

SILICIJUMSKI PIEZOOTPORNI SENZOR PRITISKA SA DIJAFRAGMOM

Jovan Matović, Zoran Djurić, Nevenka Simičić, Dragan Tanasković,
Milan Matic, Miloljub Smiljanić, Radomir Petrović

KLJUČNE REČI: senzori pritiska, senzori sa dijafragmom, silicijumski senzori, piezootpornost, napon dijafragme, planarna tehnologija, anizotropno nagrivanje, električne performanse

SADRŽAJ: Za svoju funkciju, poluprovodnički piezootporni senzor pritiska sa dijafragmom koristi poznatu pojavu promene otpornosti poluprovodnika, kada se ovaj podvrgne mehaničkom naponu. Specifičnosti senzora ovog tipa (njegove visoke performanse i minijaturnost) proističu iz činjenice, da se za njegovu izradu koriste tehnologije intergriranih kola i hemijsko "mikromašinstvo". Na taj način se kvalitet i pouzdanost senzora dovodi na nivo standardnih integriranih kola. U radu su dati osnovni parametri senzora pritiska sa dijafragmom, kao i elementi filozofije projektovanja i tehnologije izrade ovih senzora.

SILICON PIEZORESISTIVE DIAPHRAGM PRESSURE SENSOR

KEY WORDS: pressure sensors, diaphragm sensors, silicon sensors, piezoresistance, stress diaphragm, planar technology, anisotropic etching, electrical performances

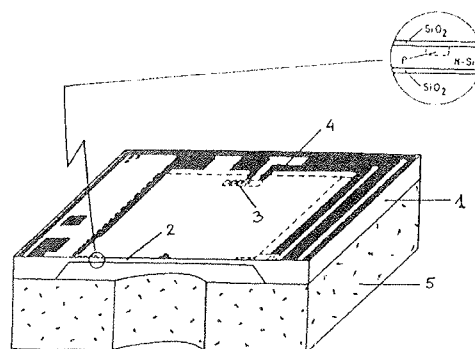
ABSTRACT: Semiconductor piezoresistive diaphragm pressure sensor utilizes well known effect of change of semiconductor resistance caused by mechanical stress. Unique features of this type of sensor (its high performances and miniature dimensions) are the result of the fact that the integrated circuits technologies and chemical "micromachining" are used for their manufacturing. Thus the sensor quality and reliability are upgraded to the level of standard integrated circuits. In this work basic parameters of diaphragm pressure sensors are given, as well as the elements of philosophy of design and manufacture technology of these sensors.

UVOD

Piezorezistivni efekat u silicijumu otkriven je 1954 g. (C.S.Smit) /1/ i prvo je korišćen kod poluprovodničkih mernih traka. Prvi senzor pritiska sa silicijumskom dijafragmom opisan je 1962. (O.N.Tufte sa sar.) /2/. Savremeni senzori, rađeni u planarnoj tehnologiji, minijaturnih dimenzija i visokih karakteristika pojavljuju se od 70-tih godina. U osamdesetim godinama proizvodnja se meri milionima komada, sa porastom od 20-30 % godišnje. Vodeći proizvođači su Delco, Motorola, Selsyn koji pokrivaju 60 % tržišta. Pored njih, više manjih firmi ravnopravno opstaju na tržištu sa programom specijalizovanih senzora za vazduhoplovnu i kosmičku tehnologiju, mernu opremu i sl. Danas su razvijeni senzori za merenje apsolutnog, relativnog i diferencijalnog pritiska u opsegu od 1 kPa do 100 MPa.

I pored velikih serija, senzori pritiska su za sada relativno skupe komponente. Ovo je posledica složene tehnologije montaže samog senzorskog čipa na kućište i neophodna individualna karakterizacija senzora prema temperaturnim promenama. Izuzetak su senzori koji se koriste u automobilskoj industriji (za podešavanje smeše) i u medicinskom inženjstvu.

Sl.1 prikazuje osnovnu konstrukciju silicijumskog senzora pritiska. Sastoji se od senzorskog čipa 1. sa dijafragmom 2, na kojoj su postavljeni piezootpornici 3. vezani metalizacijom 4. u Wheatston-ov most. Senzorski čip je kruto povezan sa podložnom pločicom 5. koja ima ulogu da izoluje čip od temperaturnih uticaja kućišta i spreči vitoperenje tanke dijafragme pod dejstvom pritiska fluida. Kod senzora apsolutnog pritiska podložna pločica formira referentnu komoru sa vakuumom.



Slika 1: osnovni izgled senzora

1. Dijafragma

Dijafragma ima ulogu da pretvori pritisak fluida koji deluje na nju u mehanički napon i prenese ga na piezootpornike. Dijafragma se tako projektuje da obezbedi u najvećoj mogućoj meri linearnu zavisnost meh. napona od pritiska, uz istovremeno postizanje dovoljnog nivoa mehaničkih napona. Kako su ovo protivurečni uslovi, konačno rešenje predstavlja kompromis nelinearnosti napona i njihovog intenziteta.

Anizotropna svojstva silicijuma

Za razliku od uobičajenih materijala, kao što su metali, stakla i sl. veza napona i deformacije u anizotropnom materijalu (Hukov zakon u opštem obliku) kod anizotropnih materijala je tenzor i može se napisati u obliku:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{km} \quad (1)$$

gde su σ i ε tenzori napona i deformacije. C_{ijkl} su koeficijenti elastičnosti i u opštem slučaju njihov broj je $3^4 = 81$. Iz uslova $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ broj ovih koeficijenata svodi se na 36. Kod kristala sa kubnom kristalnom rešetkom, dijamantskog tipa, kakva je rešetka Si, broj nezavisno promenivih koeficijenata svodi se na 3. U ovom slučaju jednačina (1) se može napisati u matricnom obliku:

| | | | | | | | | |
|-------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------------|
| σ_x | = | C_{11} | C_{12} | C_{12} | 0 | 0 | 0 | ε_x |
| σ_y | | C_{12} | C_{11} | C_{12} | 0 | 0 | 0 | ε_{xy} |
| σ_z | | C_{12} | C_{12} | C_{11} | 0 | 0 | 0 | ε_z |
| τ_{xy} | | 0 | 0 | 0 | C_{44} | 0 | 0 | γ_{xy} |
| τ_{zx} | | 0 | 0 | 0 | 0 | C_{44} | 0 | γ_{zx} |
| τ_{yy} | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | C_{44} | γ_{xy} |

(2)

Čime je određena veza napona i deformacije u monokristalnom Si.

