

PIEZOOTPORNİ SENZORI PRITISKA NA SOI PLOČICAMA NAMENJENI FUNKCIONISANJU NA VISOKIM TEMPERATURAMA

Milče Smiljanić, Zoran Đurić, Žarko Lazić, Mirjana Popović, Katarina Radulović.
IHTM-Institut za mikroelektronske tehnologije i monokristale, Beograd, Njegoševa 12, Srbija i Crna Gora

Sadržaj – Temperaturni opseg rada IHTM-CMTM-ovih piezootpornih senzora pritiska je ograničen na temperature do 120 °C zbog struje curenja pn spoja. Da bi proširili temperaturni opseg rada naših senzora pritiska uvodimo novu tehnologiju tj, koristimo komercijalne Silicon-On-Insulator (SOI) pločice. Uz pomoć SOI pločica, mikromašinstva i standardnih mikroelektronskih tehnologija napravljen je novi senzor pritiska koji se bazira na ideji da piezootpornici nisu više međusobno, kao i od substrata, izolovani kontaktnim potencijalom pn spoja, već dielektrikom silicijum dioksidom. Napravljeni prototip trandjusera u kome se nalazi novi senzor pritiska je pokazao zadovoljavajuće karakteristike na temperaturama do 200 °C.

1. UVOD

U industrijskim postrojenjima, a i kod drugih korisnika senzora pritiska, temperatura fluida čiji se pritisak meri može biti vrlo visoka. Budući da piezootporni senzori pritiska gube funkciju na temperaturama preko 120 °C, temperatura fluida se obara na senzoru najčešće dislokacijom kontaktne membrane od membrane senzora preko kapilarnih cevi punjenih uljem. Drugi način je da se čitav transmiter pritiska dislocira preko kapilarnih cevi. Ovakva i slična rešenja značajno usložnjavaju uređaj dižući mu cenu i komplikujući eksploataciju.

Piezootporni senzori pritiska, koji se danas po sopstvenom razvoju proizvode u IHTM-CMTM, sadrže piezootpornike koji su napravljeni kao p-oblasti difundovane u substrat n-tipa, Sl.1.a). Ovi otpornici su izolovani međusobno, a takođe i u odnosu na substrat, kontaktnim potencijalom pn spoja. Na povišenim temperaturama (iznad 120 °C) struje curenja ovih parazitnih dioda se značajno povećavaju, što onemogućava pouzdano merenje vrednosti piezootpornika. Promene vrednosti otpornika usled ovog efekta utiču na smanjenje tačnosti merenja pritiska. Navedeni efekat je uticao da temperaturni opseg rada IHTM-CMTM-ovog senzora pritiska bude do 120 °C.

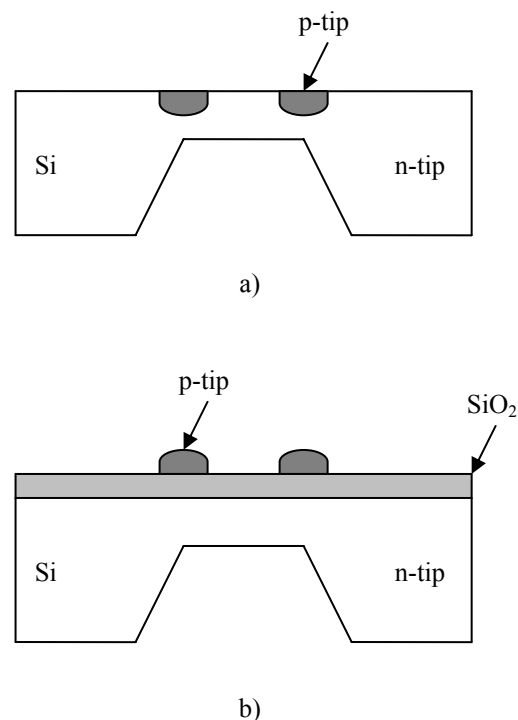
Da bi se povećao temperaturni radni opseg u svetu su korišćene različite tehnike izolacije piezootpornika, [1]. Kao najperspektivnija tehnika u IHTM-CMTM se pokazala ona koja se bazira na ideji da su piezootpornici izolovani međusobno, kao i od substrata, silicijum dioksidom, Sl. 1.b), [1, 2]. Razvoj senzora pritiska za povišene temperature (do 200 °C) rađen je korišćenjem tehnike mikromašinstva i korišćenjem nove tehnologije na Silicon-On-Insulator (SOI) pločicama.

