

SILICIJEVI SENZORJI TLAKA

Marko Pavlin, Hipot-Hybrid d.o.o., Trubarjeva 7, 68310 Šentjernej

Silicon Pressure Sensors

ABSTRACT

General terms about sensors are presented. Silicon pressure sensors are discussed. Two kinds of silicon pressure sensors are presented: a piezoresistive and a capacitive. Processing of a thin diaphragm is discussed. The electrical characteristic of both types of the sensors are presented. The typical silicon pressure sensors are shown at the end. There are also a Hipot-Hybrid events introduced.

POVZETEK

V članku so najprej opisani senzorji na splošno, s kratkim pregledom njihovih parametrov. Sledi opis silicijevih senzorjev tlaka z značilnostmi, ki jih imata piezoupornostni in kapacitivni senzor tlaka. Predstaviti izdelave tanke membrane v silicijevem substratu, ki je ključni sestavni del, sledi opis električnih lastnosti za piezoupornostni in kapacitivni senzor tlaka. Obe vrsti senzorjev je moč kupiti, vendar v splošnem prevladuje piezoupornostni senzor tlaka. Tipični predstavniki so navedeni na koncu članka, kjer je tudi kratek opis dejavnosti podjetja Hipot-Hybrid d.o.o. iz Šentjerneja.

1 UVOD

Svet okrog nas zaznavamo po različnih fizikalno-kemijskih pojavih, ki jih spremljajo spremembe nekaterih količin, kot npr. /1/:

- toplotne: temperatura, toplota, pretok toplote
- mehanske: sila, tlak, hitrost, pospešek in položaj
- kemijske: sestava in koncentracija materialov, hitrost reakcije
- magnetne: jakost polja, gostota magnetnega pretoka, magnetizacija
- sevalne: valovna dolžina elektromagnetnega valovanja (EMV), intenziteta, polarizacija in faza EMV
- električne: tok, napetost, naboj.

Vse te fizikalne veličine pa lahko z ustreznimi senzorji spremenimo v električne signale. Princip, na katerem temelji pretvorba, je odvisna od pretvarjane veličine.

1.1 Parametri splošnega senzorja

Ne glede na to, kateri senzor opazujemo, ima vsak neke definirane parametre. Ti se aplicirajo v fizikalni veličini, ki je specifična. Tako je npr. izhodni signal piezouporovnega senzorja tlaka napetost ali tok, vhodna veličina pa tlak.

Lastnosti senzorja so opisane z njegovimi parametri. Prikazana specifikacija lastnosti velja za vsak senzor.

- **ABSOLUTNA OBČUTLJIVOST** je razmerje med spremembo izhodnega signala in spremembo vhodne veličine.
- **RELATIVNA OBČUTLJIVOST** je normirana absolutna občutljivost z velikostjo izhodnega signala pri ničelni vrednosti vhodne veličine.
- **KRIŽNA OBČUTLJIVOST** je sprememba izhodnega signala pri spremembi več vhodnih veličin (tlak, temperatura).
- **RESOLUCIJA** je najmanjša, še zaznavna sprememba merjene veličine, ki še povzroči spremembo izhodnega signala.

- **TOČNOST** je razmerje med največjo napako in polnim razponom izhodnega signala.
- **NAPAKA LINEARNOSTI** je največje odstopanje linearizacijske krivulje od idealne linearne karakteristike senzorja.
- **HISTEREZA** je sposobnost senzorja, da generira isti izhodni signal pri isti vrednosti vhodne veličine, ne glede na smer njene spremembe.
- **NIČELNA VREDNOST** izhodnega signala je njegova vrednost pri ničelni vhodni veličini.
- **ŠUM** je naključna vrednost izhodnega signala, neodvisna od velikosti merjene veličine.
- **ZGORNJA FREKVENČNA MEJA** senzorja je frekvenca vhodne veličine, pri kateri pade izhodni signal na določeno vrednost v primerjavi z začetno (70,7%, 99,9%).
- **DINAMIKA** senzorja je razlika med največjo in najmanjšo vrednostjo merjene veličine.
- **TEMPERATURNI PODROČJE DELOVANJA** senzorja je območje temperatur, pri katerih senzor obdrži svoje lastnosti in deluje znotraj deklariranih tolerančnih meja.

1.2 Uvod v senzorje tlaka

Iz celotne množice raznih senzorjev si bomo ogledali senzorje tlaka, izdelane na silicijevi podlagi. Poznamo dve vrsti silicijevih senzorjev tlaka. Eni temeljijo na piezouporovnem pojavu in jih imenujemo piezouporovni tlačni senzorji. Ta vrsta je najbolj razširjena, zato si bomo najprej ogledali njihovo izdelavo, v nadaljevanju pa še lastnosti in fizikalno-električne zakonitosti. Na povsem drugem principu temeljijo kapacitivni senzorji, ki so v bistvu miniaturni kondenzatorji, ki se jim spreminja kapacitivnost zaradi spremembe geometrije.

2 PIEZUOPOROVNI SENZOR TLAKA

Najprej si oglejmo, kako naredimo piezouporovni senzor tlaka. Osnovna ideja je v izdelavi tanke membrane v podlagi iz silicija. Ta membrana se pod vplivom tlaka upogne. Zaradi upogiba nastanejo v membrani mehanske sile, ki vplivajo na lastnosti silicija.

Ker je celoten postopek izdelave precej zapleten, si oglejmo ključni korak, to je izdelavo membrane s selektivnim jedkanjem silicija.

2.1 Izdelava senzorja

Selektivno jedkanje membrane spada v skupino mikromehanskih obdelav podlage. Poleg teh poznamo tudi postopke površinske mikromehanike. Vsi ti so del mehanotronike, ki je na velikem pohodu v zadnjih letih. Osnova mikromehanike podlage je kos silicija. To je material, ki ima odlične mehanske lastnosti. Zbrane so v tabeli 1 /1/.

