

## OJAČANJE DIJAFRAGME SENZORA PRITISKA NAGRIZANJEM U VODENOM RASTVORU TMAH KONCENTRACIJE 25 TEŽ. %

Milče M. Smiljanić, Milan Matić, Katarina Radulović, Žarko Lazić, Vesna Jović

IHTM – Institut za mikroelektronske tehnologije i monokristale, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Njegoševa 12, Srbija

**Sadržaj** – Primenom *maskless* tehnike, koja se bazira na vlažnom hemijskom nagrizanju u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80 °C, na Si pločice uspešno su napravljene dijafragme sa ojačanjem. Ojačanje je projektovano za ravne kvadratne dijafragme debljine 30 μm i površine 2040 μm x 2040 μm, čiji je nominalni opseg rada 1 bar. Vrednost pritiska na kojoj neojačana dijafragma puca je 12 bar. Eksperimentalno je pokazano da je ojačanje povećalo pritisak na kojem puca dijafragma 1.8 puta za dijafragmu sa ojačanjem širine 90 μm, odnosno 2.5 puta za dijafragmu sa ojačanjem širine 40 μm. Ovo poboljšanje pokazuje da je u okviru samog senzora moguće MEMS tehnologijama povećati vrednost pritiska na kojem dolazi do pucanja dijafragme i njenog nepopravljivog oštećenja.

### 1. UVOD

Standardni IHTM-CMTM silicijumski piezootporni senzori pritiska se ugrađuju na najkritičnijim mestima u industrijskim postrojenjima, termoelektranama, postrojenjima za transport gasa i nafte, itd. U svim ovim postrojenjima dolazi do oscilacija, udara, rezonantnih pojava, koji ne mogu da se predvide, a mogu da dovedu do pucanja dijafragme i nepopravljivog oštećenja samog senzora pritiska. Zaštita dijafragme od pucanja moguća je spoljnim mehaničkim zaštitnim sistemom, ali takav merni uređaj zbog svojih fizičkih dimenzija, odnosno inercije svojih delova, ne može uvek da pruži potpunu zaštitu. Najoptimalnija zaštita za senzore pritiska je ona koja se radi u okviru MEMS tehnologije. U IHTM-CMTM je razvijena zaštita od preopterećenja i pucanja kojom se ograničava ugib dijafragme senzora. Izrađen je uložak na koji se dijafragma osloni pre nego što se dostigne granica pucanja [1]. Uložak preuzima dalje povećanje pritiska i štiti dijafragmu od pucanja. Ova zaštita omogućava da dijafragma izdrži pritiske nekoliko stotina puta veće od vrednosti nominalnog pritiska za koji je projektovana. Jedina mana ovog rešenja je što se uložak izrađuje kao posebna komponenta i ugrađuje pod dijafragmu senzora tokom procesa anodnog bondovanja.

Druga vrsta zaštite, koja se radi na samom senzoru pritiska uz pomoć MEMS tehnologije, je tzv. ojačanje dijafragme senzora pritiska. Oštre ivice na prelazu kvadratne dijafragme u ram, Sl. 1g), uzrokuju da pritisak na kojoj dijafragma puca ima nisku vrednost. Da bi se povećala vrednost pritiska pucanja izrađuje se profilisana dijafragma tj. dijafragma sa ojačanjem [2-5]. Profilisanje dijafragme može se ostvariti zadržavanjem dijafragme na mestu oštih ivica [2,3], ili ublažavanjem konkavnog ugla preseka ravni (100) i {111} Sl.1g) zaobljavanjem vlažnim hemijskim izotropnim nagrizanjem [4] ili definisanjem novih ravni

vlažnim hemijskim anizotropnim nagrizanjem Sl. 1f) koje zaklapaju manji konkavni ugao sa ravni (100).

U IHTM-CMTM je uspešno razvijena *maskless* tehnika koja se bazira na vlažnom hemijskom anizotropnom nagrizanju Si pločice u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80 °C, [6-8]. Ova *maskless* tehnika omogućava izradu profilisane dijafragme definisanjem novih ravni koje zaklapaju manji konkavni ugao sa ravni (100). U ovom radu će se proučavati ojačana kvadratna dijafragma dobijena razvijenom *maskless* tehnikom, njena izrada i prednost nad neojačanom dijafragmom.

