

Montaža čipova MEM silicijumskih piezorezistivnih senzora pritiska primenom različitih adheziva

Vesna B. Jović, Milan J. Matić, Branko M. Vukelić, Marko S. Starčević, Milče M. Smiljanić, Jelena S. Lamovec, Miloš D. Vorkapić

Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Centar za mikroelektronske tehnologije i monokristale (IHTM – CMTM), Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

Izvod

U ovom radu se porede i diskutuju adhezivi koji su korišćeni za montažu čipova silicijumskih piezorezistivnih senzora pritiska. Posebna pažnja je poklonjena montaži čipova senzora za niske pritiske (<1 bar) zbog toga što su oni posebno osetljivi na naprezanja koja nastaju kao posledica samog procesa montaže i karakteristika primenjenih materijala. Za montažu čipa na kućište su korišćeni komercijalno dostupni adhezivi „Scotch Weld 2214 Hi-Temp“ proizvođača „3M Co.“ i „DM2700P/H848“ proizvođača „DIEMAT“, SAD. Prvi adheziv je epoksidna pasta sa česticama aluminijuma kao puniocem, a drugi je pasta stakla sa niskom temperaturom topljenja. Poredeći karakteristike montiranih čipova piezorezistivnih MEM senzora niskog pritiska, pokazano je da je za ovu primenu montaže pogodnije koristiti pastu stakla sa niskom temperaturom topljenja, jer senzori montirani primenom ovog adheziva mogu da se pasivno temperaturno kompenzuju i ta kompenzacija je vrlo stabilna. Montaža senzora ovim adhezivom pruža mogućnost rada senzora i na povišenim temperaturama do 120 °C.

Cljučne reči: mikro-elektro-mehanički (MEM) piezorezistivni senzor relativnog pritiska; staklena pasta sa niskom temperaturom topljenja; epoksidna pasta sa aluminijumskim puniocem; pasivna temperaturna kompenzacija senzora pritiska.

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

Tehnike pakovanja MEM (mikro-elektro-mehaničkih) senzora su izvedene od tehnologija pakovanja standardnih poluprovodničkih komponenti i hibridnih pakovanja prateće elektronike [1,2]. Postoje neke ključne razlike i zahtevi u inkapsulaciji MEM senzora koji proističu iz činjenice da senzor mora da bude u direktnom kontaktu sa sredinom koju karakteriše i pri tome je izložen agresivnim komponentama te sredine, radu na povišenim temperaturama i nepredvidivim mehaničkim šokovima. Stoga je konstrukcija pakovanja MEM senzora stalna potreba da se razvije pakovanje koje mora da ispuni sve zahteve i da pri tome ima svoju ekonomsku opravdanost. Mnogi od zahteva za pakovanje MEM piezorezistivnih senzora su u vezi sa konstrukcijom senzora i primenom. Pre je pravilo nego izuzetak da svaki proizvođač osmišljava vlastiti način pakovanja u skladu sa tehnološkim mogućnostima i nekim opštim zahtevima koji se moraju ispuniti da bi se eliminisao uticaj pakovanja na karakteristike senzora.

Glavni zahtevi pakovanja mogu se grubo podeliti na električne zahteve, zahteve vezane sa termalnim karakteristikama pakovanja i mehaničke zahteve. Dok su prva dva zahteva relativno jasna i opšta i za MEM sisteme i

STRUČNI RAD

UDK 621.38

Hem. Ind. 65 (5) 497–505 (2011)

doi: 10.2298/HEMIND110509044J

za poluprovodničke komponente, mehanički zahtevi se grubo mogu podeliti u tri kategorije: minimizacija naprezanja izazvana nesaglasnošću termičkih koeficijenata širenja materijala koji formiraju pakovanje i samog senzorskog čipa, minimizacija naprezanja koje nastaje usled dejstva spoljašnjih opterećenja i eliminisanje mehaničkih lomova pakovanja u toku eksploatacije senzora. S obzirom na to da su senzori pritiska tipovi uređaja koji su vrlo osetljivi na naprezanja, prva dva razmatranja su i vučna sila za razvoj i poboljšanje pakovanja. Smanjenje naprezanja koje unosi način pakovanja, a posebno njegova temperaturna zavisnost, do nivoa koji neće uticati na pokazivanje senzora, težak je i zahtevan posao. Rezultat ovoga je da cena pakovanja iznosi i do 2/3 ukupne cene pojedinačnog senzora [3].

Različito termičko širenje među komponentama pakovanja (na primer između senzorskog čipa na monokristalnom Si i staklene podloške koja nosi čip i adheziva, kojim se čip sa podloškom montira u kućište, glavni je uzrok naprezanja na čipu koja su izazvana načinom pakovanja, a koja nastaju za vreme termičkog cikliranja. Ovaj problem se ne može rešiti samo korišćenjem materijala koji imaju slične ili čak podudarne koeficijente termičkog širenja u pojedinim temperaturnim oblastima, jer je spektar materijala koji se koriste za inkapsulaciju vrlo različit pa samim tim oni imaju i čitav niz termomehaničkih osobina. Posledica je da se pakovanje mora optimizovati da bi se minimizirao uticaj uvedenih naprezanja usled rada u zadatom opsegu temperatura.

Prepiska: V.B. Jović, IHTM – CMTM, Njegoševa 12, 11000 Beograd, Srbija.

E-pošta: vjovic@nanosys.ihtm.bg.ac.rs

Rad primljen: 9. maj, 2011

Rad prihvaćen: 23. jun, 2011

Predviđanje znaka (da li je skupljanje ili širenje) i veličine naprezanja koja deluju na senzorski čip inkapsuliran u kućište konstruisano upotrebom više materijala je vrlo zahtevan i kompleksan posao. Jedan od načina optimizacije je konstrukcija i realizacija pakovanja i naknadno testiranje karakteristika senzora u radnom intervalu temperature.