Tabela 1 - Mehanske lastnosti silicija

| | |
|------------------------------|--|
| Kristalna struktura | diamantna, 8 atomov/celico |
| Tališče | 1415°C |
| Toplotna prevodnost | 148,8 Wm ⁻¹ K ⁻¹ |
| Temperaturni koef. raztezka | 2,9 do 7,4 10 ⁻⁶ (°C) ⁻¹ |
| Specifična gostota | 2,3 g cm ⁻³ |
| Youngov modul elastičnosti | 1,9 10 ¹¹ Pa |
| Maksimalna mehanska napetost | 6,9 10 ⁹ Pa |
| Trdota po Knoop-u | 850 kg m ⁻² |

Youngov modul elastičnosti silicija je primerljiv vrednosti za jeklo. Specifična gostota Si je primerljiva z aluminijevo. Deformacije so idealno elastične, brez znamenj plastičnosti (kot zanimivost: tanek listič silicija primerne dolžine lahko zvijemo v krog, pa se kljub temu vrne v prvotno obliko). Zaradi takih lastnosti silicij ne izkazuje mehanske histereze. Njegova trdota je večja kot pri železu, volframu ali aluminiju. Temperaturna prevodnost je enaka polovici temperaturne prevodnosti jekla, temperaturni koeficient raztezka pa je ena petina raztezka jekla.

Iz tega je razvidno, da je silicij dober material za mehanske senzorce, torej tudi za senzorce tlaka. S polprevodniško tehnologijo jih lahko izdelamo zelo kvalitetno za območje tlakov od 1 mbar do nekaj 100 bar. Za merjenje vakuumu pod 1 mbar pa niso primerni.

2.1.1 Mokro anizotropno jedkanje

Poznamo jedkanje silicija, pri katerem je smer in hitrost jedkanja odvisna od kristalne strukture. Tehnika je bila uporabljena ob koncu 60. let in v začetku 70. Izpopolnjena je bila šele v začetku osemdesetih.

Za anizotropno jedkanje se uporablja veliko jedkal: raztopina hidrazin-voda, EDP (etilidiamin pirokatehol-voda), KOH (kalijev hidroksid + voda), TMAH (tetrametil amonijev hidroksid) in CsOH (cezijev hidroksid). Najpogosteje se uporablja KOH.

Tabela 2 - Oblike lukenj, ki nastanejo pri anizotropnem jedkanju

| oblika odprtine | orientacija površine | nastala struktura (oblika luknje) |
|------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| 1 kvadrat | <100> | piramida |
| 2 pravokotnik | <100> | pravokotna piramida, kanal |
| 3 krog | <100> | piramida |
| 4 kvadrat, pravokotnik | <110> | prizma (luknja z navpičnimi stenami) |

Glavna lastnost anizotropnega jedkanja je, da je smer in hitrost jedkanja odvisna od kristalografske orientacije.

Jedkanje poteka najpočasneje v ravnini <111>, ker je hitrost odvisna od "površinske" koncentracije atomov v izbrani ravnini. Oblika trodimenzionalne strukture, ki nastane v siliciju pri določeni geometriji maské, je odvisna od kristalografske orientacije površine rezine (tabela 2).

Za senzor tlaka sta zanimiva primera 1 in 3.

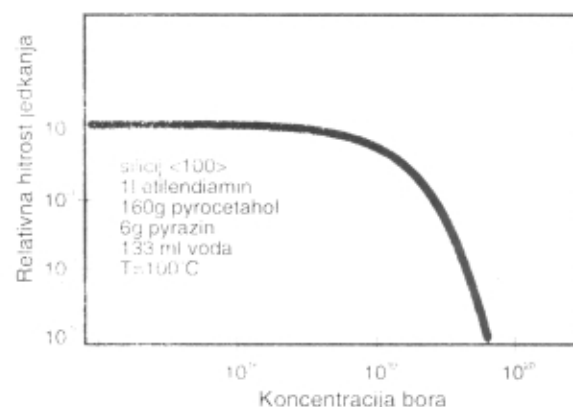
2.1.2 Selektivnost jedkal

Anizotropna jedkala so močno selektivna za različne materiale. To nam koristi predvsem pri maskiranju silicija. Površine, ki jih želimo obdržati nespremenjene, moramo zaščititi s takim materialom, ki ga jedkalo ne jedka. Fotoemulzija ni primerna zaradi dolgotrajnega jedkanja, med katerim bi lahko prišlo do odlučanja emulzije. Maskirni material je lahko SiO₂, silicijev nitrid, Cr, Au, Al,...

Slabost anizotropnega jedkala KOH je, da jedka SiO₂ hitreje kot katerokoli drugo anizotropno jedkalo. Pri cezijevem hidroksidu je razmerje hitrosti jedkanja Si v ravnini <110> in SiO₂ v isti ravnini približno 5500, medtem ko je isto razmerje pri KOH "le" okrog 300.