2. TEHNOLOGIJA IZRADE

Tehnika koju primenjujemo u izradi visoko temperaturnih senzora pritiska koristi komercijalne SOI pločice određenih karakteristika (debljine slojeva Si i SiO₂, koncentracija

primesa) o kojima se mora voditi računa pri dizajniranju senzora. SOI pločica predstavlja strukturu koja se sastoji od Si substrata, sloja SiO₂ i aktivnog sloja Si. Pločice koje se koriste u IHTM-CMTM za izradu senzora pritiska imaju aktivan sloj n-tipa (orijentacije (100) i specifične otpornosti 3-5 Ωcm) debljine ~2 μm, oksid debljine ~1,5 μm i substrat n-tipa (orijentacije (100) i specifične otpornosti 3-5 Ωcm) debljine ~500 μm. Maske koje se koriste su modifikovane maske IHTM-CMTM-ovog senzora pritiska SP-9.

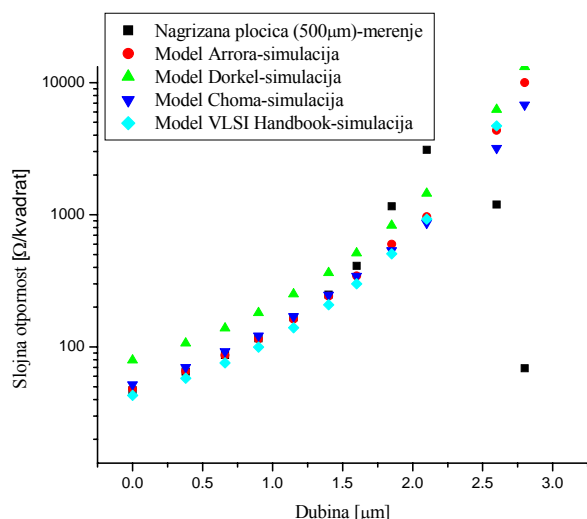
Analiza iz literature [3, 4] pokazuje da se najčešće kao osetljivi element koristi p-tip piezootpornika dobijen difuzijom ili implantacijom bora. SOI pločice koje su nam bile na raspolaganju za proizvodnju senzora imaju aktivnu oblast n-tipa. Da bi se pri formiranju p-tipa izbegao pn spoj potrebno je da se predepozicijom primesa bora i odgrevanjem postigne da deo aktivne oblasti koji predstavlja piezootpornik bude p-tip sve do međusloja SiO₂, Sl. 1.b).



Sl.1. a) Šema poprečnog preseka IHTM-CMTM-ovog senzora pritiska. b) Šema poprečnog preseka SOI senzora pritiska.

Pri dizajniranju senzora je važno postići i održavati tačno određenu koncentraciju (površinsku i zapreminsku) primesa da bi se dobila zadovoljavajuća slojna otpornost. Površinska koncentracija utiče i na temperaturnu promenu osetljivosti.