EKSPERIMENTALNI DEO

MEM piezorezistivni senzor pritiska je urađen primenom tehnike zapreminskog mikromašinstva [4]. Piezootpornici su formirani selektivnim difuzijom bora u monokristalni silicijum (100) orijentacije i n -tipa provodnosti i raspoređeni su u konfiguraciji Vitstonovog (*Wheatstone*) mosta na ivicama membrane realizovane vlažnim hemijskim nagrizanjem. Piezorezistivni senzor sadrži dva longitudinalna piezootpornici (R_2 i R_3) i dva transverzalna piezorezistora (R_1 i R_4) u granama Vitstonovog mosta koji je šematski prikazan na slici 1. Most se napaja strujom konstantne jačine (2,5 mA). R_1 – R_4 su piezootpornici formirani difuzijom B u monokristalnom Si. R_p je otpornik kojim se izlaz temperaturno kompenzije za pun merni opseg (eng. *span*). R_{2kr} i R_{3kr} su serijski otpornici za korekciju odstupanja od nulte vrednosti. R_{3kp} i R_{2kp} su otpornici za temperaturnu kompenzaciju odstupanja od nulte vrednosti.

Piezootpornici mere naprezanje na ivicama membrane koja se deformiše pod uticajem sile primenjenog pritiska i generišu električni izlaz proporcionalan ugibu membrane. MEM piezorezistivni senzori pritiska, koji su predmet ispitivanja u ovom radu, urađeni su u IHTM – Centru za mikroelektronske tehnologije i monokristale iz Beograda [5].

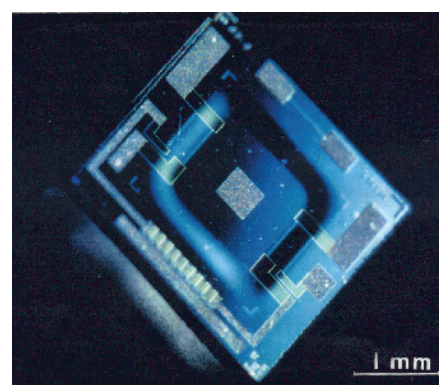
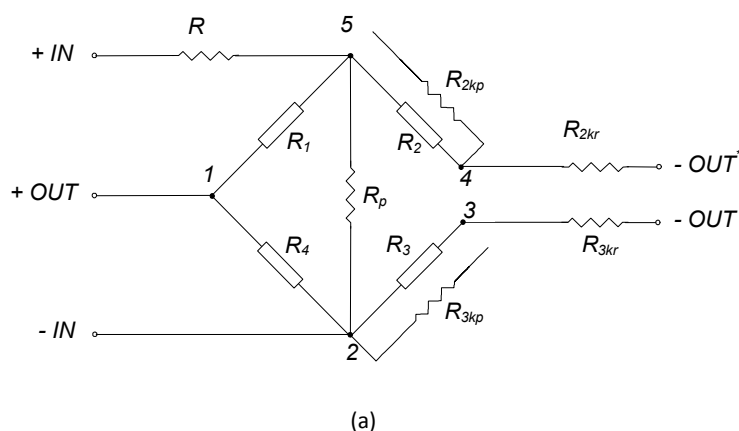
Čip piezorezistivnog senzora pritiska se sastoji od MEM senzora koji je anodno zabondovan sa staklenom podložkom. Podložka je od stakla koje se može anodno

bondovati i ima koeficijent termičkog širenja kompatibilan sa Si (Pyrex[®], Corning 7740) [6]. Na staklenoj podlozi postoji otvor kojim se ostvaruje kontakt Si membrane i sredine čiji se pritisak meri.

Čip se montira na staklenu cevčicu (termički koeficijent širenja je kompatibilan sa Si), koja prolazi kroz centar komercijalnog tranzistorskog kućišta. Ovaj način montaže omogućava da se pritisak dovede sa obe strane senzorskog čipa i na taj način realizuje senzor relativnog pritiska. Šematski prikaz montiranog MEM piezorezistivnog senzora pritiska na komercijalno podnožje tranzistorskog kućišta (TO) je dat na slici 2.