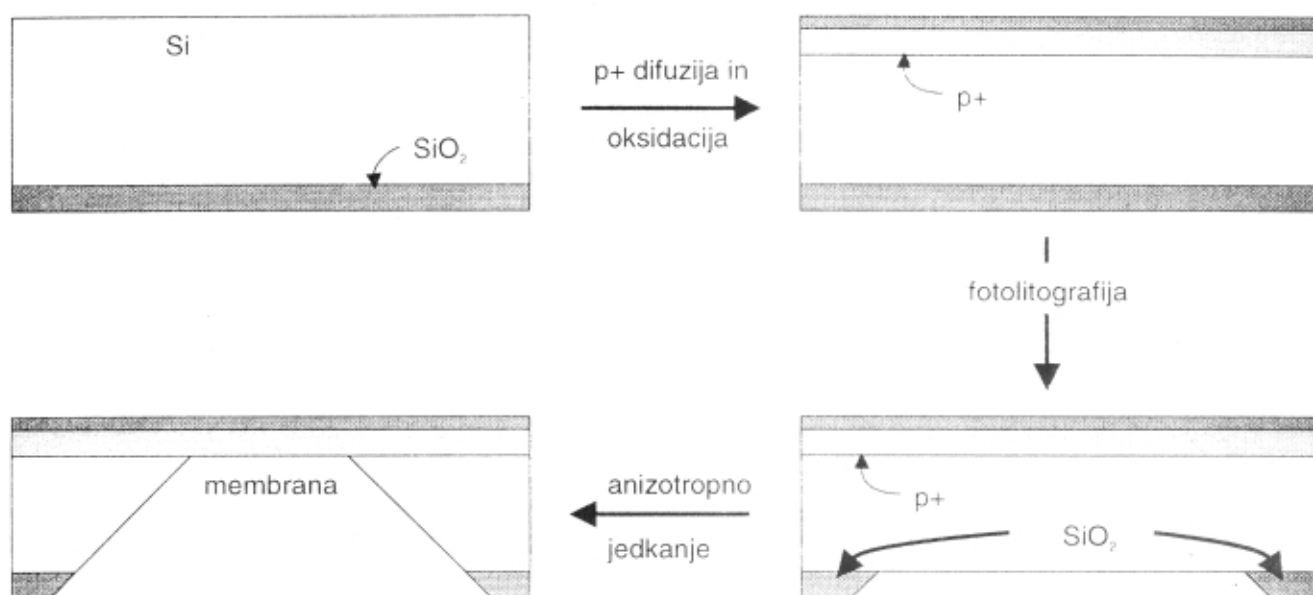
2.1.3 Zaustavitveno jedkanje

Najvažnejši parameter anizotropnega jedkanja je čas. Na srečo ni edini, saj je hitrost jedkanja odvisna tudi od koncentracije primesi in še od česa. Pri formaciji tanke silicijeve membrane z anizotropnim jedkanjem je zelo pomembno, da ponovljivo in točno ujamemo njeno debelino. Od debeline membrane so odvisne lastnosti senzorca tlaka. Pri tem je pomembno, da pravi čas ustavimo jedkanje (prenehamo jedkanje). Ta način ni najbolj ugoden, zato si pomagamo s pojavom, da je hitrost jedkanja odvisna od koncentracije primesi v dopiranem siliciju. Iz diagrama je razvidno, da je kritična koncentracija bora nekje pri 2,5·10¹⁹cm⁻³. Do te vrednosti je hitrost jedkanja praktično neodvisno od koncentracije, potem pa strmo pade.



Sl.1. Hitrost jedkanja v odvisnosti od koncentracije primesi bora

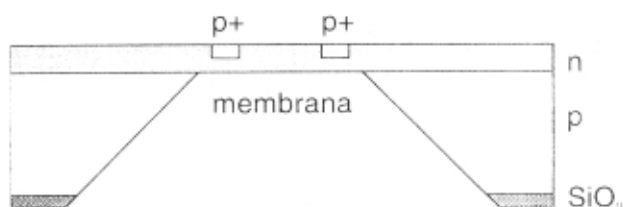
Hitrost jedkanja je obratno sorazmerna četrti potenci koncentracije. Zaradi tega lahko hitro ustavimo jedkanje. Na sliki 2 je zgled zaustavitvenega jedkanja.



Sl.2. Proces nastanka membrane pri zaustavitvenem postopku

Pri izdelavi membran natančno kontroliranih debelin uporabljamo elektrokemijske postopke, pri katerih združimo anizotropno jedkanje z elektrokemijsko zaustavitvijo.

Na sliki 3 je presek senzorja tlaka, ki ga dobimo z omenjenim postopkom.



Sl.3. Presek strukture senzorja tlaka, ki ga dobimo z zaustavitvenim postopkom

Za jedkanje se uporablja 50-50% raztopina hidrazina in vode pri temperaturi 90°C . S tem postopkom lahko izdelamo membrane debeline $20\ \mu\text{m} \pm 2\ \mu\text{m}$.

Možna razlaga zaustavitve jedkanja je rast anodnega oksida na n-tipu epitaksijske plasti. Ta prekine jedkanje, ko izgine vsa p plast.

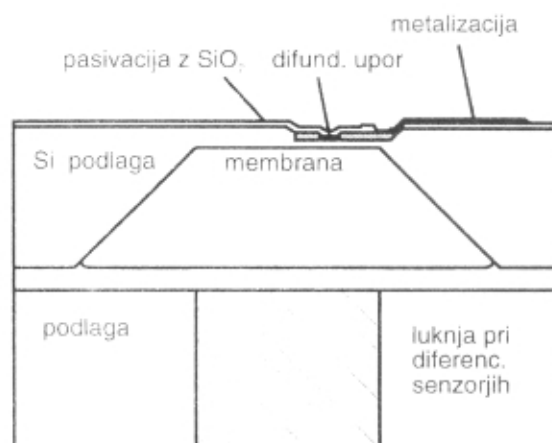
Poleg omenjenih postopkov obstaja še vrsta drugih. Vsi imajo za cilj ustvariti tanko membrano kontrolirane debeline, ki je osnova vsakega tlačnega senzorja.

2.2 Zapiranje senzorjev v ohišje

Preden si ogledamo konkretne primere senzorjev še nekaj besed o njihovem zapiranju v ohišja. Ta se razlikuje od klasičnih za integrirana vezja po tem, da

ima tlačni priključek. Imeti mora vsaj eno luknjo (za absolutne senzorje) in nastavek za priključitev cevi oz. dovoda tlaka. Celotno ohišje mora biti mehansko dovolj trdno, da se sile ne prenašajo na senzor.

Zapiranje v ohišje ima dve stopnji. Prva je na nivoju podlage (slika 4).