Prilikom proizvodnje monokristali Si se izvlači i seče duž kristalnih ravni sa orijentacijom /111/, /110/ i /100/. Sve ove tri ravni ravnopravno se koriste za proizvodnju senzora pritiska. Kao mehanički materijal Si se u ravni /111/ ponaša kao izotropni, u ravni /100/ kao ortotropni i u ravni /110/ kao anizotropni materijal.

Naponi u dijafragmi

U suštini dijafragma predstavlja, prema teoriji elastičnosti, ploču, koja je kruto uklještena po obodu i izložena

ravnomerno raspedeljenom pritisku po površini. Osnovne pretpostavke za proračun su /5/:

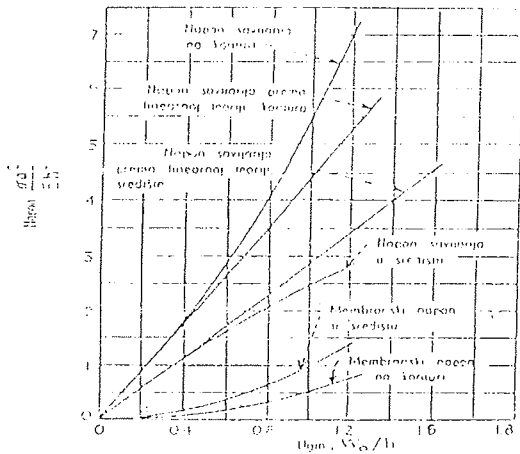
- * ploča je idealno elastična
- * u srednjoj ravni ploče nema deformacija. Ta ravan ostaje neutralna pri savijanju i naziva se neutralna ravan.
- * tačke ploče, koje su prvobitno bile normalne na tu srednju ravan ostaju normalne na srednju ravan svijene ploče

Uz ove pretpostavke, mogu se izraziti sve komponente napona preko ugiba ploče w , koji je funkcija dvaju koordinata u ravni ploče. Ova funkcija mora zadovoljiti izvesnu linearnu parcijalnu diferencijalnu jednačinu, koja uz granične uslove određuje w i raspodelu napona u ploči. Razmotrimo granice važnosti osvojenih pretpostavki:

- * monokristalni Si od koga je dijafragma sačinjena je mehanički idealno elastičan materijal. Kada se pri opterećenju prekorači granična čvrstoća, silicijum puca bez primetne plastične deformacije. Prema tome, prva pretpostavka umnogome odgovara stvarnom stanju.
- * evidentno je da se pod dejstvom pritiska dijafragma ugiba, tzv. balon efekat. Spoljašnje opterećenje od pritiska uravnotežuju ne samo momenti savijanja već i naponi istezanja u neutralnoj ravni (membranski naponi). Može se pokazati /4/ da su momenti savijanja grubo proporcionalni $p^*(a/h)^2$ i membranski naponi sa $p^{2*}(a/h)^6$, p je pritisak, a/h odnos prečnika dijafragme prema debljini. Ugib u centru dijafragme proporcionalan je sa $p^*(a^4/h^3)$. Znak napona momenata savijanja zavisi od smera pritiska fluida, dok su membranski naponi uvek pozitivni (izduženje). Rezultantni naponi u dijafragmi jednaki su zbiru napona od momenata savijanja i membranskih napona i stoga nisu isti kada pritisak deluje sa gornje ili donje strane dijafragme. Gornje zavisnosti strogo određuju nelinearne zavisnosti napona dijafragme, kao i gornju granicu ocnosa a/h , bez obzira na njen oblik ili materijal. Pretpostavka o neutralnoj ravni uslovno važi samo za ugibe manje od 0.2 debljine dijafragme. Pri tome dobija se nelinearnost napona od 0.1 - 0.2 %. Signal koji se može dobiti iz senzora uz uslov da je ugib dijafragme manji od 0.2 h proporcionalan je $\sqrt{p_{max}}$. Stoga za $a/h > 75$, kome po teoriji malih ugiba odgovara merni opseg $p_{mak} = 10 - 20$ kPa, dijafragma prelazi u membranu (sl 2) /4/ i nelinearnost naglo raste.

Primer: izlazni napon preciznih senzora proizvodnje Druck /15/ u zavisnosti od opsega i za nelinearnost manju od 0.06 %.

Za prevazilaženje ovog ograničenja, kod novijih konstrukcija senzora namenjenih merenju niskih pritisaka, redukcija membranskih napona postiže se primenom "profilisane" cirkularne ili pravougaone dijafragme (SP -6, slika u prilogu) kod kojih su membranski naponi manji za red veličine /6/.



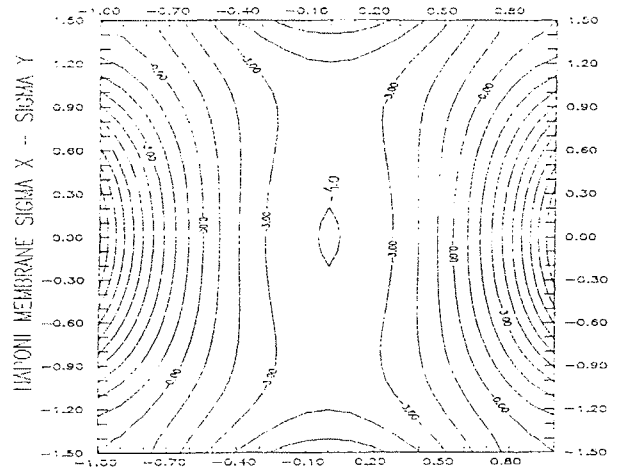
Slika 2: nelinearnost napona dijafragme u funkciji ugiba w

| opseg (mBar) | izlazni napon (mV) |
|--------------|--------------------|
| 75 | 17 |
| 175 | 25 |
| 350 | 50 |
| 1000 | 75 |

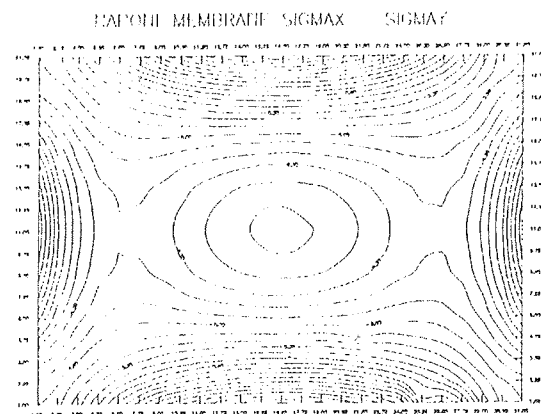
* predpostavka o kruto uključenoj dijafragmi predstavlja aproksimaciju stvarnog stanja. Naponi sa dijafragme se prenose na oslonac, posebno kod senzora za pritiske preko 10 MPa, kod kojih je debljina dijafragme približna debljini oslonca.