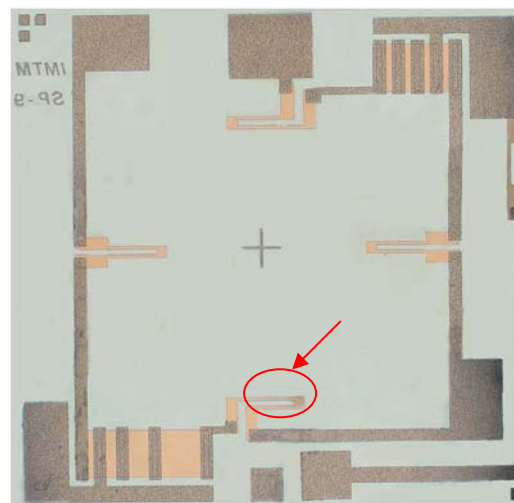
Temperaturna promena osetljivosti senzora, koji se napaja konstantnom strujom, je jednaka zbiru temperaturnog koeficijenta piezootpornog koeficijenta ($TC\pi$) i temperaturnog koeficijenta otpornosti (TCR). Sa grafika na Sl. 4.3. iz [5] se zaključuje da je taj zbir jednak nuli za koncentracije $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ i 10^{20} cm^{-3} jer su $TC\pi$ i TCR iste apsolutne vrednosti, ali suprotnog znaka. Upoređujući vrednosti piezootpornika sa površinskim koncentracijama $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ i 10^{20} cm^{-3} , i uzimajući u obzir IHTM-CMTM-ove tehnološke mogućnosti (difuzija i odgrevanje, ograničena radna temperatura borona i peći, oksidacije), odlučili smo se za piezootpornike sa površinskom koncentracijom $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Da bi se dobila površinska koncentracija od $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ i da bi se izbegao pn spoj, potrebno je odrediti parametre (vreme i temperatura) procesa predepozicije primesa bora i odgrevanja. Parametri su određeni iz simulacija procesa predepozicije primesa i odgrevanja metodom konačnih elemenata. Uz pomoć dobijenih parametara je određena slojna otpornost za različite modele pokretljivosti nosilaca u poluprovodniku sa primesama bora. Simulirane slojne otpornosti su upoređene sa izmerenom slojnom otpornosti, Sl. 2. Merenje slojne otpornosti je izvršeno na pratećoj pločici metodom četiri tačke.



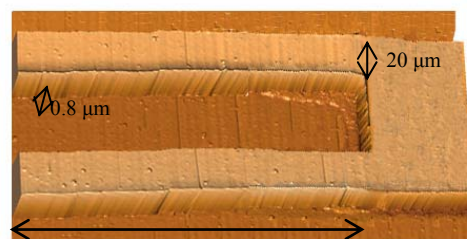
Sl.2. Sa datim modelima [6], [7], [8], [9] za koeficijent difuzije i pokretljivosti rađena je simulacija u dva koraka: prvi korak je predepozicija primesa bora na $950 \text{ }^\circ\text{C}$ koja je trajala 30 min (dobijen je pn spoj na $0.28 \text{ }\mu\text{m}$); drugi korak je odgrevanje na $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ koji je trajao 5 h (pn spoj se pomera na $3.5 \text{ }\mu\text{m}$). Slojnu otpornost smo računali na sobnoj temperaturi.

Poklapanja vrednosti izmerenih slojnih otpornosti sa slojnim otpornostima modela pokazuju da je ostvarena površinska koncentracija oko $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Treba napomeniti i da oksidacija osiromašuje p-oblast (smanjuje se površinska koncentracija) na površini do oksida koji raste i da se zbog toga, posle procesa difuzije, moraju raditi kratke oksidacije, da se ne bi pokvarile karakteristike senzora. Posle simulacija

i potrebnih proračuna za tehnološke procese, vršeni su sledeći



a)



b)

Sl.3. a) SOI SP-9 senzor pritiska. b) AFM slika dela piezootpornika SOI SP-9 senzora pritiska koji je označen na slici 3.a).

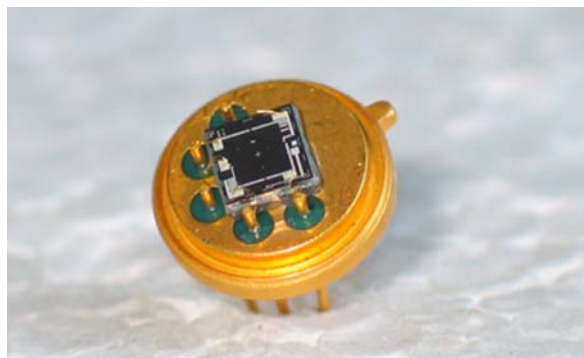
tehnološki postupci na izradi senzora pritiska na SOI pločici za radni opseg od 50 bara:

- oksidacija (sloj $\text{SiO}_2 \sim 2.2 \text{ }\mu\text{m}$) da bi se definisala membrana debljine od $160 \text{ }\mu\text{m}$
- fotopostupak za definisanje membrane debljine od $160 \text{ }\mu\text{m}$
- nagrizanje Si substrata u 30% KOH na temperaturi od $80 \text{ }^\circ\text{C}$
- uklanjanje oksida
- oksidacija (sloj $\text{SiO}_2 \sim 0.75 \text{ }\mu\text{m}$) za difuziju bora po celoj površini aktivne oblasti
- uklanjanje oksida sa aktivnog sloja
- difuzija bora (predepozicija na $T=950 \text{ }^\circ\text{C}$ za $t=30 \text{ min}$ i odgrevanje na $T=1100 \text{ }^\circ\text{C}$ za $t=5 \text{ h}$)
- merenje slojne otpornosti na pratećoj pločici. Merenje je vršeno svaki put posle nagrizanja difundirane pločice za fiksirano vreme (2 min u 25% TMAH na $60 \text{ }^\circ\text{C}$).