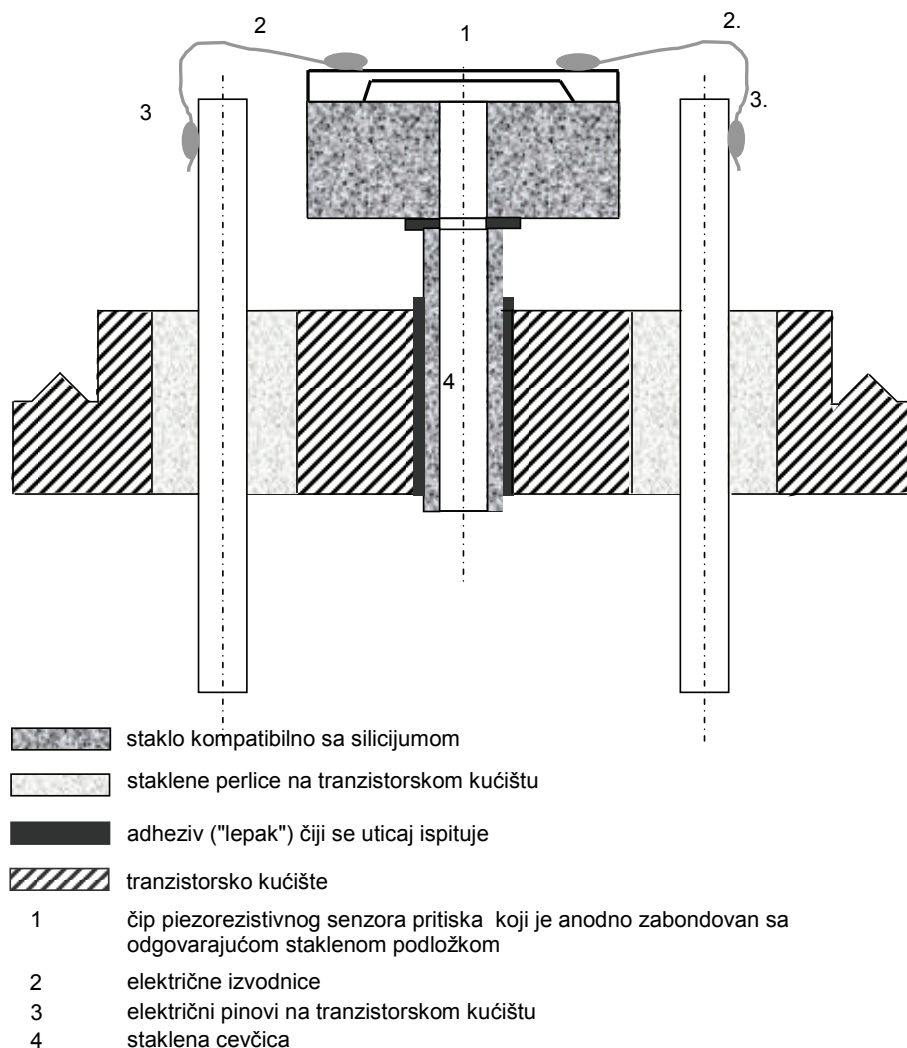
Na šematskom prikazu na slici 2 crnom bojom je označen adheziv (lepak) kojim se staklena cevčica učvršćuje za tranzistorsko kućište (spoj koji se uvek formira prvi) i isti adheziv kojim se senzorski čip lepi po obodu cevčice. Ovaj spoj cevčice i čipa senzora pritiska svojim termo-mehaničkim osobinama najviše utiče na karakteristike piezorezistivnog senzora pritiska. Adhezivi unose dodatna mehanička naprezanja na mestima spajanja prvenstveno usled nesaglasnosti njihovih koeficijenata termičkog širenja i koeficijenata termičkog širenja materijala koji se spajaju. Na uvođenje dodatnih naprezanja utiče i promena elastičnih osobina materijala sa temperaturom, na primer Jungovog modula elastičnosti, granice razvlačenja i slično.

Pokazuje se da metod inkapsulacije ima presudnog uticaja na karakteristike ovog tipa senzora. MEM piezorezistivni senzor pritiska konvertuje mehaničko naprezanje u električni signal i ne može da se razlikuje naprezanje nastalo na senzoru usled dejstva signala (sile pritiska) i naprezanje na piezorezistorima koje nastaje usled dejstva termičkog cikliranja ili drugih pojava (naprezanje izazvano razlikom u veličini koeficijenata termičkog širenja, naprezanje izazvano očvršćavanjem adheziva, unutrašnja naprezanja u Si izazvana difuzijom primesa tokom formiranja piezootpornika i slično) [7,8].



Slika 1. a) Konfiguracija piezootpornika senzora pritiska u Vitstonovom mostu; b) fotografija MEM piezorezistivnog senzora pritiska sa gornje strane membrane na kojoj se vidi raspored piezootpornika.

Figure 1. a) Wheatstone bridge configuration of piezoresistors for pressure sensors; b) photograph of Si sensor chip from the front side where the resistors arrangement can be seen.



Slika 2. Šematski prikaz montiranog piezorezistivnog senzora relativnog pritiska.
 Figure 2. Schematic presentation of mounted relative pressure sensor chip.

Montiran senzor pokazuje promenu parametara sa temperaturom i iz merenja određenih karakteristika senzora može se odrediti optimalan adheziv, odnosno način montaže čipova senzora pritiska koja će za rezultat imati senzore sa odgovarajućim karakteristikama posle pasivne temperaturne kompenzacije [9].

Adhezivi koji se koriste za spajanje čipa piezorezistivnog senzora pritiska sa kućištem i termička obrada adheziva

Testirana su dva adheziva i to: epoksidna pasta u kojoj je punilac aluminijum pod nazivom „Scotch Weld 2214 Hi-Temp“ proizvođača „3M Co.“, SAD i pasta niskotopivog stakla „DM2700P/H848“ proizvođača „DIEMAT“, SAD.

U tabeli 1 navedene su neke od karakteristika korišćenih pasti koje imaju uticaja na pakovanje senzora. Radi poređenja navedene su i relevantne karakteristike

monokristalnog Si i pireks stakla koje može da se anodno bonduje sa silicijumom.

„Scotch Weld 2214 Hi-Temp“ adheziv se nanosio ručno na površine koje se spajaju (bonduju). Redosled lepljenja je kao što je navedeno. Spoj očvršćava zagrevanjem na 120 °C u vazdušnoj atmosferi.

Adheziv „DM2700P/H848“ sadrži čestice stakla sa niskom temperaturom topljenja (<350 °C) koje su dispergovane u organskom vezivu. Prečnik čestica stakla je manji od 15 μm. Ovaj adheziv se nanosi ručno i proces termičke obrade se u najopštijem slučaju sastoji iz tri stupnja: stupanj sagorevanja organskog veziva iz paste (eng. *organic burn-out step*), stupanj površinskog ostakljivanja (eng. *glazing step*) i stupanj formiranja neraskidive veze (eng. *sealing step*), odnosno potpunog ostakljivanja spoja. Tokom prvih dva stupnja obrade, površine koje se spajaju su razdvojene, zatim se dovode u kontakt i formira se spoj potpunim ostakljivanjem paste.