Sledi, da je pri definisanju graničnih uslova učinjeno nekoliko idealizacija, posebno kod dijafragmi za niske i visoke pritiske. Izrazi za izračunavanje raspodele napona izvedeni na osnovu gornjih predpostavki daju samo približna rešenja /5/. Za tačnije određivanje naponskog stanja, koje uzima u obzir konačnu krutost oslonca i pojavu membranskih napona koristi se metoda konačnih elemenata (MKE metoda).

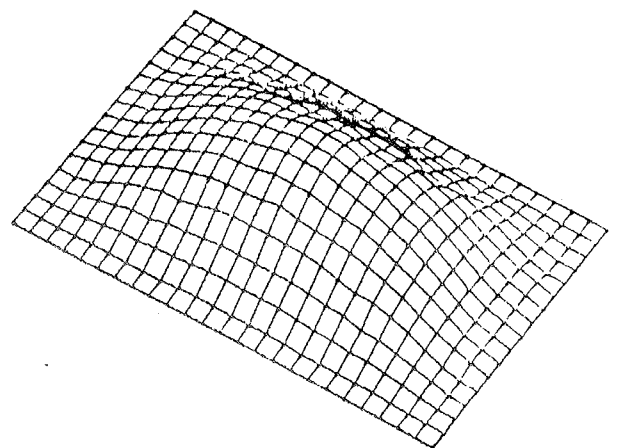
Kao primer na sl.3 prikazana je raspodela napona u pravougaonoj dijafragmi senzora SP - 5 izračunata analitički, a na sl. 4 MKE metodom. Na oba dijaograma linija nultog napona prolazi kroz približno iste koordinate, dok neposredno uz oslonce dijafragme MKE metode daje za 40 % veće napone. Eksperimentalna provera raspodele napona prema sl. 3 i 4 ugradnjom piezootpornika pokazuje da se rezultati MKE metode bolje slažu sa stvarnim stanjem. Na sl. 5 prikazan je ugib te dijafragme (dimenzije 1500 x 2400 μm, debljina 24 μm, p = 35 kPa, max.ugib 7 μm).



Slika 3: raspodela napona $\sigma_x - \sigma_y$ prema analitičkom rešenju dijafragma senzora SP - 5



Slika 4: raspodela napona $\sigma_x - \sigma_y$ izračunata MKE metodom dijafragma senzora SP - 5



Slika 5: ugib dijafragme SP - 5 prema MKE metodi

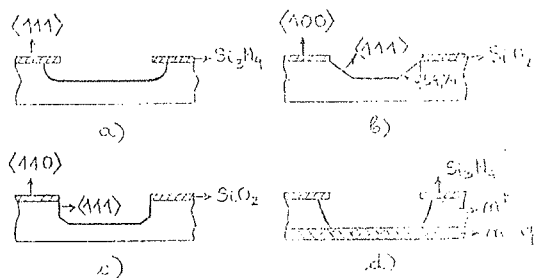
Tehnologija izrade dijafragme

Dijafragma se formira procesom selektivnog nagrizanja silicijuma. Pri uobičajenim mokrim postupcima koriste se brojna sredstva za nagrizanje Si. Ona mogu biti izotropna i anizotropna, zavisna ili nezavisna od koncentracije primesa, manje ili više selektivna u odnosu na materijal za maskiranje.

Izotropna sredstva nagrizaju Si jednakom brzinom u svim kristalografskim pravcima: $R(111) = R(110) = R(100)$, dok za anizotropna važi sledeći odnos: $R(100) \approx R(110) \gg R(111)$. U donjoj tabeli dati su najčešće korišćeni sistemi za hemijsko nagrizanje silicijuma:

| sredstvo za nagrizanje | tipičan sastav | karakteristike | brzina nagrizanja | maska |
|------------------------|--|----------------------------|---------------------|--------------------------------|
| (111) Si izotropno | HF HNO ₃ CH ₃ COOH | $R(100) = R(110) = R(111)$ | 1-7 μm/min na 22° | Si ₃ N ₄ |
| (100) Si anizotropno | KOH n-propanol voda | $R(100) \sim 100 R(111)$ | 1 μm/min na 80°C | SiO ₂ |
| (100) Si anizotropno | etilamin pirokatehol voda | $R(100) \sim 35 R(111)$ | 1.1 μm/min na 100°C | SiO ₂ |
| (110) Si anizotropno | KOH voda | $R(110) \sim 600 R(111)$ | 8 μm/min na 80°C | Si ₃ N ₄ |

Pored ovih rastvora koji nagrizaju Si hemijski, često se primenjuje metod elektrohemijskog nagrizanja epitaksijalnih pločica Si /7/. Tom prilikom se Si anodno rastvara različitim brzinama, u zavisnosti od tipa i koncentracije primesa. Brzina anodnog rastvaranja Si supstrata sa velikom koncentracijom primesa (u elektrolitu HF/H₂O) je 10-20 puta veća nego kod epilojeva sa manjom koncentracijom primesa. Moguće su sve konfiguracije primesa (p⁺/p⁻ epi, n⁺/n⁻ epi, p⁺/n⁻ epi i n⁺/p⁻ epi) /8/. Ovim metodom mogu se dobiti veoma tanke i ravne dijafragme određene kvalitetom epi-sloja.



Slika 6: a) izotropno nagrizanje (111) Si, b) anizotropno nagrizanje (100) Si, c) anizotropno nagrizanje (110) Si i d) elektrohemijsko izotropno nagrizanje Si.

Na sl. (6) prikazana je geometrija dijafragmi dobijenih navedenim metodama:

Precizan mehanizam koji objašnjava prirodu anizotropnog nagrizanja još nije dovoljno razjašnjen. Osnovna karakteristika takvog ponašanja monokristala Si je da ravan (111) pri nagrizanju daleko sporije reaguje od svih ostalih kristalografskih ravni (odnos brzina nagrizanja po nekim autorima dostiže 1000 /8/. Jedan od razloga tome je broj atoma po cm² koji je u ravni (111) veći nego u ostalim /9/. Veća gustina atoma na površini objašnjava i pojavu pasivirajućeg dejstva priljubljenih molekula vode koji sprečavaju interakciju površine sa aktivnim molekulima rastvarača. Drugi razlog pojave anizotropije je razlika u gustinama veza među atomima na površini, tj. energijama potrebnim za uklanjanje atoma sa površine (koje su veće za ravan (111)). Navedene činjenice donekle rasvetljavaju uticaj orijentacije kristalografskih ravni Si na brzinu nagrizanja, ali potpuno objašnjenje prirode ove pojave možemo tek očekivati.

