETRAN, Banja Vrućica-Teslić, 2011, pp. MO3.3.1-4
- [9] D. Randjelović, M. Frantlović, V. Raković, B. Miljković, "Adaptacija softvera razvijenog za IHTM industrijske transmiere pritiska u cilju realizacije prototipa inteligentnog termalnog transmiere vakuuma", 54. ETRAN, Donji Milanovac, 2010, pp. MO2.5-1-4
- [10] D. Randjelović, M. Frantlović, B. Miljković, B. Rosandić, Z. Jakšić, B. Popović, "Intelligent thermopile-based vacuum sensor", *Euroensors XXV Abstract Book*, Athens, Greece, 4 - 7 September 2011, A5P-L, Paper Id 1078
- [11] V. Jović, D. Randjelović, M. Popović, "Anizotropno nagrizanje monokristalnog Si u rastvorima TMAH-a sa dodatkom etanola: morfološke i kinetičke odlike", *Proc. 49. ETRAN*, Budva, 2005, vol. 4, pp. 181-184

**Abstract** – MEMS sensors based on Seebeck effect have been a part of the long-term research at IHTM-CMTM. They are of special interest because of the fact that they have broad range of applications (flow sensors, vacuum sensors, thermal converters, IR detectors, accelerometers, inclinometers, biological and chemical sensors, gas type sensors, binary gas mixture composition sensors, ...). Till now several types of this kind of sensors have been developed at IHTM. During the development process we aim at using already existing technological processes developed for IHTM piezoresistive pressure sensors. Thus, the last generation of thermopile-based sensors is technologically compatible with IHTM Si piezoresistive pressure sensors. In the meantime, a technology of SOI piezoresistive pressure sensors have been conquered and it will be applied for realization of the next generation of thermal sensors. This paper gives overview of the design, fabrication technology and performance improvement expected to be reached with SOI multipurpose thermopile-based sensors.

## ENHANCEMENT OF THE PERFORMANCE OF MULTIPURPOSE THERMOPILE-BASED SENSOR USING PROPRIETARY MEMS TECHNOLOGY FOR SOI PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSORS FABRICATION

Danijela Randjelović, Milče M. Smiljanić, Žarko Lazić, Mirjana Popović