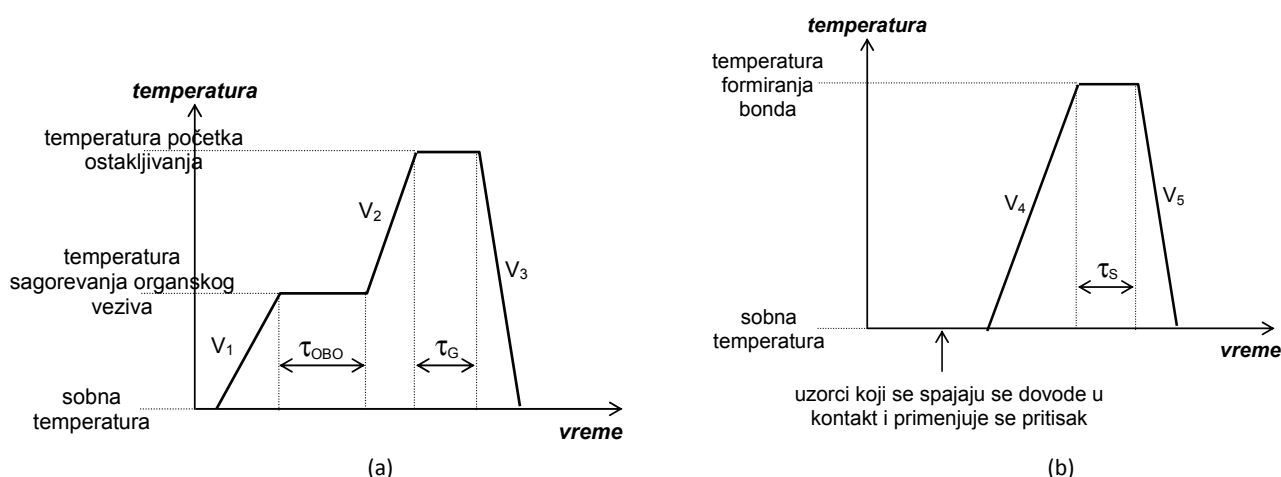
Tabela 1. Poređenje važnih karakteristika korišćenih adheziva (staklena pasta sa niskom temperaturom topljenja i epoksidna pasta sa aluminijumom kao puniocom), Si i pireks stakla

Table 1. Comparisons of important properties of two adhesives used for packaging dies (LMT glass and aluminum filled epoxy), Si and pyrex glass

Karakteristika	Si	Pyrex® # 7740 (Corning Inc., Corning, NY)	Scotch Weld 2214 Hi-Temp (3M Co.)	DM2700P/H848 (DIEMAT™, USA)
Koeficijent termičkog širenja $\times 10^6, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	2,4 (7 °C) i 3,2 (127 °C)	3,25 (0–300 °C)	48 (0–80 °C)	7.7 (25–150 °C)
Termička provodnost na 300 K, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	149	1,35	0,327	Nedostupna, neznatno niža od masivnog stakla.
Dielektrična konstanta	11,8	4,6 (1 MHz, 25 °C)	6,2 (23 °C, ASTM-D-150) 7,8 (90 °C, ASTM-D-150)	71 (1 MHz, 25 °C)
Zapreminska otpornost, $\Omega\cdot\text{cm}$	–	$1,2 \times 10^6$ (250 °C) i $4,0 \times 10^4$ (300 °C)	$9,4 \times 10^{14}$ (23 °C)	$> 10^9$
Maksimalna radna temperatura, °C	Za visoke radne temperature (>120 °C), piezorezistori se prave na SOI podlogama.	821 (temperatura omekšavanja)	120	215 (tranziciona temperatura) 275–285 (temperatura omekšavanja)
Hermetičnost i degazacija	–	Anodno zabondovan spoj Si–staklo ima izvrsnu hermetičnost i nisku degazaciju limitiranu difuzijom gasa kroz spoj.	Hermetičnost spoja je ograničena nepropusnošću epoksidnog veziva.	Odlična, vrlo niska.
Adhezija	–	Može anodno da se bonduje sa Si.	Dobra adhezija na staklu, Si i kovaru.	Visok stepen adhezije u odnosu na Si–Si, Si–alumina, Si–pireks staklo, itd., uključujući i pozlaćene površine.

Ovaj način inkapsulacije MEM komponenti, odnosno bondovanja primenom niskotopivih stakala je univerzalna tehnologija za inkapsulaciju na nivou supstrata [10,11].

Na slici 3 prikazan je šematski prikaz termičkog ciklusa obrade paste stakla sa niskom temperaturom topljenja. Termički proces obrade paste se odvija u protoku suvog azota ($500 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$) u peći „Tempress Ju-



Slika 3. Šematski prikaz temperaturnog režima obrade paste stakla sa niskom temperaturom topljenja, koji se sastoji iz dva odvojena termička ciklusa. a) Termički ciklus obrade staklene paste koji ima za cilj sagorevanje organskog veziva u pasti i površinsko ostakljivanje očvršle paste; b) termički ciklus kojem se podvrgava par koji se bonduje s ciljem formiranja neraskidive veze.

Figure 3. Schematic presentation of temperature profile during processing of low melting temperature (LMT) sealing glass paste, which consists of two separate thermal steps. a) Organic burn-out and glazing temperature profile; b) thermal profiling for bonding pair directed towards permanent sealing.

nior“ sa horizontalnom grejnom zonom koja se sastoji iz tri elektrootporna grejača čija temperatura se nezavisno kontroliše preko digitalnog kontrolora temperature (DTC). Peć sa DTC-om omogućava programiranje brzina grejanja i hlađenja i održavanje konstantne temperature u ravnoj zoni peći u zadatim intervalima vremena. Dovoljno dugačka zona uniformne temperature (≈ 25 cm) omogućava da se istovremeno termički obradi veći broj uzoraka.

Uzorak koji se inkapsulira nalazi se u nosaču od nrdajućeg čelika i sve se nalazi u kvarcnoj cevi sa uvodnicima za termopar (kuglica termopara se nalazi iznad uzorka koji se bonduje i na taj način se kontroliše stvarna temperatura uzorka) i ulaz i izlaz inertnog gasa.