Imajući u vidu da proces nagrizanja u suštini predstavlja proces prenosa naelektrisanja /8/, prirodno je da brzine nagrizanja zavise od tipa i koncentracije primesa. Može se pretpostaviti da su kod Si bogatog primesama brzine nagrizanja veće nego kod slabo dopiranog Si, zbog većeg broja pokretnih nosilaca. Ovo je dokazano za sistem HF/HNO₃/CH₃COOH (1/3/8). Za p i n Si koncentracije > 10¹⁸ cm⁻³, R_{Si} = 1-3 μm/min, a za koncentracije < 10¹⁷ cm⁻³ brzina opada do nule. Anizotropna sredstva pokazuju drugačije ponašanje pri nagrizanju. Brzina nagrizanja drastično opada u slojevima sa velikom koncentracijom bora (10²⁰ cm⁻³), što još uvek nije adekvatno objašnjeno.

2. Piezootpornici

Piezorezistivni efekat

Funkcionalna zavisnost promene električne otpornosti poluprovodnika pod uticajem mehaničkih napona data je izrezom (2):

$$(\Delta p/p)_{ij} = \Pi_{ijkl} \sigma_{kl} \tag{3}$$

gde je $\Delta p/p$ relativna promena otpornosti, Π_{ijkl} tenzor piezorezistivnog koeficijenta i σ_{kl} tenzor napona. Analogno konstanti elastičnosti c, piezokoeficijent koji u opštem slučaju ima 81 nezavisnu promenljivu svodi se, za specijalni slučaj kubne kristalne rešetke, na tri nezavisne promenjive Π_{11}, Π_{12} i Π_{44} koje se nazivaju glavnim piezootpornim koeficijentima. Relativna promena piezootpornika jednaka je tada:

$$\Delta R/R = \Pi_{11} \sigma_{11} + \Pi_{12} \sigma_{22} + \Pi_{44} \sigma_{33} \tag{4}$$

Π_{11} označava longitudinalni piezokoeficijent, kod koga je tok struje kroz poluprovodnik paralelan sa pravcem mehaničkih napona i Π_{12} transferzalni piezokoeficijent,

kod koga je tok struje normalan na pravac mehaničkog napona.

Može se pokazati /10/ da u ravni /100/ silicijuma piezokoefficienti iznose:

$$\begin{aligned} \pi_{11}' &= \pi_{11} - (\pi_{A/4}) (1 - \cos 4\varphi), \\ \pi_{12}' &= \pi_{12} - (\pi_{A/4}) (1 + \cos 4\varphi), \\ \pi_{s'} &= -(\pi_{A/2}) \sin 4\varphi, \end{aligned} \quad (5)$$

φ je ugao koordinatnog sistema u odnosu na pravce osa kristalografskih ravni, $\Pi_A = \Pi_{11} - \Pi_{12} - \Pi_{44}$.

U ravni /110/ piezokoefficienti su:

$$\begin{aligned} \pi_{11}' &= \pi_{11} - (\pi_{A/16})(7 - 4 \cos 2\varphi - 3 \cos 4\varphi), \\ \pi_{12}' &= \pi_{12} - (3\pi_{A/16})(1 - \cos 4\varphi), \\ \pi_{s'} &= -(\pi_{A/8})(2 \sin 2\varphi + 3 \sin 4\varphi), \end{aligned} \quad (6)$$

u ravni /111/,

$$\begin{aligned} \Pi_{e'} &= \pi_{11} - \pi_{A/2}, \\ \pi_{t'} &= \pi_{12} - \pi_{A/6}, \\ \pi_{s'} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Jednačine (5), (6) i (7), uz poznavanje raspodele mehaničkog napona daju niz mogućih položaja piezootpornika na dijafragmi. Samo u ravni /111/, zbog izotropije mehaničkog napona i piezokoefficienta, položaj piezootpornika mora biti istovetan sa klasičnim senzorima sa mernim trakama (par otpornika po obodu dijafragme i par na sredini).

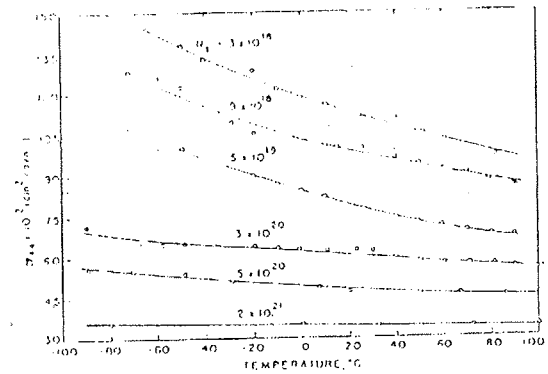
Pokazalo se /11/ da su piezootpornici na p-tipu Si pogodniji za primenu od n-tipa i da se gotovo isključivo koriste. Kod p otpornika dominantan je Π_{44} , dok su vrednosti Π_{11} i Π_{12} manje za dva reda veličine. U daljem tekstu pod piezokoefficientom podrazumeva se Π_{44} . Jednačina (4) prelazi u:

$$\Delta R/R = \Pi_{44} (\sigma_{11} - \sigma_{t})/2 \quad (8)$$

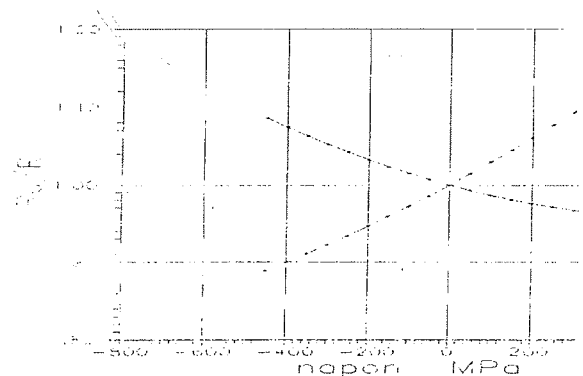
Izraz (8) u stvari predstavlja prilično grubu aproksimaciju. Prvo, uzeti su u obzir samo lateralni meh. naponi. Drugo, vrednost piezokoefficienta Π nije konstantna, već zavisi od koncentracije primesa, temperature i mehaničkih napona. Ove zavisnosti prikazane su na sl. (7) i (8) i određene su eksperimentalno /11/, /12/. Do sada nije razvijena opšta teorija piezoeffekta.

Piezootpornici

Za izradu piezootpornika koristi se tehnologija difuzije ili jonske implantacije. Ovo je kritična operacija za kvalitet



Slika 7: zavisnost piezokoefficienta od koncentracije primesa i temperature.