- kratka oksidacija (sloj SiO_2 $\sim 0.096 \mu\text{m}$) za definisanje piezootpornika
- fotopostupak za definisanje piezootpornika
- nagrizanje aktivne oblasti u 25% TMAH na temperaturi od 60°C da bi se napravili piezootpornici
- skidanje oksida sa piezootpornika i oksidacija za pasivizaciju van kontaktne površine peleta u uređaju za spaterovanje Perkin-Elmer 2400 (sloj SiO_2 $\sim 0.4 \mu\text{m}$) (u ovoj fazi ispitivanja ovi procesi su izostavljeni)
- fotopostupak za otvore za metalizaciju
- metalizacija (sloj Al $\sim 0.8 \mu\text{m}$) u uređaju za spaterovanje Perkin-Elmer 2400
- fotopostupak i uklanjanje viška metalizacije za definisanje metalnih kontakata
- legiranje na 400°C

Posle završenih tehnoloških postupaka dobijen je pelet sa trodimenzionalnom strukturom kao na Slici 1.b). Dvodimenzionalna fotografija peleta je na Slici 3.a). Visina piezootpornika je određena u IHTM-u uz pomoć Atomic Force Microscope-a (AFM) AutoProbe CP, TM Microscopes i iznosi $h=0.8 \mu\text{m}$. Na Slici 3.b) je data AFM slika dela piezootpornika koji je označen na Slici 3.a). Prema obliku piezootpornika zaključujemo da su tehnološki procesi kvalitetno odrađeni.

Na kraju je izvršeno anodno bondovanje peleta u vakuumu za Pyrex^R staklo da bi se dobio prototip senzora za merenje apsolutnog pritiska u proširenom temperaturnom opsegu.



Sl.4. Apsolutni senzor pritiska SOI SP-9 za opseg od 50 bara.

3. MERNI METODA

Prototip senzora se dobija tako što se pelet na staklenoj podlozi postavlja na TO-5 podnožje i povezuje sa izvodnicama zlatnom žicom prečnika $25 \mu\text{m}$, Slika 4. Senzor je zatim stavljen u metalno kućište od čelika 4574. Za kućište je zašrafljena metalna kapilara sa termički otpuštenim bakarnim dihtungom u obliku prstena. Bakarni dihtunzi su korišteni zato što, za razliku od teflonskih, mogu izdržati veće pritiske. Prema mernom fluidu kućište je zatvoreno metalnom membranom od nerđajućeg čelika. Metalna membrana služi

da se preko nje i silikonskog ulja, u kome se nalazi senzor, prenese pritisak iz kapilare na senzor. Na spoljne izvodnice TO-5 kućišta su zapunktovane žice od nikla, jer je tokom merenja ustanovljeno da se kalajni lem topi na temperaturi preko 180°C . Žice od nikla su stavljene u keramičku izolaciju. Ceo ovaj trandjuser je stavljen u termostat za merenje temperature od 50°C do 200°C . U termostatu se nalazi silikonsko ulje koje se greje na zadatu temperaturu. U ovo ulje je potopljen ispitivani trandjuser kome se preko metalne kapilare zadaje pritisak do 50 bara. Merna metoda je ograničena jer je 200°C maksimalna dozvoljena temperatura koja se može ostvariti u raspoloživom termostatu sa uljem.