U prvoj fazi se uzorak sa nanetom pastom ubacuje u već zagrejanu peć i podvrgava termičkom režimu u skladu sa prikazom na slici 3a. U ovom delu ciklusa sklopovi koji se spajaju su razdvojeni – pasta je naneta i na senzorski čip i na vrh staklene cevčice sa kojim će se spojiti. Na ovom prikazu, sa V_1 su označene realne brzine zagrevanja ili hlađenja, onako kako se registruju na termoparu u sistemu. V_1 je brzina zagrevanja od sobne temperature do temperature sagorevanja organskog veziva iz paste i ona ne bi smela da bude veća od $5\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Temperatura sagorevanja organskog veziva je $350\text{ }^\circ\text{C}$, a vreme sagorevanja, označeno sa τ_{OBO} na slici 3a, jeste 30 min. U istom termičkom ciklusu, po okončanju sagorevanja, uzorak sa delimično otvrdlom pastom se greje velikom brzinom, V_2 u opsegu od 30 do $60\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ do temperature površinskog ostakljivanja paste. Vreme površinskog ostakljivanja, τ_6 , vrlo je kratko i iznosi 2–3 min. Posle ovoga se uzorak sa delimično očvrslom pastom, hladi umerenom brzinom, V_3 , reda veličine $3\text{--}4\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ do sobne temperature.

Delovi sklopa sa delimično ostakljenom pastom koje je potrebno zabondovati, posle termičkog ciklusa na slici 3a, dovode se u kontakt primenom statičkog pritiska i ceo sistem se podvrgava procesu potpunog ostakljivanja staklene paste pri čemu se formira neraskidiva veza. Na ovaj način je formiran bond primenom međusloja tzv. staklene frite, koja predstavlja u potpunosti ostakljenu staklenu pastu. Temperaturni režim formiranja bonda je prikazan na šemi sa slici 3b. Relativno velikom brzinom grejanja, V_4 , uzorci koji se lepe i koji su u kontaktu, se greju do temperature od $350\text{ }^\circ\text{C}$, na kojoj bi trebalo da se u toku $3\text{--}4$ min (τ_5) formira spoj, odnosno da se odigra formiranje bonda (lepljenje) sa staklenim međuslojem. Brzina hlađenja do sobne temperature formiranog spoja, V_5 , mora da bude takva da spreči pucanje bonda usled eventualne razlike koeficijenata termičkog širenja substrata i ostakljene staklene paste. U našem slučaju se pokazalo da brzina hlađenja ne sme da bude veća od $2,5\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$.

Bondovanje niskotopivom staklenom pastom može da se izvodi i u atmosferi suvog vazduha, pri čemu su

temperature termičke obrade niže, a vremena bondovanja kraća. Rad u vakuumu uopšte nije pogodan, jer su tada formirani bondovi (ako se uopšte i obrazuju) vrlo porozni.

Testiranje montiranih MEM piezorezistivnih senzora pritiska

MEM piezorezistivni senzori relativnog pritiska su po okončanoj montaži testirani, kako bi se utvrdio uticaj adheziva, odnosno načina pakovanja čipova na kvalitet piezorezistivnih senzora relativnog pritiska.

Za testiranje je korišćena sledeća oprema:

- “Heraeus Vötsch” klima komora za testiranje (radna temperatura od -80 do $180\text{ }^\circ\text{C}$),
- strujni izvor “Agilent” E3649A programabilan izvor jednosmerne struje
- “Mensor”, series 600, automatizovani kalibrator pritiska i
- digitalni multimetar “Agilent” 34410A/11A, $6\frac{1}{2}$.

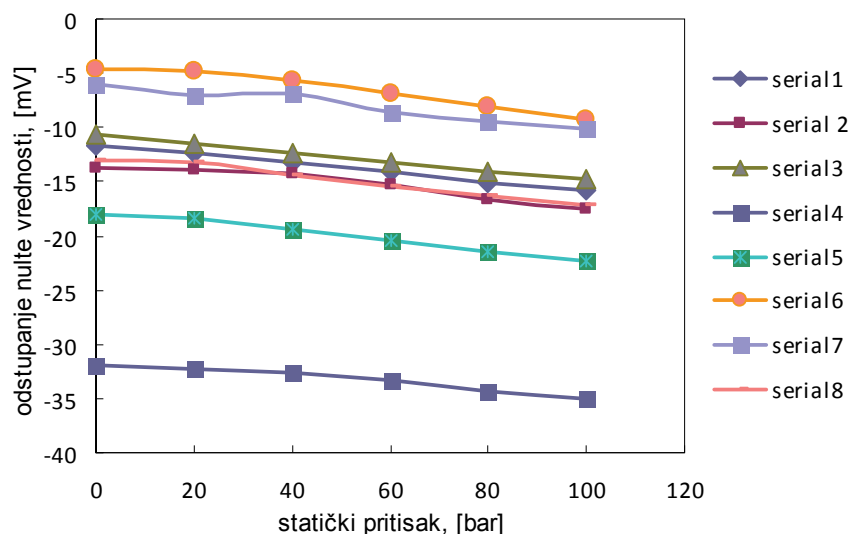
Za testiranje su korišćeni i senzori čiji je pun opseg merenja niži od $0,05$ bar, s obzirom da se na osetljivijim sensorima najviše iskazuju greške koje su posledica uticaja temperature, odnosno u ovom slučaju uticaja temperature na koeficijente termičkog širenja materijala montiranog senzora pritiska.