Slika 8: zavisnost piezoeffekta od mehaničkih napona

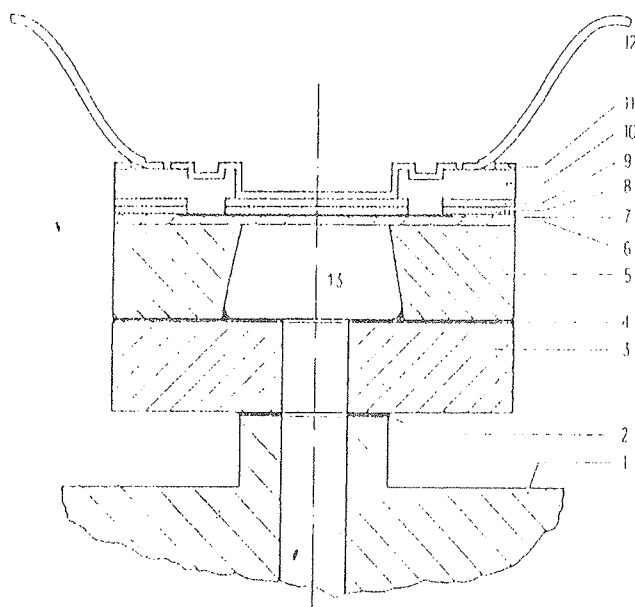
senzora. Istovremeno se mora obezbediti željena raspodela koncentracija primesa po dubini piezootpornika i njihova uparenost u Wheatstone-ovom mostu bolje od 0.2 %. Polazi se od Si pločice, pogodne orijentacije. Obe površine, donja i gornja, rigorozno su polirane, sa neravninama manjim od 0.01 μ m. Tehnološke operacije su:

- * termička oksidacija Si
- * otvaranje prozora za duboku difuziju za kontakte
- * difuzija ili implantacija primesa
- * otvaranje prozora za piezootpornike
- * difuzija ili implantacija bora (p-dopant) za piezootpornike
- * zaštita piezootpornika slojem SiO₂ i Si₃N₄ od spoljnih uticaja
- * otvaranje prozora za kontakte
- * nanošenje provodnika od AlSi legure ili Cr+Au

Umesto Wheatston-ovog mosta sa 4 diskretna otpornika, može se načiniti i most sa raspodeljenim parametrima /13/, po konfiguraciji analogan sa Holovom napravom. Ovaj tip mosta pod nazivom X-ducer usvojila je Motorola.

3. Konstrukcija senzora

Peleti sa formiranom dijafragmom spajaju se sa podložnom pločom od Si ili specijalnog Pyrex stakla. Si-Si spoj, koji mora biti hermetički, radi se lemljenjem legurom AuSn ili eutektičkim legiranjem sa Al na temperaturi od 450°C. Sa Pyrex staklom Si se spaja elektrostatičkim zavarivanjem, na povišenoj temperaturi i pod visokim naponom. Ovaj sklop montira se na različite načine, zavisno od primene: u plastično ili metalno kućište, hibrid zajedno sa pojačavačem ili kateter. Presek tipične konstrukcije prikazan je na sl. (9) /14/.



Slika 9: presek senzora 1 metalno kućište, 2 AuSn lem, 3 podnožna ploča, 4 spoj, 5 Si supstrat, 6 dijafragma, 7 otpornici, 8 SiO₂, 9 Si₃N₄, 10 metalizacija, 11 CVD nitrid, 12 Au žica, 13 referentna komora

4. Performanse senzora

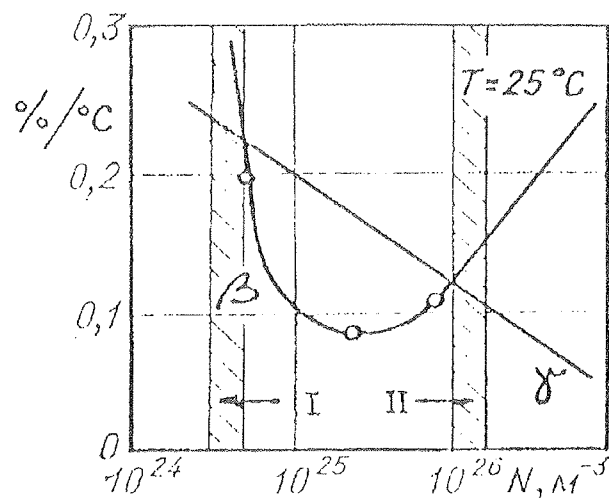
Osobine senzora: iz ranijeg izlaganja sledi, da su karakteristike senzora, (osetljivost, linearnost, temperaturske promene), međusobno usko zavisne. Pri projektovanju senzora i izboru tehnoloških parametara za njegovu izradu potrebno je optimalno uskladiti niz protivurečnih zahteva u zavisnosti od namene.

Osetljivost i izlazni napon: osetljivost senzora ograničena je maksimalnim meh. naponima u dijafragmi i vrednošću piezokoeficijenta. Silicijum, kao monokristalni, bezdislokacioni materijal, može se opteretiti do izduženja od 0,05 %. Međutim, kod vitkih dijafragmi nelinearni membranski naponi, pojavljuju se znatno pre maksimalnog dozvoljenog napona ograničavajući osetljivost /5/.

Sa sl. 7 vidi se da vrednost piezokoeficijenta logaritamski opada sa koncentracijom bora. Kako je temperaturski koeficijent otpornosti piezootpornika zavisno od koncentracije, ali po složenoj zavisnosti (sl. 10), nije moguć

proizvoljan izbor koncentracije primesa. Postoje dve uske oblasti koncentracije bora kod kojih se može postići temperaturska kompenzacija senzora, oblast I i II sl. (10). U oblasti I, Π_{44} iznosi $110 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, a u oblasti II, $40 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$.

Piezootpornici izvedeni sa koncentracijom primesa prema oblasti I imaju osetljivost 2,5 puta veću nego otpornici u oblasti II. Samim tim, moguće je dobiti isti izlazni napon senzora sa debljom, linearnijom dijafragmom. Sa druge strane temperaturska promena piezokoeficijenta u oblasti II je mala i gotovo linearna, pa je temperaturska greška ovakvog senzora manja. U praksi se ravnopravno koriste obe oblasti. Institut se opredelio za oblast II, koju koristi firma Kullite. Izlazni napon proporcionalan je naponu na otpornicima mosta i njegovoj osetljivosti. Maksimalni napon napajanja mosta ograničen je dozvoljenom disipacijom otpornika i reda je 5 - 10 V. Za izabrane vrednosti otpornosti mosta od 2 kΩ izlazni napon treba da bude 50 - 80 mV, zavisno od opsega.