Sl.4. Presek senzorja

Osnovni postopek na tem nivoju je varjenje dveh Si podlag. Na enem so senzorji, na drugem pa luknje za senzorje relativnega tlaka ali polna podlaga za absolutne senzorje. V drugem primeru nastanejo problemi, ker se mora postopek spajanja odvijati v vakuumu. Podlago potem razžagamo in razlomimo na posamezne senzorje. S tem so pripravljene za drugo stopnjo zapiranja.

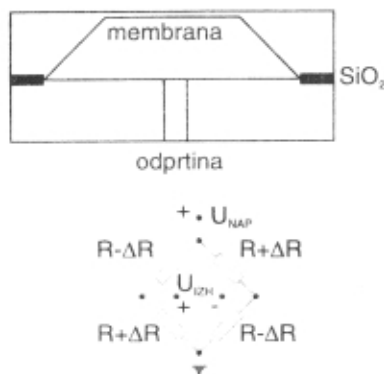
Na tržišču lahko dobimo senzorje, ki imajo strukturo "sendviča". V tej obliki jih izdeluje predvsem Motorola. Senzor relativnega tlaka je lahko tudi brez opisane

podlage, vendar so to ponavadi ceneni senzori, ki se uporabljajo v nezahtevnih aplikacijah.

Druga stopnja zapiranja je lepljenje golih senzorjev na neko podlago, ponavadi na keramiko Al₂O₃, ki je obenem tudi podlaga hibridnega vezja za kompenzacijo in obdelavo izhodnega signala. Poleg lepljenja je potrebno še bondiranje za električno priključitev sensorja. Le-ta je lahko zaščiten z gelom, ki je zelo elastičen material, obenem pa ga zaščiti pred okoljem. Težava z gelom je tudi, da je odporen le za nekaj vrst medijev, predvsem plinov. Za bolj robustna okolja, na primer avtomobilsko industrijo ali agresivne tekoče medije, je potrebno sensor bolj zaščititi. Taki senzori so zaprti v kovinskem ohišju z jekleno membrano, ki je zavarjena po posebnem postopku. Med membrano in sensorjem je silikonsko olje, ki prenaša silo tlaka z membrane na sensor.

2.3 Modeliranje in simulacija piezoporovnega sensorja tlaka

Presek izdelanega PR sensorja je na sliki 5. V tanki membrani so difundirani štiri upori. Zaradi sile tlaka se membrana upogne. Upogib povzroči nastanek mehanskih sil, ki vplivajo na upornost senzorskih uporov. Upori so vezani v Wheatstonov mostič. Dvema uporoma se upornost poveča, dvema pa zmanjša glede na upornosti, ki jih imajo v neobremenjenem stanju. Zaradi tega je odziv največji.



Sl.5. Piezoporovni sensor tlaka

Najprej si oglejmo mehaniko tanke membrane. Iz izračunanih upogibov določimo mehanske napetosti in končno spremembe upornosti. Sprememba izhodne napetosti je proporcionalna spremembi upornosti, ta pa linearno sledi spremembam tlaka.

2.3.1 Mehanika tanke membrane

Senzor tlaka je sestavljen iz tanke membrane, v kateri so difundirani upori. Membrana se pod vplivom tlaka *p* upogne. Sile, ki delujejo nanjo so odvisne od razlike tlakov pod in nad njo. Upogib membrane je majhen v primerjavi z njeno debelino (*h*). Z enačbo 1 opišemo mehansko ravnovesje med tlakom in upogibnim momentom /2,6/.

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -p \tag{1}$$

Membrana se nahaja v kartezijskem koordinatnem sistemu v ravnini *x-y*. Razmerje med upogibnimi momenti in upogibom (*w*) podajajo enačbe 2 do 4.

$$M_x = - \left[D_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D_0 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \tag{2}$$

$$M_y = - \left[D_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + D_0 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \tag{3}$$

$$M_{xy} = 2D_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \tag{4}$$

Upogibne trdnosti *D* so funkcije kraja (*x,y*).

$$D_x = \frac{E_x h^3}{12(1-\nu_{xy}\nu_{yx})} \tag{5}$$

$$D_y = \frac{E_y h^3}{12(1-\nu_{xy}\nu_{yx})} \tag{6}$$

$$D_0 = \frac{E_x \nu_{xy} h^3}{12(1-\nu_{xy}\nu_{yx})} \tag{7}$$

$$D_{xy} = \frac{G_{xy} h^3}{12} \tag{8}$$

E_x in *E_y* sta Youngova modula v smereh *x* in *y*. *G_{xy}* je strižni modul. Poisonovi števili *ν_{xy}* in *ν_{yx}* podajata razmerje med raztežkom v eni smeri in skrčkom v drugi, ki je posledica raztežka. Enačbe 2, 3 in 4 vstavimo v enačbo 1 in dobimo sistem parcialnih diferencialnih enačb, ki ima obliko

$$[L_0 + L_1 + L_2][w] = p \tag{9}$$

L₀, *L₁* in *L₂* so linarni operatorji nad upogibom *w*, ki je posledica tlaka *p*.

Izračun upogiba ni enostaven. Največkrat se uporabljajo numerične metode. Obstaja tudi nekaj programov za izračun.

Za izračun odziva kapacitivnega sensorja je dovolj, da določimo upogib. Iz znanega upogiba z enostavno metodo integracije določimo kapacitivnost oz. njene spremembe zaradi spremembe razdalje med ploščama kondenzatorja.