Merenja su vršena na tri temperature, kako se i inače vrši merenje senzora radi izračunavanja otpornika za pasivnu kompenzaciju Vitstonovog mosta senzora [12]. Pasivnom kompenzacijom se postiže da se temperaturne promene *offset*-a i *span*-a linearno kompenzuju do granice greške koja se zahteva za senzor pritiska. Pod *offset*-om se podrazumeva električni izlaz na senzoru koji postoji u uslovima kada bi trebalo da bude jednak nuli. S obzirom na to da je reč o sensorima relativnog pritiska, kada se sa obe strane senzora primeni isti pritisak, izlaz idealnog senzora bi trebalo da bude jednak nuli. To nije slučaj za realne senzore. Span je razlika izlaznih signala za maksimalni i minimalni pritisak (ulazni signal) na punom opsegu rada senzora.

REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 4 dat je grafički prikaz eksperimentalno utvrđenih zavisnosti promene odstupanja izlaznog signala na nultom pritisku (eng. *offset*) od primenjenog statičkog pritiska za osam čipova senzora relativnog pritiska koji su zabondovani primenom paste stakla sa niskom temperaturom topljenja (DM2700P/H848).

Iz podataka u tabeli 2 za čipove senzore pritiska čije su merene karakteristike prikazane na slici 4 vidi se da za sve senzore koji su montirani primenom paste stakla sa niskom temperaturom topljenja, parametar Δ ima približno istu vrednost od oko -4.0 mV. Δ je razlika *offset*-a za pojedinačne senzore relativnog pritiska za najviše i najniže primenjene statičke pritiske. Ova uniformna vrednost parametra Δ za sve senzore za koje su



Slika 4. Zavisnost nulte vrednosti signala od primenjenog statičkog pritiska za čipove koji su montirani primenom paste stakla sa niskom temperaturom topljenja. Merni opseg ispitivanih čipova je bio od 0 do 100 mbar.

Figure 4. Dependence of offset on applied static pressure for chips attached with LMT (Low Melting Temperature) glass paste. Pressure range for measured chips were from 0 to 100 mbar.

Tabela 2. Zavisnost offset-a (u mV) od primenjenog statičkog pritiska za čipove senzora relativnog pritiska koji su montirani pastom stakla sa niskom temperaturom topljenja. Prikazana je i izračunata vrednost parametra Δ određena kao razlika offset-a pri najvišem i najnižem primenjenom statičkom pritisku za svaki individualni sensor

Table 2. Dependence of offset (in mV) on applied static pressure for chips attached to package with LMT glass paste. From the difference between offsets at the highest and the smallest applied static pressures for each individual sensors, the Δ is calculated

Statički pritisak, bar	Broj Serijala							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	-11,7	-13,7	-10,7	-31,9	-18,1	-4,6	-6,1	-13,0
20	-12,4	-13,9	-11,6	-32,2	-18,4	-4,8	-7,0	-13,2
40	-13,2	-14,3	-12,4	-32,6	-19,4	-5,7	-6,8	-14,4
60	-14,2	-15,2	-13,2	-33,3	-20,4	-6,8	-8,6	-15,4
80	-15,0	-16,6	-14,1	-34,2	-21,4	-8,1	-9,4	-16,3
100	-15,8	-17,6	-14,7	-35,1	-22,4	-9,2	-10,1	-17,1
Δ / mV	-4,13	-3,9	-4,0	-3,2	-4,32	-4,6	-4,0	-4,0

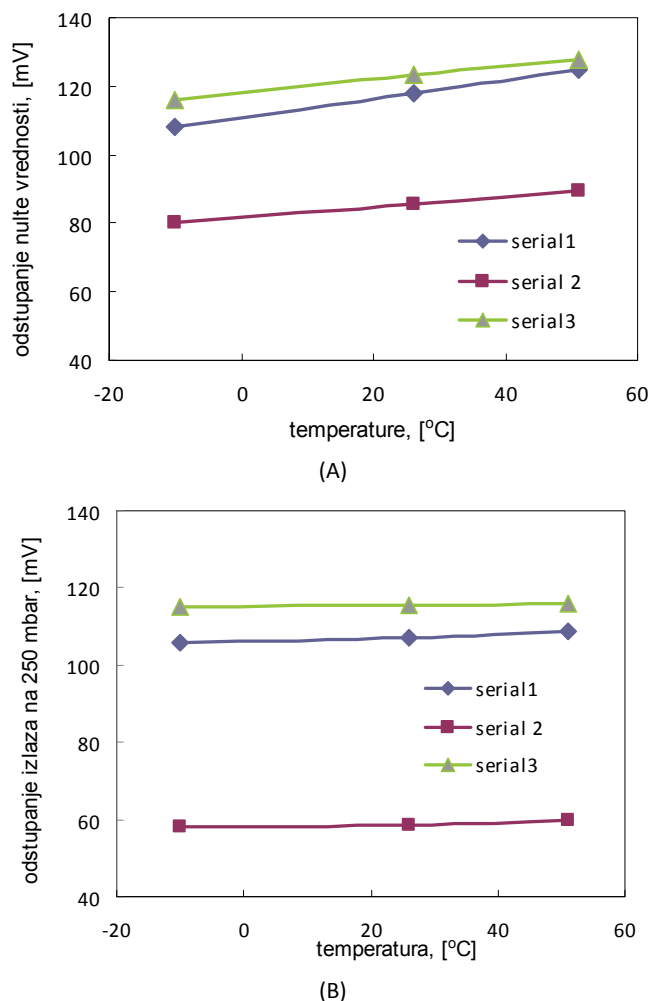
čipovi montirani na navedeni način, ukazuje na odsustvo unutrašnjeg naprezanja u čipovima koje bi bilo posledica načina bondovanja.

Na slici 5 prikazane su temperaturne zavisnosti *offset*-a, slika 5A, i *span*-a, slika 5B, za senzore relativnog pritiska koji su namenjeni za rad u mernom opsegu od 0 do 250 mbar. Čipovi ovih senzora pritiska su montirani primenom paste od stakla sa niskom temperaturom topljenja. Pokazuje se da je u ispitivanom opsegu temperatura (od -20 do 60 °C) ova zavisnost linearna.