4. REZULTATI

Merenja trandjusera su vršena u termostatu. Primenjeni pritisci su bili: 0, 10, 20, 30, 40 i 50 bara. Primenjene temperature su bile: 50, 100, 130, 150, 170, 190 i 200°C . Meren je izlazni napon mosta koji je napajan konstantnom strujom od 2.5 mA bez primenjene "spoljašnje" pasivne temperaturne kompenzacije. Linearnost čipova je od 0.2% do 0.6% od pune skale za svaku temperaturu. Zavisnosti ofseta i spana u odnosu na temperaturu su dati na Slici 5. Vidi se da su njihove promene sa temperaturom i bez "spoljašnje" kompenzacije zadovoljavajuće male. Primećuje se i prevoj ofseta i spana na temperaturama oko 160°C . Uzrok ovog ponašanja je još uvek u fazi ispitivanja ali se pretpostavlja da su tri faktora koji ga zbirno mogu prouzrokovati: temperaturna zavisnost samog senzora, temperaturno širenje silikonskog ulja i ponašanje metalne membrane. Prva merenja su izvršena sa trandjuserom sa senzorom u silikonskom ulju i metalnom membranom, jer se takvi trandjuseri koriste u industriji gde je sredina kontaminirana i visokotemperaturna. U nastavku ispitivanja senzora će se koristiti trandjuser bez ulja i metalne membrane. U takvom trandjuseru će pritisak direktno delovati iz kapilare na senzor.

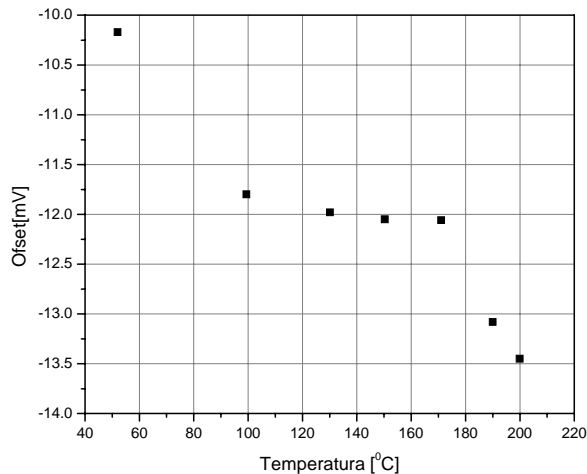
Karakteristike trandjusera ukazuju da se može uspešno izvršiti "spoljašnja" temperaturna kompenzacija pasivnim elementima (otpornicima) kao i kod izvornih SP-9 senzora pritiska, [10]. Tako na primer, za trandjuser 2.1. SOI SP-9 sa Slike 5, paralelni i redni otpornici piezootporniku, koji služe za temperaturnu kompenzaciju ofseta, iznose respektivno $97.3 \text{ k}\Omega$ i 17.91Ω . Paralelni otpornik u dijagonali mosta, kojim se vrši temperaturna kompenzacija spana, iznosi $6.10 \text{ k}\Omega$.

5. ZAKLJUČAK

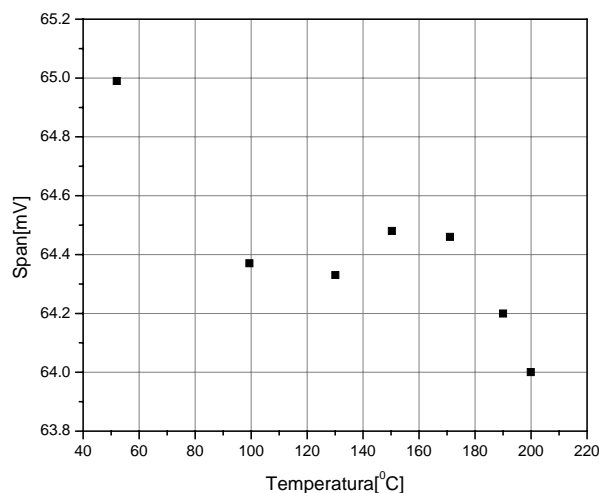
Senzor pritiska namenjen funkcionisanju na povišenim temperaturama (do 200°C) uspešno je izrađen korišćenjem standardnih mikroelektronskih tehnologija, tehnike mikromašinstva i nove tehnologije korišćenjem komercijalnih SOI pločica. Napravljeni su piezootpornici dužine $320 \mu\text{m}$, visine $0.8 \mu\text{m}$ i širine $20 \mu\text{m}$, izolovani međusobno i od substrata silicijum dioksidom. Piezootpornici su p-tipa sa površinskom koncentracijom oko $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ tako da je izvršena "unutrašnja" temperaturna kompenzacija osetljivosti. Kako pn spoj ne postoji, izbegnuta je struja curenja i ostvaren je rad senzora pritiska na temperaturama iznad 120°C (mereno do 200°C). Karakteristike senzora (osetljivost, ofset i span) na temperaturama do merenih 200°C su zadovoljavajuće i postoji mogućnost "spoljašnje" pasivne temperaturne kompenzacije.