Slika 10: Zavisnost temperaturskog koeficijenta piezokoeficijenta Π_{44} , γ i temperaturskog koeficijenta otpornika β od koncentracije primesa

Temperaturska promena osetljivosti: mehaničke osobine Si dijafragme mogu se smatrati stalnim u oblastima u kojima se senzori koriste. Opadanje izlaznog napona sa temperaturom je posledica negativnog temperaturskog koeficijenta piezokoeficijenta Π_{44} , γ , koji u oblasti I sl. (10) iznosi $\gamma = -0.22\% / ^\circ\text{C}$, a u oblasti II, $\gamma = -0.13\% / ^\circ\text{C}$. Svojstvo da je u oblastima I i II temperaturski koeficijent otpornika β nešto veći i suprotnog znaka od γ , koristi se za temperatursku kompenzaciju senzora. Kada se most napaja izvorom konstantne struje, ukoliko je $\beta = -\gamma$, opadanje osetljivosti piezokoeficijenta se kompenzuje porastom napona napajanja mosta, usled porasta omske otpornosti otpornika. Obično se parametri pri izradi otpornika biraju tako, da je $\beta > |\gamma|$. Fino doterivanje se izvodi dodavanjem temperaturski nezavisnog otpornika R_{par} koji zadovoljava relaciju:

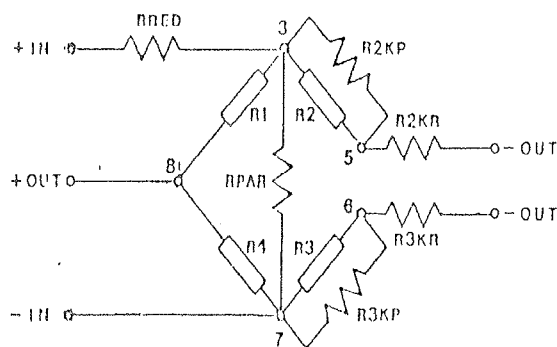
$$R_{par} = -\frac{\gamma}{\gamma + \beta} R_{mosta} \tag{9}$$

Sa ovakvim načinom kompenzacije senzori razvijeni u Institutu imaju temperatursku zavisnost osetljivosti manju od 0.005% PS/°C u opsegu -30 / +70°C.

Za kompenzaciju se koriste i druge metode: na čipu se izvode diode i tranzistori koji imaju negativni temperaturski koeficijent, ili se spolja dodaju NTC i PTC otpornici. Nedostatak ovih metoda je u tome, da dodatni elementi moraju imati temperaturu kao sam piezootpornik, koji je zbog disipacije uvek na višoj temperaturi od dijafragme.

Nelinearnosti: definiše se kao odstupanje stvarne karakteristike senzora od prave dobijene metodom najmanjih kvadrata i izražava se u % pune skale. Nelinearnosti mehaničkih napona sl. (7) i piezokoeeficijenta sl. (8) su suprotnog znaka i mogu se, pogodnim izborom tehnoloških parametara i geometrijskog rasporeda piezootpornika delimično poništiti. Preostala nelinearnost može biti +/- 0.04% /15/ pri opterećenju dijafragme sa strane piezootpornika, mada su uobičajene vrednosti 0,1% PS. Kada pritisak deluje sa donje strane dijafragme, nelinearnost je približno dvostruko veća. Izlazni napon ima parabolichnu zavisnost od pritiska i može se dobro aproksimirati polinomom drugog reda nelinearnim pojačivačima ili računaram.

Ofset: izlazni napon senzora obično nije nula pri nultom pritisku. Glavni uzrok tome su nesavršenosti tehnoloških procesa pri izradi otpornika. Greška u uparenosti od 1% izaziva ofset od 5 mV/V, bez obzira na osetljivost senzora. Rasporeda napona ofseta tokom izrade je slučajna. Druga, sistematska grupa uzroka pojave ofseta su unutrašnji naponi u dijafragmi prouzrokovani procesima nanošenja SiO₂ na visokoj temperaturi i naponi od podložne ploče i kućišta. Ovi naponi deluju u ravni dijafragme. Senzori na Si orijentacije (100), kod kojih su otpornici raspoređeni po ivici dijafragme manje su osetljivi na ove napone. Ofset prouzrokovan unutrašnjim naponima iznosi 0.5 - 1 mV/V.



Slika 11: šema kompenzacije senzora proizvodnje IMTM

Temperaturska promena ofseta: uzrok ove greške senzora pretežno su mehanički naponi u piezootpornicima izazvani razlikama u temperaturskim koeficijentima kućišta i senzorskog čipa i manjim delom uticajem zaštitnog sloja SiO₂. Uopšte, uzroci koji izazivaju ofset i njegovu temperatursku promenu su usko povezani i kompenzuju se na isti način. Wheatstone-ov most se radi otvoren sl. (11) i zatvara se kombinacijom rednih i paralelnih nepromenljivih otpornika. Posle montaže senzora snima se ofset i njegova promena sa temperaturom. Vrednosti dodatnih otpornika određuju se iz uslova da promena bude minimalna. Za senzor je potreban jedan par otpornika, redni i paralelni. Ovakvom kompenzacijom ofset se smanjuje na tip. 0.2 mV, a temperaturska promena 1 mV za opseg od 100°C.

Histerezis: zahvaljujući idealnim mehaničkim osobinama Si histerezis senzora je veoma mali. Dobrim rešenjem montaže čipa na kućište, ova greška se može svesti na zanemarivu vrednost.

Drift i dugovremenska stabilnost: zaštitni sloj SiO₂ preko otpornika sadrži pokretne jone (Na⁺), koji pod dejstvom električnog polja u otpornicima i na povišenoj temperaturi sporo migriraju, izazivajući modulaciju struje u njima. Izvesni uticaj imaju i joni koji naknadno dospevaju na površinu oksida. Pokrivanjem SiO₂ slojem nitrida debljine 0,1 μm uz obezbeđenje čistoće oksida ovaj efekat se znatno umanjuje. Tipična greška od drifta, koju proizvođači deklarišu, je 1% PS godišnje, mada su vrednosti u praksi znatno manje.