U tabeli 3 prikazane su sumirane vrednosti otpornosti za pasivnu temperaturnu kompenzaciju izračunate iz eksperimentalnih rezultata na uobičajeni način za datu šemu mosta [12,13] (označeni sa R_{kp} , u $k\Omega$, na šemi Vitstonovog mosta, slika 1a) za senzore pritiska za koje su MEM piezorezistivni čipovi senzora montirani jednom od ispitivanih pasti.

Izračunavanja kompenzacije i rezultati merenja, neosporno ukazuju na činjenicu da otpornici za kompenzaciju temperaturne promene *offset*-a, koji su vezani paralelno sa odgovarajućom granom Vitstonovog mosta, za senzore montirane pastom stakla sa niskom temperaturom više su nego duplo veći u odnosu na otpornike potrebne za temperaturnu kompenzaciju senzora montiranih epoksidom sa aluminijumskim punjenjem. Ovaj rezultat govori da je kompenzacija *offset*-a senzora montiranih staklenom pastom znatno stabilnija.

Na osnovu merenja, za senzore montirane epoksidnom pastom sa puniocem, otpornik za kompenzaciju temperaturne promene *span*-a je u svim slučajevima imao negativne vrednosti, što znači da bi linearna temperaturna kompenzacija ovako montiranih senzora bila nemoguća. U grupi senzora montiranih pastom sa niskotopivim staklom, svi rezultati, bez izuzetka, bili su u



Slika 5. Temperaturna zavisnost promene odstupanja izlaznog signala na nultom pritisku (offset-a) (A) i izlaza pri punom mernom opsegu (span-a) (B) za senzore relativnog pritiska za merni opseg (0–250 mbar). Čipovi senzora relativnog pritiska su montirani primenom paste stakla sa niskom temperaturom topljenja.

Figure 5. Offset (A) and span (B) change with temperature for relative pressure sensors for measurement range (0–250 mbar). Chips or relative pressure sensors were attached to package with LMT glass.

Tabela 3. Vrednosti otpornosti R_{kp} , u $k\Omega$, za temperaturnu kompenzaciju offset-a za senzore relativnog pritiska koji rade u navedenim mernim opsezima. Čipovi senzora pritiska su montirani različitim adhezivima
Table 3. Values of R_{kp} , in $k\Omega$, resistors for offset temperature compensation for pressure sensors with different operating ranges. Chips are attached to package with two different adhesives

Montaža sa pastom od stakla sa niskom temperaturom topljenja		Montaža sa epoksidnom pastom sa Al puniocem	
Merni opseg pritiska, mbar			
0–250	0–100	0–30	0–30
5,22	7,15	4,71	–1,67
7,19	5,17	3,34	–1,67
28,45	6,34	2,68	–2,08
–	5,70	–	–10,01
–	6,71	–	–0.50

uobičajenim granicama, što daje mogućnost kompenzacije u standardnim granicama.

Navedeni rezultati pokazuju da je montiranje čipova MEM piezorezistivnih senzora pritiska optimalno kada

se izvodi primenom paste stakla sa niskom temperaturom topljenja. Ovaj način montaže senzora omogućava da se na reproduktibilan način kontrolišu faktori koji utiču na promenu pokazivanja senzora sa prome-

nom temperature ambijenta u kojoj se merenje odvija. Promena *span*-a, otpornosti otpornika u mostu i *offset*-a senzora je pod kontrolom jer se može primeniti linearna (pasivna) temperaturna kompenzacija.

Osim navedenog, inkapsulacija ovog tipa senzora relativnog pritiska na Si pruža mogućnost proširenja opsega temperatura do 120 °C u kojima senzor radi pouzdano. Na višim temperaturama rad senzora ograničava izolacija p-n spoja pa se senzor radi na SOI (eng. *silicium on insulating*) substratima [14]. Staklena pasta je rešenje i za tu vrstu MEM piezorezistivnih senzora pritiska.

ZAKLJUČAK

Ispitivan je uticaj vrste adheziva koji se koristi za inkapsulaciju (pakovanje) Si mikro-elektro-mehaničkih (MEM) piezorezistivnih senzora relativnog pritiska. Senzori su urađeni na substratima Si tehnikom zapreminskog mikromašinstva i namenjeni su za merenje niskih pritisaka (<0,05 bara). Testirana su dva adheziva: pasta stakla sa niskom temperaturom topljenja (DM 2700P/H484) i epoksidna pasta sa metalnim puniocem (Scotch weld 2214 Hi-Temp).

Merenja su vršena na trima temperaturama u opsegu od –20 do 60 °C, kako se i inače vrši merenje senzora radi izračunavanja otpornika za pasivnu kompenzaciju Vitstonovog mosta senzora. Pasivnom kompenzacijom se postiže da se temperaturne promene *offset*-a i *span*-a linearno kompenzuju do granice greške koja se zahteva za senzor pritiska.

Nakon izračunavanja kompenzacije i rezultata merenja, neosporno je zaključeno da su otpornici za kompenzaciju temperaturne promene *offset*-a, koji su postavljani paralelno sa odgovarajućom granom mosta, za grupu senzora bondovanih pastom stakla sa niskom temperaturom topljenja, više nego duplo veći u odnosu na otpornike potrebne za temperaturnu kompenzaciju senzora montiranih lepljenjem epoksidom sa aluminijumskim punjenjem. Ovaj rezultat ukazuje da je kompenzacija *offset*-a senzora montiranih staklenom pastom znatno stabilnija.

Na osnovu merenja, za senzore montirane epoksidnom pastom sa puniocem, otpornik za kompenzaciju temperaturne promene *span*-a je u svim slučajevima imao negativne vrednosti, što znači da bi linearna temperaturna kompenzacija ovako montiranih senzora bila nemoguća. U grupi senzora montiranih pastom sa niskotopivim staklom, svi rezultati, bez izuzetka, bili su u uobičajenim granicama, što daje mogućnost kompenzacije u standardnim granicama.