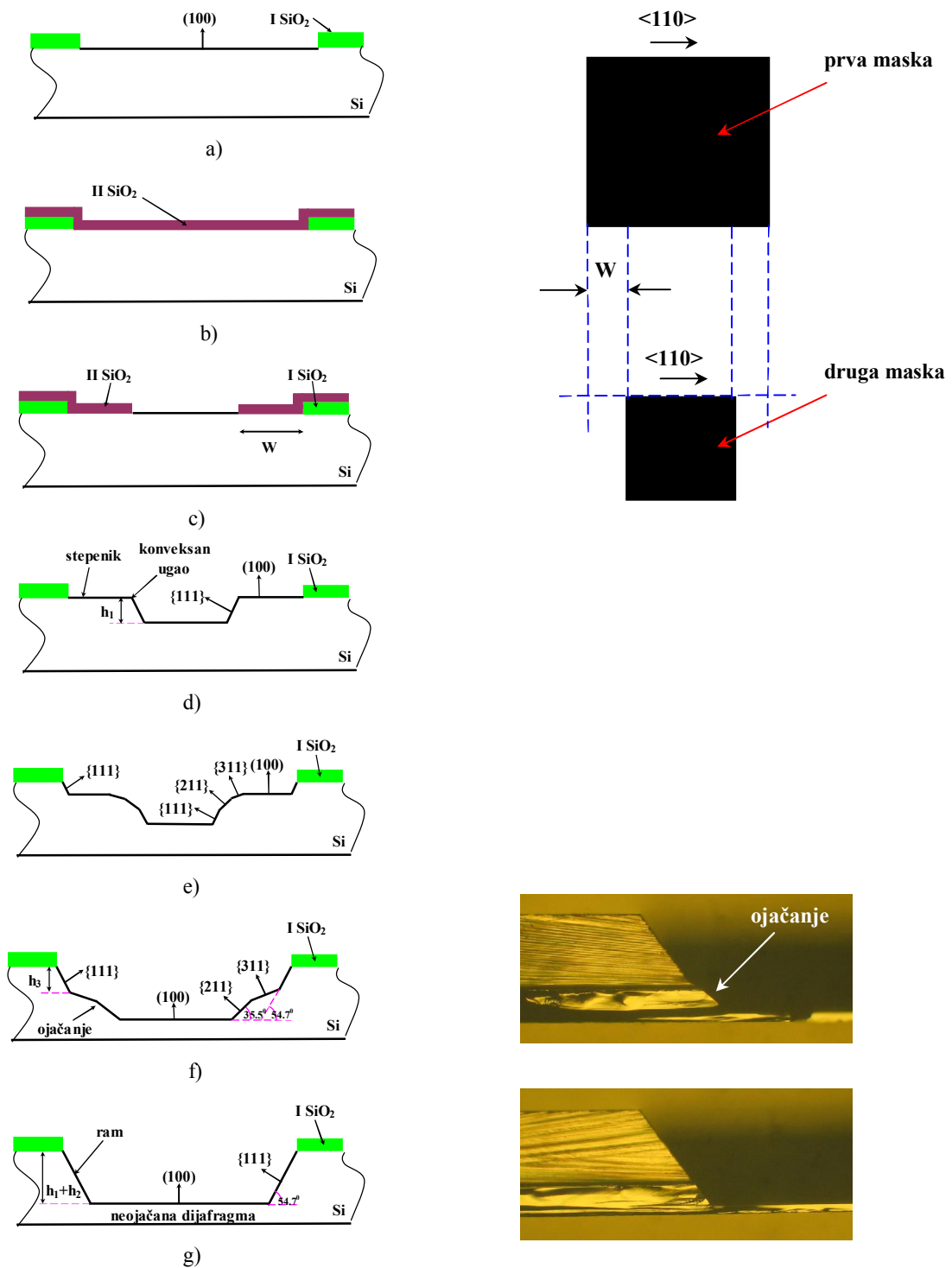
### 2. TEHNOLOGIJA IZRADE

Ojačane i neojačane kvadratne dijafragme su izrađene *maskless* tehnikom u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80 °C na pločicama jednostrano poliranog monokristalnog silicijuma, n-tipa, orijentacije (100) i debljine 385μm. Koriste se dve maske Sl.1a),c). Prva maska sadrži kvadrate čije su stranice u pravcu <110> i koje su veće ili jednake od stranica kvadrata u pravcu <110> na drugoj maski. Ovakvo projektovanje maski omogućava definisanje tzv. stepenika, Sl.1d). Širina *W* stepenika određuje oblik i dimenziju ojačanja na kraju *maskless* nagrizanja.