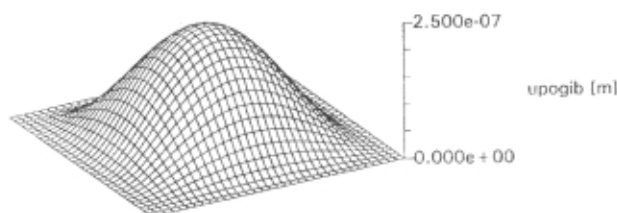
Pri piezoporovnem sensorju, kjer deluje piezoporovnostni pojav, moramo določiti še mehanske napetosti v membrani.

$$\sigma_x = -\frac{h}{2(1-\nu^2)} \left[E_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + E_x \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \quad (10)$$

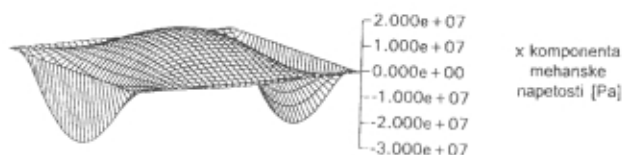
$$\sigma_y = -\frac{h}{2(1-\nu^2)} \left[E_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + E_x \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = h G_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (12)$$

Predpostavili smo, da sta pri siliciju Poissonovi števili enaki. Sistem parcialnih diferencialnih enačb je analitično rešljiv le pri določenih pogojih (enakomerna debelina membrane, pravilna geometrija...), vendar to ni slika dejanskega senzorja. Pri računanju mehanskih napetosti v resničnem senzorju uporabljamo numerične metode. Z metodo končnih elementov ali končnih diferenc določimo upogib in mehanske napetosti v membrani. Na sliki 6 so prikazani upogibi in mehanske napetosti v enakomerno debeli membrani debeline 25 μm , s stranico dolžine 800 μm /3/.



Slika 6. Izračunani upogibi membrane v ekvidistančnih točkah mreže na kvadratni silicijevi membrani širine 790 μm in debeline 25 μm pri tlaku 10^5Pa



Slika 7. Izračunana x komponenta mehanske napetosti v ekvidistančnih točkah mreže na kvadratni silicijevi membrani širine 790 μm in debeline 25 μm pri tlaku 10^5Pa

2.3.2 Električne zakonitosti

Mehaniko membrane smo spoznali v prejšnjem razdelku. Iz znanih upogibov smo določili mehanske sile v membrani. Te vplivajo na spremembo upornosti difundiranih uporov v njej. Pojav spremembe upornosti zaradi mehanskih sil opisuje piezoupornostni pojav /2/.

Piezoupornostni pojav je fizikalni pojav, pri katerem se zaradi deformacije v materialu spremeni njegova specifična upornost /7,8/.

V n-tipu silicija so večinski nosilci prosti elektroni. Ležijo v treh enakih skupinah, ki so razporejene v treh kristalografskih smereh $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$ in $\langle 001 \rangle$. Mobilnost elektronov v eni skupini je najmanjša v smeri, kateri skupina pripada, najmanjša pa pravokotno nanjo. Povprečna mobilnost vseh prostih elektronov v vseh treh skupinah je izotropna. Pri obremenitvi silicija z mehansko silo se elektroni prerazporedijo glede na smer sile. V primeru, ko sila deluje npr. v smeri $\langle 100 \rangle$, se bo mobilnost povečala v smeri $\langle 100 \rangle$, v smereh $\langle 010 \rangle$ in $\langle 001 \rangle$, ki sta pravokotni, pa se bo zmanjšala. Na simetrali $\langle 111 \rangle$ je učinek najmanjši.

V p-tipu silicija je prevodnost odvisna od povprečne mobilnosti vrzeli. V siliciju, na katerega deluje sila, se spremenijo energijski maksimumi posameznih vrzeli. Skupno število vrzeli ostane nespremenjeno, spremeni pa se porazdelitev učinkovitih mas. Zaradi tega se spremeni specifična upornost.

Sprememba specifične upornosti silicija zaradi piezoupornostnega pojava je podana s tenzorjem piezoupornostnih koeficientov.

$$\Delta \rho_i = \rho_0 \sum_{j=1}^6 \pi_{ij} \chi_j \quad (13)$$

V enačbi 13 predstavlja χ_j vektor deformacij, π_{ij} pa tenzor piezoupornostnih koeficientov.

2.3.3 Procesni parametri

Izračun odziva piezouporovnega senzorja tlaka temelji na idealnem senzorju, ki v praksi ni izvedljiv. Zaradi tega moramo upoštevati še neke faktorje, ki vplivajo na odziv in nastanejo zaradi napak v postopku izdelave, kot tudi zaradi naključnih, neobvladljivih vplivov, ki vnašajo odstopanje od pričakovanih lastnosti senzorja.

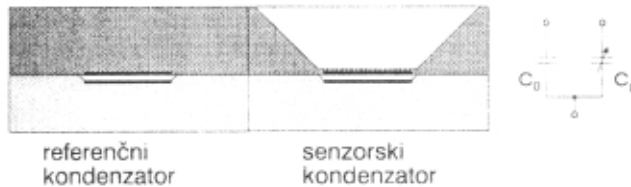
Pri izračunu odziva piezouporovnega senzorja z opisanimi postopki smo predpostavili, da so upori koncentrirani v eni točki na robu membrane. V resnici ima upor neke končne dimenzije, ki so izbrane kot kompromis med zahtevami in sposobnostmi tehnologije. Reprodukcijska naraščajoča velikost uporov. Po drugi strani pa naraščajoča tlačna občutljivost z manjšanjem uporov.

Drug parameter je debelina membrane. Zaradi njene neenakomernosti dobimo različne upore, na katere tlak različno vpliva. Poveča se ničelna napetost in nelinearnost senzorja. Poleg debeline je pomemben tudi položaj membrane glede na upore. Membrano jedkamo z zadnje strani podlage, upori pa so na sprednji strani. Zelo pomembno je, da se položaj uporov pokriva s položajem membrane. Zaradi zamikov se spremeni tlačna občutljivost. Takim napakam se izognemo, če izdelamo večjo membrano. Na tak način zmanjšamo relativni zamik uporov. S tem se tudi zmanjšajo tolerance tlačne občutljivosti. Žal je velikost membrane določena in se je ne da spreminjati. Zaradi tega moramo take napake upoštevati že pri načrtovanju senzorja.