Rad sa pastom stakla sa niskom temperaturom topljenja minimizira naprezanja izazvana nesaglasnošću temperaturnih koeficijenata širenja između senzora, kućišta i adheziva za montažu. Ovaj adheziv svodi na

najmanju meru i naprezanja koja se uvode dejstvom spoljnje sile pritiska pri merenju.

Primena paste stakla sa niskom temperaturom topljenja za inkapsulaciju piezorezistivnih senzora pritiska na Si substratima omogućava da se proširi temperaturna oblast njihovog rada do 120 °C. Ova mogućnost proširenja temperaturnog intervala primene piezorezistivnih MEM senzora pritiska na monokristalnom Si proističe direktno iz više temperaturne stabilnosti adheziva stakla sa niskom temperaturom topljenja s obzirom na to da je ova temperatura maksimalna radna temperatura za ovakva izvođenja piezootpornika na Si. Ova pasta se može koristiti i za inkapsulaciju piezorezistivnih senzora pritiska na SOI supstratima koji su predviđeni za rad na povišenim temperaturama (do 300 °C). Zamenom supstrate monokristalnog Si, SOI supstratima proširuje se opseg radnih temperatura piezorezistivnih senzora a da pri tome za montažu može da se koristi ista vrsta adheziva.

Zahvalnica

Ovaj rad je urađen u okviru projekta tehnološkog razvoja TR 32008 pod nazivom: “Mikro, nano-sistemi i senzori za primenu u elektroprivredi, procesnoj industriji i zaštiti životne sredine”, koji finansira Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] L.-Y. Chen, J.-F. Lei, in: The MEMS Handbook: Packaging of Harsh-Environment MEMS Devices, M. Gad-el-Hak (Ed.), CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2002, pp. 862–884
- [2] Handbook of Semiconductor Interconnection Technology, 2nd ed., G.C. Schwartz, K. V. Srikrishnan (Eds.), CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2006
- [3] S. Beeby, MEMS Mechanical Sensors, Artec House, Inc., Norwood, MA, USA, 2004
- [4] V. Lindroos, M. Tilli, A. Lehto, T. Motooka, Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies, Elsevier Inc., William Andrew, USA, 2010
- [5] J. Matović, Z. Djurić, N. Simičić, A. Vujanić, Piezjunction effect based pressure sensor, Eletron. Lett. **29** (1993) 565–566
- [6] J.A. Dziuban, Bonding in Microsystem Technology, Springer, The Netherlands, 2006
- [7] J. Singh, K. Nagachenchaiah, M.M. Nayak, MEMS Based Pressure Sensors – Linearity and Sensitivity Issues, Sensors & Transducers Journal, 90th Special Issue, 2008, 221–232
- [8] Q. Wang, J. Ding, W. Wang, Fabrication and temperature coefficient compensation technology of low cost high temperature pressure sensor, Sensor. Actuator. A **120** (2005) 468–473
- [9] K.H. Peng, C.M. Uang, Y.M. Chang, The temperature compensation of the silicon piezo-resistive pressure sensor using the half-bridge technique, Proc. SPIE, **5343** (2004) 292–301

- [10] R. Knechtel, Single crystalline silicon based surface micromachining for high precision inertial sensors: technology and design for reliability, *Microsyst. Technol.* **16** (2010) 885–893
- [11] R. Knechtel, M. Wiemer J. Frömel, Wafer level encapsulation of microsystems using glass frit bonding, *Microsyst. Technol.* **12** (2006) 468–472
- [12] S. Soloman, *Sensors Handbook*, 2nd ed., The McGraw-Hill, NY, 1999
- [13] J.S. Wilson *Sensor Technology Handbook*, Elsevier Inc., USA, 2005
- [14] A. Sanz-Velasco, A. Nafari, H. Rödjegård, M. Bring, K. Hedsten, P. Enoksson, S. Bengtsson, Sensors and actuators based on SOI materials, *Solid State Electron.* **50** (2006) 865–876.

SUMMARY

ATTACHMENT OF MEM PIEZORESISTIVE SILICON PRESSURE SENSOR DIES USING DIFFERENT ADHESIVES

Vesna B. Jović, Milan J. Matić, Branko M. Vukelić, Marko S. Starčević, Milče M. Smiljanić, Jelena S. Lamovec, Miloš D. Vorkapić

IChTM – Center of Microelectronic Technologies and Single Crystals, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

(Professional paper)

This paper gives comparison and discussion of adhesives used for attachment of silicon piezoresistive pressure sensor dies. Special attention is paid to low pressure sensor dies because of their extreme sensitivity on stresses, which can arise from packaging procedure and applied materials. Commercially available adhesives „Scotch Weld 2214 Hi-Temp“ from “3M Co.” and „DM2700P/H848“ from „DIEMAT“, USA, were compared. The first is an aluminum filled epoxy adhesive and the second is a low melting temperature (LMT) glass paste. Comparing test results for low pressure sensor chips we found that LMT glass (glass frit) is a better adhesive for this application. Applying LMT glass paste minimizes internal stresses caused by disagreement of coefficients of thermal expansions between the sensor die and the housing material. Also, it minimizes stresses introduced during applying external loads in the process of pressure measuring. Regarding the measurements, for the sensors installed with filled epoxy paste, the resistor for compensation of temperature offset change had negative values in all cases, which means that linear temperature compensation of sensors installed this way would be impossible. In the sensors installed with LMT glass paste, all results, without exception, were in their common limits (values), which gives the possibility of passive temperature compensation. Furthermore, LMT glass attachment can broaden temperature operating range of MEM silicon pressure sensors towards higher values, up to 120 °C.

Keywords: Micro-electro-mechanical (MEM) piezoresistive relative pressure sensor • Low temperature melting glass paste • Aluminium filled epoxy paste • Pressure sensor passive temperature compensation