Posle potrebnih proračuna za tehnološke procese, vršeni su sledeći tehnološki postupci na izradi ojačane i neojačane dijafragme senzora pritiska na Si pločici:

- I termička oksidacija (1.4 μm) za prvu masku,
- I fotopostupak sa prvom maskom Sl. 1a),
- II termička oksidacija (0.6 μm) za drugu masku Sl.1b),
- II fotopostupak sa drugu masku Sl.1c),
- prvi deo nagrizanja Si pločice u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80 °C,
- skida se II silicijum dioksid (0.6 μm) sa stepenika Sl.1d),
- drugi deo nagrizanja (*maskless* nagrizanje) u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80 °C kojim se istovremeno na pločici realizuju i ojačana i neojačana dijafragma Sl.1.f),g).

Glavni princip *maskless* tehnike je da se posle prvog dela nagrizanja do određene dubine  $h_1$ , skida drugi maskirajući materijal (u ovom slučaju II SiO<sub>2</sub> od 0.6 μm sa stepenika profilisane dijafragme), a zatim se nastavlja drugi deo nagrizanja do određene dubine  $h_2$  tj. do formiranja željene strukture, pri čemu je deo strukture i



Sl.1. Šematski prikaz maskless tehnike u vodenom rastvoru TMAH koncentracije tež. 25% na temperaturi od 80 °C. a) I fotopostupak sa prvom maskom. b) II termička oksidacija za drugu masku. c) II fotopostupak sa drugu masku. d) Glavni princip maskless tehnike je da se posle prvog dela nagrizanja do određene dubine  $h_1$ , skida II SiO<sub>2</sub>. e) Drugi deo nagrizanja. Konveksan ugao koji je određen presekom ravni (100) i {111} napadaju brze ravni koje se javljaju pri maskless nagrizanju. f) Trenutak kad nestane ravan {111} i stepenik je određen samo sa ravnima {311} i {211} mora biti trenutak kada je završeno maskless nagrizanje. Ojačana dijafragma. g) Neojačana dijafragma iste debljine kao i ojačana dijafragma. Fotografije ojačane i neojačane dijafragma debljine 30 μm.

dalje zaštićen prvim maskirajućim materijalom (u ovom slučaju I SiO<sub>2</sub> od 1.4 μm za ram dijafragme), Sl.1. Zaštićeni deo strukture na kraju nagrizanja je viši od nezaštićenog dela strukture (sa kojeg je skinut drugi maskirajući materijal) za dubinu  $h_3$  koja zavisi od širine stepenika. Visina zaštićenog dela strukture je jednaka zbiru dubine  $h_1$  prvog dela nagrizanja i dubine  $h_2$  drugog dela nagrizanja u odnosu na dijafragmu [6].

Oblik ojačanja zavisi od širine stepenika. U trenutku kad se skinu drugi termički oksid, konveksan ugao koji je određen presekom ravni {100} i {111} više nije zaštićen (Sl.1d) i njega napadaju brze ravni koje se javljaju pri *maskless* nagrizanju. Sve ravni koje sa pojavljuju pri *maskless* nagrizanju u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80 °C, njihove brzine i uglovi koje ravni zaklapaju sa ravni {100} su date u Tabeli 1. Najbrža ravan {331} se razvija na preseku dve ravni iz familije {111}, dok se na preseku ravni {100} i {111} razvijaju ravni {311} i {211}, Sl.1e). Trenutak kad nestane ravan {111} i stepenik je određen samo sa ravnima {311} i {211} mora biti trenutak kada je završeno *maskless* nagrizanje Sl.1f). Da bi se to dogodilo potrebno je da bude ispunjen uslov koji je eksperimentalno dobijen:

$$h_2 = 0.24h_1. \quad (1)$$

Dubina prvog dela nagrizanja  $h_1$  Si pločice u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80 °C je 286 μm, a drugog dela  $h_2$  je 69 μm. Ostvarena je projektovana debljina dijafragme od 30 μm. Površina neojačane dijafragme je 2040 μm x 2040 μm. Granična vrednost širine stepenika  $W$  da bi nestala ravan {100} (koja postoji na Sl.1e) i da bi ojačanje bilo određeno samo ravnima {311} i {211} Sl.1f) je 192 μm. Za projektovane širine stepenika od 100 μm i 50 μm na drugoj maski, dobijene su širine ojačanja 90 μm i 40 μm, respektivno. Razlika između projektovane i dobijene širine je posledica male ali konačne brzine ravni {111} koja se ne može zanemariti, Tabela 1. Visine ojačanja u odnosu na dijafragmu su 124 μm i 51 μm za širine ojačanja 90 μm i 40 μm, respektivno.

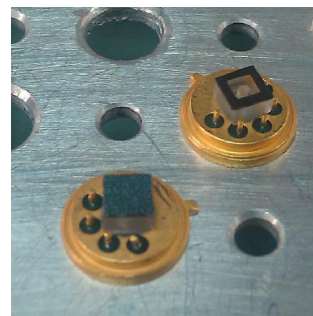
Tabela 1. Ravni koje se pojavljuju pri *maskless* nagrizanju u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80 °C, njihove brzine i uglovi  $\gamma$  koje ravni zaklapaju sa ravni {100}.

Ravan	Brzina nagrizanja [μm/min]	$\gamma$ [°] eksperiment	$\gamma$ [°] teorija
{100}	0.46	0	0
{211}	0.87	38.3, 64.5	35.3, 65.9
{331}	1.38	46.4	46.5
{311}	0.93	24.9	25.2
{301}	1.15	18.7, 70.9	18.4, 71.6
{111}	0.02	54.2	54.7

Posle završenih tehnoloških postupaka dobijeni su peleti bez ojačanja, sa ojačanjem širine 90 μm i sa ojačanjem širine 40 μm čije su spoljne dimenzije 3200 μm x 3200 μm. Na kraju tehnološkog ciklusa je izvršeno anodno bondovanje peleta za Pyrex<sup>R</sup> staklo sa otvorom.

### 3. MERNI METODA I REZULTATI

Uzorak silicijumske strukture za merenje se dobija tako što se pelet na staklenoj podlozi lepi na TO5 kućište sa otvorom za merenje relativnog pritiska, Sl.2. Pritisak je primenjen za gornje strane silicijumske strukture i povećavan je do pucanja dijafragme. Pritisak je meren manometrom firme Keller sa opsegom merenja do 200 bar, Sl.3. Manometar očitava maksimalnu vrednost primenjenog pritiska koja predstavlja pritisak pucanja dijafragme. U trenutku pucanja dijafragme pritisak na manometru opada do vrednosti atmosferskog pritiska sa druge strane dijafragme.



Sl.2. Pelet silicijumske strukture je anodno bondovan na staklo i zalepljen na TO5 kućište sa otvorom. Na slici je probušena dijafragma na koju je primenjen pritisak pucanja i neoštećena dijafragma na koju je primenjen pritisak manji od pritiska pucanja.

Nominalni radni opseg pritiska za neojačanu dijafragmu izabrane debljine 30 μm je 1 bar. Eksperiment je izvršen na 9 uzoraka silicijumske strukture od svake vrste. Izmerene vrednosti pritiska pucanja za dijafragmu bez ojačanja, dijafragmu sa ojačanjem širine 90 μm i dijafragmu sa ojačanjem širine 40 μm su 12 bar, 21 bar i 30 bar, respektivno. Eksperiment pokazuje da je ojačanje povećalo pritisak na kojem puca dijafragma 1.8 puta za dijafragmu sa ojačanjem širine 90 μm, odnosno 2.5 puta za dijafragmu sa ojačanjem širine 40 μm.



Sl.3. Merna metoda. Pritisak je meren manometrom firme Keller sa opsegom merenja do 200 bar.