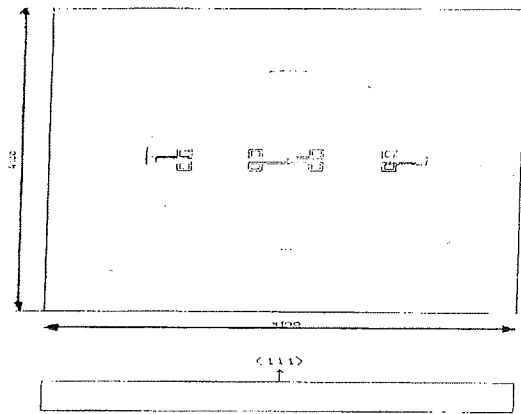
5. ZAKLJUČAK

Poluprovodnički silicijumski senzori pritiska prikazani u radu pripadaju drugoj generaciji i predstavljaju preciznu i široku upotrebljavanu komponentu. Trenutni trend razvoja su senzori treće generacije, koja podrazumeva integraciju senzora sa kolima za obradu signala na jednom čipu, tzv. smart senzors . Pored mogućnosti direktne komunikacije sa računarima, smart senzori poseduju mogućnost korekcije grešaka. Time bi se smanjio jaz koji danas postoji između usavršenih mikroprocesora sa pratećim sklopovima i senzora fizičkih veličina.

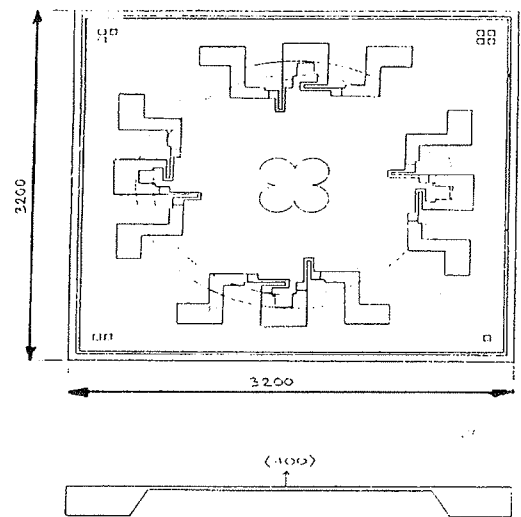
Zahvalnost: autori se zahvaljuju Mr. Milošu Motoku sa Mašinskog Fakulteta u Beogradu oko pomoći u radu sa MKE metodom.

PRILOG: SENZORI RAZVIJENI U IMTM

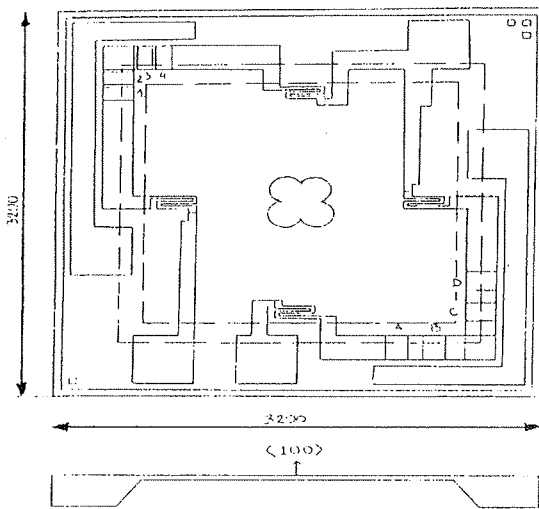
SP - 1, uraden 1983 na /111/ Si, ne proizvodi se



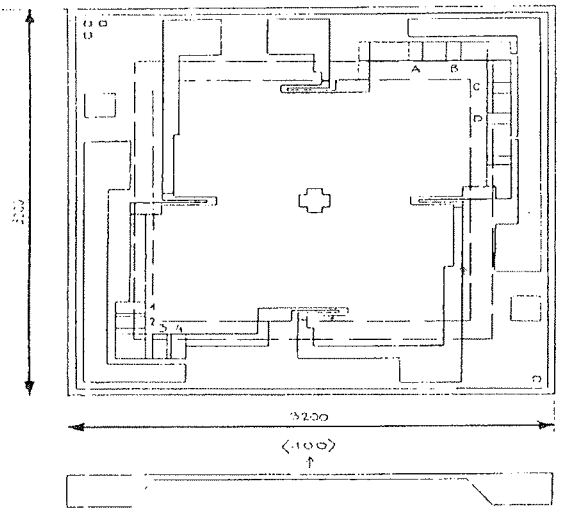
SP - 2, 1985, Si /100/, ne proizvodi se



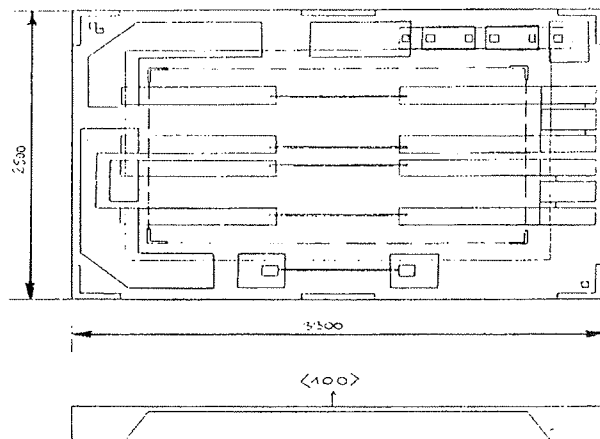
SP - 3, 1986, Si /100/, ne proizvodi se



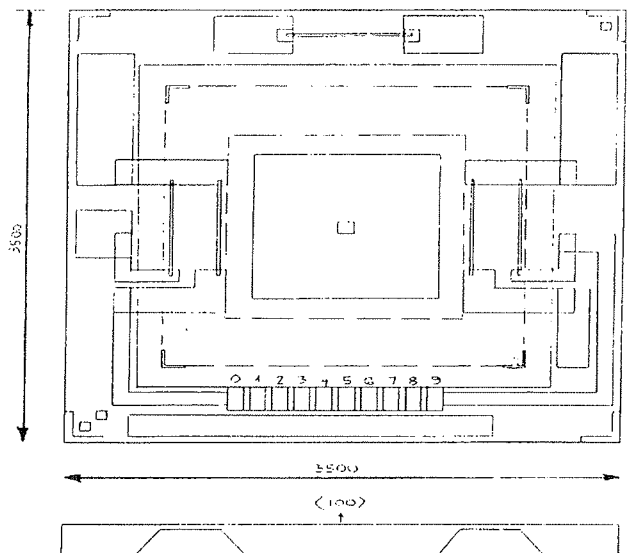
SP - 4, 1986, Si /100/, za pritiske od 0.3 do 20 bara proizvodi se u usavršenoj verziji SP-4 A



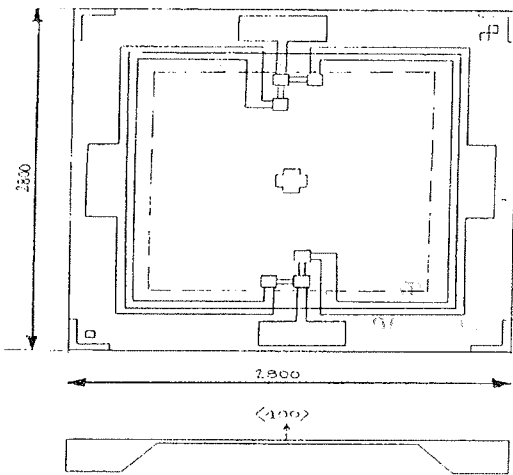
SP - 5, 1988, u ispitivanju



SP - 6, 1988, u razvoju, namenjen za tačno merenje u oblasti pritiska 50 - 500 mBara.