3 Kapacitivni senzor tlaka

Kapacitivni silicijev senzor tlaka je sestavljen iz dveh kondenzatorjev. Poleg referenčnega kondenzatorja C_0

je še delovni C_p . Temu se spreminja kapacitivnost v odvisnosti od tlaka. Sprememba kapacitivnosti nastane zaradi spremembe geometrije kondenzatorja, ker je ena od plošč narejena na tanki membrani. Sila tlaka upogne membrano in približa plošči kondenzatorja, zaradi česar se poveča kapacitivnost /4/.



Slika 8. Kapacitivni senzor tlaka

Na sliki 8 je prikazan presek kapacitivnega senzora tlaka. Med elektrodama je reža, ki je izdelana s podobnim postopkom kot membrana, le da je jedkanje ustavljeno veliko prej.

3.1 Izdelava kapacitivnega senzora tlaka

Kapacitivni senzor tlaka je izdelan s podobnimi postopki kot piezouporovni. Postopka se razlikujeta le v tem, da pri kapacitivnem senzoru odpade difuzija uporov v membrani. Membrana je metalizirana po vsej površini, ker predstavlja eno od elektrod kondenzatorja. Poleg tega moramo izdelati podlago, v kateri sta dve "votlini", v katerih sta druga para elektrod kondenzatorjev.

3.2 Mehanske in električne zakonitosti kapacitivnega senzora tlaka

Kapacitivni senzor ima podobno membrano kot piezouporovni, zato veljajo enake mehanske lastnosti za obo. Pri kapacitivnem si bomo ogledali le, kako se spreminja kapacitivnost med membrano in podlago v odvisnosti od tlaka.

Kapacitivnost med membrano in podlago je /4/:

$$\iint \frac{\epsilon_0}{d_0 - w(x, y)} dx dy \tag{14}$$

ϵ_0 je dielektrična konstanta, d_0 pa razdalja med ploščama pri neobremenjenem senzoru. Definirajmo še efektivni upogib, ki ustreza paralelnemu premiku dveh plošč.

$$d = \frac{1}{A} \cdot \iint w dx dy \tag{15}$$

Pri tem predstavlja A površino plošče oz. membrane. Sprememba kapacitivnosti je potem:

$$\Delta C = C_0 \frac{d}{d_0 - d} \cong C_0 \frac{d}{d_0} \tag{16}$$

C_0 predstavlja začetno kapacitivnost pri tlaku $p=0$.

Tlačno občutljivost lahko izračunamo iz dolžine in debeline membrane ter začetnega razmika med ploščama. Ker je občutljivost proporcionalna upogibu, je močno odvisna od dimenzij membrane ($\propto l^4$ in $\propto h^3$). Prednost kapacitivnih senzorjev je njihova velika občutljivost in majhna temperaturna odvisnost nekaterih parametrov. Zaradi tega se uporabljajo v posebnih razmerah, še posebej pri visokih temperaturah.

Začetna kapacitivnost senzora je zelo majhna, spremembe kapacitivnosti pa so še manjše. Senzorju je dodano vezje (ponavadi nek oscilator), ki te majhne spremembe ojači. Taki senzori so ponavadi dražji in se redko uporabljajo.

Pri obeh vrstah senzorjev, tako pri piezouporovnih kot pri kapacitivnih, se srečamo še z eno vrsto temperaturne odvisnosti. Pri senzorjih absolutnega tlaka je v referenčni komori pod membrano vakuum. Zaradi temperaturnega raztezka residualnega plina v komori pride do (sicer majhne) spremembe tlačne občutljivosti in ničle. Kapacitivni senzori so tudi zelo občuljivi na spremembe dielektričnosti zraka med ploščama, ki jih povzroči sprememba vlage.

4 Primeri senzorjev

Trenutno obstaja veliko proizvajalcev senzorjev in pretvornikov tlaka. Vsi večji (Motorola, Texas Instruments, SenSym, Silicon Microstructures,...) imajo v svoji ponudbi osnovne senzorske elemente brez ohišja v obliki tabletk. Taki senzori so neprimerni za direktno uporabo in so namenjeni t.i. OEM (*Original Equipment Manufacturer*) proizvajalcem, kakršen je tudi Hipot-Hybrid iz Šentjerneja. Poleg golih senzorjev se dobijo tudi pasivno kompenzirani v raznih ohišjih za razne razpone tlakov od nekaj milibarov do nekaj 100 barov. Vezje v takem senzoru poskrbi za temperaturno kompenzacijo. Ker so v ohišju, so primerni za vgradnjo in takojšnjo uporabo. Ker je kompenzacijsko vezje le pasivno, je izhodni signal takih senzorjev nizek, pod 100 mV pri 5 V napajalni napetosti. Zato moramo dodati neko zunanje ojačevalno vezje ali pa uporabiti tlačni pretvornik kot najbolj izpopolnjeno obliko senzora tlaka.

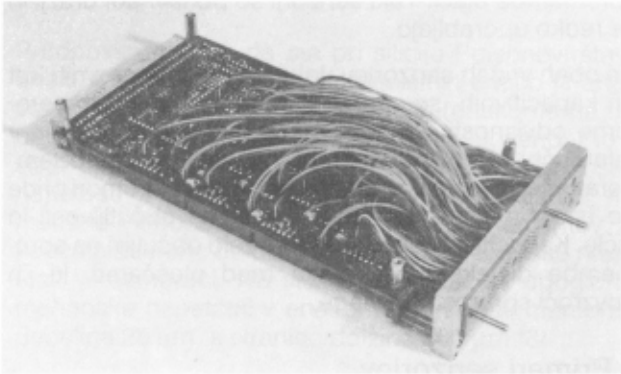
Pretvornik tlaka je aktivni element, ki pretvarja informacijo o velikosti tlaka na vhodu v eno od standardnih oblik procesnih signalov na izhodu:

1. Napetostni izhod
 - 0-5 V
 - 2,5-2V
 - 0-10V
 - 0,5-4,5V
2. Tokovni izhod
 - 0-20mA
 - 4-20mA
3. Frekvenčni izhod
4. Digitalni izhod
5. Preklopni izhod (tlačno stikalo)

Možna je tudi kombinacija posameznih oblik. Pri "pametnem senzoru" (*Smart sensor*) je kombinirana tokovna zanka (4-20 mA) z digitalno obdelavo signala.