Više od polovine uzoraka od svakog tipa ima ove vrednosti pritiska na kojima pucaju dijafragme. Rasipanje dobijenih vrednosti pritisaka pucanja je verovatno posledica odstupanja maske od pravca <110> pri fotopostupku [4]. Svako odstupanje pri fotopostupku utiče na kvalitet ivica i veličinu dijafragme. Drugi razlog za rasipanje je činjenica da je korišćena jednostrano polirana Si pločica. Nepoliranost tj. hrapavost gornje strane, kao i svaki drugi defekti u silicijumu, imaju veliki uticaj na izdržljivost tanke Si dijafragme na većim pritiscima [4]. U daljem radu će se koristiti dvostrano polirane Si pločice i očekuje se da će raspodela vrednosti dobijenih pritisaka na kojima dijafragma puca biti uniformnija.

## 5. ZAKLJUČAK

Primenom maskless tehnike, koja se bazira na vlažnom hemijskom nagrizanju u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80 °C, na Si pločice uspešno su napravljene dijafragme sa ojačanjem. Primenom pritiska na neojačane i ojačane dijafragme dobijene su vrednosti pritisaka na kojima dijafragme pucaju. Vrednosti pritisaka na kojima ojačane dijafragme pucaju su veće od pritiska pucanja neojačane dijafragme. Ovo poboljšanje pokazuje da je u okviru samog senzora moguće MEMS tehnologijama povećati vrednosti pritiska na kojima dolazi do pucanja dijafragme i njenog nepopravljivog oštećenja.

## ZAHVALNOST

Autor rada se zahvaljuje Lidiji Novaković IHTM-CMTM-a na velikoj pomoći. Ovaj rad je finansiran sredstvima Ministarstva nauke Republike Srbije na projektu TR 32008.

## LITERATURA

- [1] Ž. Lazić, M. M. Smiljanić, M. Popović, "Projektovanje uložka za zaštitu dijafragme senzora pritiska od preopterećenja", 48. ETRAN, Čačak, 2004.
- [2] S. Aravamudhan, S. Bhansali, "Reinforced piezoresistive pressure sensor for ocean depth measurements", *Sensors&Actuators A142*, 2008.
- [3] K. Schjolberg-Henriksen, D.T. Wang, H. Rogne, A. Ferber, A. Vogl, S. Moe, R. Bernstein, D. Lapadatu, K. Sandven, S. Brida, "High-resolution

pressure sensor for photo acoustic gas detection", *Sensors&Actuators A132*, 2006.

- [4] A.K. Henning, S. Patel, M. Selser, B.A. Cozad, "Factors affecting silicon membrane burst strength", *Proceedings of SPIE*, Vol. 5343, 2004.
- [5] A. Gotz, F. Campabadal, C. Cane, "Improvement of pressure-sensor performance and process robustness through reinforcement of the membrane edges", *Sensors and Actuators*, A67, 1998.
- [6] X. Li, M. Bao, S. Shen, "Maskless etching of three-dimensional silicon structures in KOH", *Sensors&Actuators A57*, 1996.
- [7] M. M. Smiljanić, Z. Đurić, Ž. Lazić, B. Popović, "Visokotemperaturni piezootporni senzori za niske pritiske SOI SP-11", 55. ETRAN, Banja Vrućica, 2011.
- [8] M. M. Smiljanić, "Piezootporni senzori pritiska za visoke temperature i niže pritiske", Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2009.

**Abstract** – Reinforcements of a pressure sensor diaphragm have been designed and fabricated on the Si wafers by maskless wet etching technique. Maskless wet etching technique has been performed in the 25% TMAH water solution at the temperature of 80°. Reinforcements are designed for the 30 μm thick and flat square diaphragm. Area of the diaphragm is 2040 μm x 2040 μm. Operation pressure range of the flat diaphragm is 1 bar. Measured burst pressure of the flat diaphragm is 12 bar. For the samples of the diaphragm with the 90 μm wide reinforcement measured burst pressures are 1.8 times higher than for the flat one. For the samples of the diaphragm with the 40 μm wide reinforcement measured burst pressures are 2.5 times higher than for the flat one. Higher measured burst pressures of the diaphragms with reinforcements show that the improvement is possible on the sensor level by using maskless wet etching technique.

## REINFORCEMENT OF THE PRESSURE SENSOR DIAPHRAGM BY ETCHING IN 25%TMAH WATER SOLUTION

Milče M. Smiljanić, Milan Matić, Katarina Radulović,  
Žarko Lazić, Vesna Jović