SP: 7, 1988, u ispitivanju i probnoj proizvodnji



- (6) M.Shimazoe et al., „A special silicon diaphragm pressure sensor with high output and high accuracy,, Sensors and Actuators, 2 (1982)
- (7) M.Esashi, H.Komatsu et al, Fabrication of catheter-tip and sidewall miniature pressure sensors ,IEEE Transaction on Electron Devices, vol ED-29, No.1, Jan. 1982
- (8) K.E. Petersen, Silicon as a Mechanical Material ,Proceedings of the IEEE, vol. 70, No.5, May 1982
- (9) E.D.Palik, et al, Ellipsometric study of orientation dependent etching of silicon in aqueous KOH ,J.Electrochem.Soc, April 1985
- (10) V.I Vaganov, Integralnie tenzopreobrazovateli ,Energoatomizdat, 1983
- (11) O.N Tufte, Piezoresistive properties of silicon difused layers ,J. of App.Phys., vol 34, No.2, 1963
- (12) J.Matović, et al, Nelinearnosti piezorezistivnog efekta kod visokodopiranog silicijuma ,XI Simp. O fizici kondenzovane materije, 1988
- (13) R.Allan, X-shaped sensor simplifies transducer . Electronics. Sept. 25, 1980
- (14) K.Becker, et al, Silicon pressure sensors for the range 2 kPa to the 40 MPa , Simens components, XX, 1985
- (15) prospektni materijal Druck LTD.

LITERATURA:

- (1) C.S.Smit, Piezoresistance effect in germanium and silicon , Phys.Rev.vol.94, No 1, 2954
- (2) O.N.Tufte et al., „Silicon diffused-element piezoresistive diaphragms,,J.Appl.Phys.vol.33, No 11, 1962
- (3) S.P.Timoshenko, Theory of Elasticity 1951
- (4) M.Poppinger, Silicon diaphragm pressure sensors ,Solid State Devices, 1985
- (5) S.P.Timošenko et al, Teorija ploča i ljuski Građevinska knjiga. 1962

15.5.89
16.5.89
17.5.89
18.5.89
19.5.89
20.5.89
21.5.89
22.5.89
23.5.89
24.5.89
25.5.89
26.5.89
27.5.89
28.5.89
29.5.89
30.5.89
31.5.89
1.6.89
2.6.89
3.6.89
4.6.89
5.6.89
6.6.89
7.6.89
8.6.89
9.6.89
10.6.89
11.6.89
12.6.89
13.6.89
14.6.89
15.6.89
16.6.89
17.6.89
18.6.89
19.6.89
20.6.89
21.6.89
22.6.89
23.6.89
24.6.89
25.6.89
26.6.89
27.6.89
28.6.89
29.6.89
30.6.89
1.7.89
2.7.89
3.7.89
4.7.89
5.7.89
6.7.89
7.7.89
8.7.89
9.7.89
10.7.89
11.7.89
12.7.89
13.7.89
14.7.89
15.7.89
16.7.89
17.7.89
18.7.89
19.7.89
20.7.89
21.7.89
22.7.89
23.7.89
24.7.89
25.7.89
26.7.89
27.7.89
28.7.89
29.7.89
30.7.89
31.7.89
1.8.89
2.8.89
3.8.89
4.8.89
5.8.89
6.8.89
7.8.89
8.8.89
9.8.89
10.8.89
11.8.89
12.8.89
13.8.89
14.8.89
15.8.89
16.8.89
17.8.89
18.8.89
19.8.89
20.8.89
21.8.89
22.8.89
23.8.89
24.8.89
25.8.89
26.8.89
27.8.89
28.8.89
29.8.89
30.8.89
31.8.89
1.9.89
2.9.89
3.9.89
4.9.89
5.9.89
6.9.89
7.9.89
8.9.89
9.9.89
10.9.89
11.9.89
12.9.89
13.9.89
14.9.89
15.9.89
16.9.89
17.9.89
18.9.89
19.9.89
20.9.89
21.9.89
22.9.89
23.9.89
24.9.89
25.9.89
26.9.89
27.9.89
28.9.89
29.9.89
30.9.89
1.10.89
2.10.89
3.10.89
4.10.89
5.10.89
6.10.89
7.10.89
8.10.89
9.10.89
10.10.89
11.10.89
12.10.89
13.10.89
14.10.89
15.10.89
16.10.89
17.10.89
18.10.89
19.10.89
20.10.89
21.10.89
22.10.89
23.10.89
24.10.89
25.10.89
26.10.89
27.10.89
28.10.89
29.10.89
30.10.89
31.10.89
1.11.89
2.11.89
3.11.89
4.11.89
5.11.89
6.11.89
7.11.89
8.11.89
9.11.89
10.11.89
11.11.89
12.11.89
13.11.89
14.11.89
15.11.89
16.11.89
17.11.89
18.11.89
19.11.89
20.11.89
21.11.89
22.11.89
23.11.89
24.11.89
25.11.89
26.11.89
27.11.89
28.11.89
29.11.89
30.11.89
1.12.89
2.12.89
3.12.89
4.12.89
5.12.89
6.12.89
7.12.89
8.12.89
9.12.89
10.12.89
11.12.89
12.12.89
13.12.89
14.12.89
15.12.89
16.12.89
17.12.89
18.12.89
19.12.89
20.12.89
21.12.89
22.12.89
23.12.89
24.12.89
25.12.89
26.12.89
27.12.89
28.12.89
29.12.89
30.12.89
31.12.89

Jovan Matović, dipl.ing.
 Dr Zoran Djurić, dipl.ing.
 Nevenka Simičić, dipl.ing.
 Dragan Tanasković, dipl.ing.
 Dr Milan Matić, dipl.ing.
 Dr Miloljub Smiljanić, dipl.ing.
 Mr Radomir Petrović, dipl.ing.
 IHTM - Institut za Mikroelektronske
 Tehnologije i Monokristale,
 Beograd, Njegoševa 12

Prispelo: 06.02.1989

Sprejeto: 06.03.1989

2