Takim senzorjem je dodan mikrokontroler, ki krmili digitalne potenciometre. Vse skupaj je povezano v tokovno zanko, tako da je možno samo z dvema žicama napajati celoten pretvornik, nastavljati njegove parametre in odtipavati tlak.

V Hipotu izdelujemo pretvornike za razpone tlakov od 0-5 mbar do 0-15 bar, za absolutno in diferencialno merjenje tlakov. Poleg tega izdelujemo senzore po želji kupcev s poljubnim izhodom za razpone tlakov od 5 mbar do 15 bar. Primer takega razvoja je senzorsko polje s 120 senzorji tlaka na enem samem tiskanem vezju (slika 9).



Slika 9. Primer aplikacije tlačnih senzorjev: polje 120 senzorjev na enem tiskanem vezju. Vezje je kombinacija hibridne tehnologije in površinske montaže. S spodnje strani so vidni trije od 15 hibridnih vezij, v katerih je v vsakem po 8 senzorjev tlaka.

Senzorji tlaka, izdelani v Hipotu, dosegajo točnosti do 0.5% in so popolnoma temperaturno kompenzirani. Po želji kupcev izdelamo tudi poljubno ohišje iz brizgane plastike. Poleg industrijskih tlačnih senzorjev izdelujemo tudi medicinske tlačne senzore, senzore za nadzor pretoka in mikrokontrolersko nadzorovane senzorske module.

Proizvodnja Hipot-Hybrid d.o.o. zajema tudi druge veje senzoričke, in sicer:

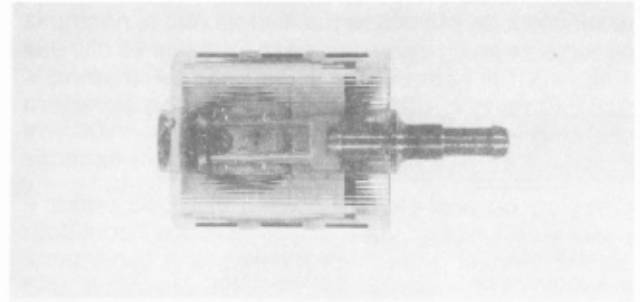
- senzore sile ("strain gauge" na keramični podlagi za sile od 1N do 1000 N)
- PTC in NTC upore (od +3500 ppm/°C do -10000 ppm/°C)
- približevalna stikala v miniaturizirani debeloplastni izvedbi
- senzore vlage in kisika.

V nadaljevanju si oglejmo tri senzore tlaka, proizvedene v Hipot-Hybrid d.o.o. /5/.

4.1 Tlačni senzor IST 1000(A)

IST 1000 je temperaturno kompenzirani senzor tlaka, zaprt v plastičnem ohišju (slika 10), ki ima standardni tlačni priključek PK 3 za cevi premera 4 mm. To je majhen, cenen senzor z odličnimi karakteristikami. Ob-

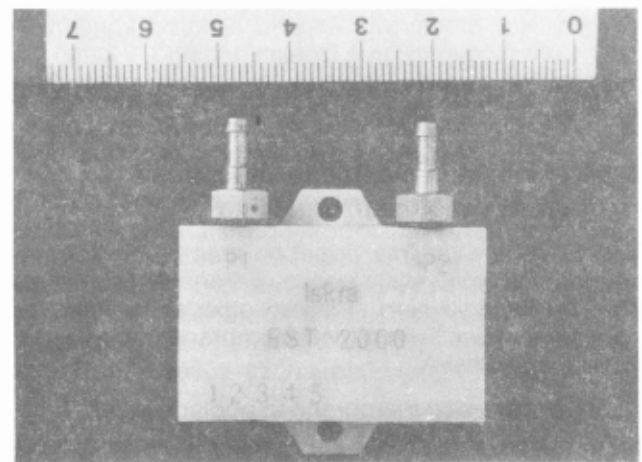
stajata dve izvedenki, in sicer IST 1000, ki ima obseg tlakov do 1 bar in IST 1000A, ki ima obseg do 5 bar. Občutljivost obeh senzorjev je 28 mV/bar pri napajalni napetosti 7,5 V.



Slika 10. Tlačni senzor IST 1000 s pasivno temperaturno kompenzacijo

4.2 Tlačni pretvornik EST 2000

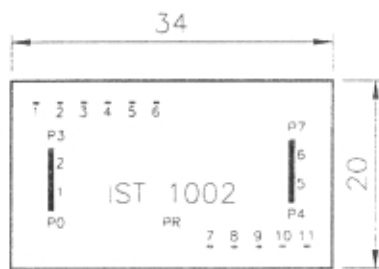
V tlačnem pretvorniku EST 2000 je poleg senzorja še ojačevalnik (slika 11). Obseg tlakov osnovne izvedbe je ± 150 mbar. Po želji izdelamo pretvornik za poljubni tlačni obseg od 5 mbar do 15 bar. Napajalna napetost se lahko giblje od 4,8 V do 9 V. Izhod iz pretvornika je napetostni.