Problemi koji bi mogli nastati u daljem merenju i ispitivanju ovoga senzora pritiska su uglavnom vezani za

izdržljivost metalnih kontakata. Aluminijum ne može izdržati visoke temperature pa je naša pretpostavka da će jedan od faktora, koji će ograničiti maksimalnu temperaturu na kojoj može da radi senzor, upravo biti metalizacija. Dozvoljena maksimalna temperatura će se odrediti kada se razvije nova merna metoda u kojoj će moći istovremeno da se primene temperature iznad 200⁰C i pritisci od interesa. Pored razvoja



a)



b)

Sl. 5. Karakteristike transjusera SOI SP-9 broj 2.1. za opseg od 50 bara bez primenjene "spoljašnje" pasivne temperaturne kompenzacije. a) Ofset transjusera. b) Span transjusera.

nove merne metode, potrebno je vršiti i ispitivanja rada senzora bez prisustva silikonskog ulja i metalne membrane da bi se odbacili njihovi uticaji i dobile karakteristike samog senzora. U daljim merenjima, pored metroloških karakteristika, zadatak će nam biti i ispitivanje stabilnosti senzora na visokoj temperaturi i visokom pritisku.

LITERATURA

- [1] P.W. Bath and K.E. Petersen, "Mechanical sensor for high temperature environments", U.S.# 4 904 978, 1990.
- [2] K. Peterson, J.Brown, T. Vermeulen, P. Barth, J. Mallon, JR. and J. Bryzek, "Ultra-stable, High-temperature Pressure sensors Using Silicon Fusion Bonding", *Sensors and Actuators*, Vol. A21-A23, 1990, pp. 96-101.
- [3] R. Kloeck and N.F. de Rooij, "Mechanical sensors", *Semiconductor Sensors*, Ed. by S.M.Sze, John Wiley&Sons, Inc., 1994.
- [4] N. Maluf, *An Introduction to Microelectromechanical System Engineering*, Artech House, Boston-London, 2000.
- [5] В.И.Ваганов, *ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ*, Энергоатомиздат, Москва, 1983.
- [6] J. Choma, "The computation of Semiconductor Sheet Resistance", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. Ed-32, No. 4, April 1985, pp. 845-846.
- [7] N.D. Arora, J.R. Hauser and D.J. Roulston, "Electron and Hole Mobilities in Silicon as a Function of Concentration and Temperature", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. Ed-29, No. 2, February 1982, pp. 292-295.
- [8] J.M. Dorkel and P. Leturcq, "Carrier mobilities in silicon semi-empirically related to temperature, doping and injection level", *Solid State Electronics*, Vol. 24, No. 9, 1981, pp. 821-825.
- [9] N.G. Einspruch, *VLSI Handbook*, Academic Press, Orlando, 1985.
- [10] J. Matović, Z. Đurić, N. Simičić, D. Tanasković, M. Matic, M. Smiljanić, R. Petrović, "Silicijumski piezootporni senzor pritiska sa dijafragmom", MIDEM 19, Ljubljana, 1989, str. 13-21.

Abstract – Diffused piezoresistors of IHTM-CMTM piezoresistive pressure sensor consists of p-type regions in an n-type substrate. Previously designed pressure sensor had limited operation temperature range because the leakage currents of pn junction become unacceptable at temperatures above about 120⁰C. The new piezoresistive pressure sensors have been fabricated with expanded operation temperature range. These sensors are fabricated by standard microelectronic technology, micromachining and technology on the Silicon-On-Insulator (SOI) wafers. The SOI pressure sensors have piezoresistors dielectrically isolated from each other and from substrate by SiO₂. The transducer prototype performance was satisfactory at temperatures as high as 200⁰C.

PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSOR ON SOI WAFERS FOR HIGH TEMPERATURE ENVIRONMENT

Milče Smiljanić, Zoran Đurić, Žarko Lazić, Mirjana Popović, Katarina Radulović