Slika 11. Tlačni pretvornik EST 2000

4.3 Polje osmih senzorjev IST 1002

IST 1002 je hibridni modul, na katerem je osem senzorjev tlaka, ki merijo diferencialni tlak proti enemu referenčnemu tlaku (slika 12). Senzorji so multipleksirani. Izbira senzorja je digitalna (CMOS logika). Priključne cevke imajo presek 0,6 mm. Senzorji niso temperaturno kompenzirani, ker se kompenzacija v večtočkovnih tlačnih sistemih izvaja programsko. Po želji kupcev lahko vgradimo poljubne senzore.



Slika 12. Modul IST 1002 z osmimi senzori tlaka

4.4 Pretvorniki senzorskih signalov

Poleg celovitih izvedb senzorjev in pretvornikov izdelujemo tudi pretvornike za senzorske signale, ki se dajo uporabiti tako pri senzorjih tlaka kot pri katerihkoli drugih z mostično konfiguracijo ali napetostnim izhodom.

Prvi tak pretvornik je ETZ 1012, ki je v bistvu sigma-delta pretvornik z resolucijo 10 bitov (slika 13). Izhod je digitalen v obliki serijskega vlaka impulzov. Na vhodu ima čopersko stabiliziran ojačevalnik, kar omogoča direktno priključevanje senzorjev. Pretvornik je možno direktno priključiti na procesor ali na vhod računalnika.



Slika 13. Senzorski vmesnik z A/D pretvorbo ETZ 1012

Drug modul je bolj kompliciran. Oznako ima ETZ 1003 in je programilen modul za merilne in kontrolne aplikacije. Ker ima majhno porabo, je primeren za baterijsko napajanje. Na izhodu se lahko priključi 7-mestni LCD. Uporablja se lahko kot samostojni modul ali kot del večjega sistema. Programiranje modula izvedemo v Hipotu po algoritmu, ki ga zahteva kupec.

Kot zadnjega naj omenim še tokovni oddajnik za 4-20 mA tokovno zanko. Modul se napaja z dvožilno tokovno zanko. Na vhodu ima poljuben tlačni senzor, na izhodu pa oddaja tok v razponu od 4 mA do 20 mA, ki je sorazmeren vhodni napetosti. Ojačanje (oz. transkonduktanca) je nastavljivo v diskretnih točkah ali zvezno. Uporaben je v vseh primerih, kjer je zahtevana visoka imunost za motnje in v vseh procesnih sistemih, kjer se uporabljajo tokovne zanke.

Proizvodnja vseh hibridnih vezij je certificirana po ISO 9001. V podjetju Hipot-Hybrid d.o.o. smo pridobili certifikat o ustreznosti 7. julija 1993 in pohvalimo se lahko, da ISO 9001 uspešno izvajamo tudi v praksi.

5 Sklep

Senzorske tehnologije so v zadnjem obdobju doživele velik razcvet. Tok dogodkov je s seboj potegnil tudi Hipot-Hybrid d.o.o., kjer ne samo izdelujemo, ampak tudi razvijamo nove senzore. Ne smemo zanemariti sodelovanja z Institutom "Jožef Stefan", kjer se s senzoriko ubadajo na Odseku za keramiko. Sodelovanje je privedlo do mnogih novih spoznanj s področja senzorjev in senzorike. Vse to znanje pa se že in se bo še naprej koristno uporabljalo v praksi. Golo znanje, pridobljeno v laboratorijih, je nekoristno, če se ne zrcali v industriji. Prav tako kot z IJS, sodeluje Hipot tudi s Fakulteto za elektrotehniko in računalništvo iz Ljubljane, le da je obseg sodelovanja zaenkrat manjši kot z Institutom. Hipot ima debeloplastno tehnologijo, ki se jo da lepo dopolniti s polprevodniško tehnologijo, ki jo obvladujejo na fakulteti v Laboratoriju za elektronske elemente. V kombinaciji z raziskovalnimi možnostmi, ki jih ima Institut "Jožef Stefan", nastane idealna kombinacija za razvoj in proizvodnjo novih senzorjev in izpopolnjevanje (in pocenitev) obstoječih.

Dodatek I

Tabela pretvorb med posameznimi enotami za tlak:

| psi | atms. | Pt. Hd. H ₂ O | in H ₂ O | Kg/cm ² | Metres H ₂ O | in Hg. | mm.Hg. | Cm.Hg. | bar | mbar | kPa |
|--------|--------|--------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|
| 1 | 0.0680 | 2.310 | 27.720 | 0.0703 | 0.704 | 2.043 | 51.894 | 5.188 | 0.0690 | 68.947 | 6.895 |
| 14.696 | 1 | 33.659 | 407.513 | 1.0330 | 10.351 | 30.019 | 762.480 | 76.284 | 1.0130 | 1013.0 | 101.325 |
| 0.433 | 0.0290 | 1 | 12.000 | 0.0300 | 0.305 | 0.884 | 22.452 | 2.245 | 0.0300 | 29.837 | 2.984 |
| 0.026 | 0.0025 | 0.833 | 1 | 0.0025 | 0.025 | 0.074 | 1.871 | 0.187 | 0.0025 | 2.485 | 0.249 |
| 14.223 | 0.9680 | 32.867 | 394.408 | 1 | 10.018 | 29.054 | 737.959 | 73.796 | 0.9610 | 960.662 | 96.065 |
| 1.422 | 0.0970 | 3.267 | 39.370 | 0.0990 | 1 | 2.905 | 73.796 | 7.379 | 0.0990 | 99.066 | 9.907 |
| 0.489 | 0.0330 | 1.131 | 13.575 | 0.0340 | 0.345 | 1 | 25.400 | 2.540 | 0.0340 | 33.753 | 3.375 |
| 0.019 | 0.0013 | 0.045 | 0.534 | 0.0014 | 0.0136 | 0.039 | 1 | 0.100 | 0.0010 | 1.329 | 0.133 |
| 0.193 | 0.0131 | 0.445 | 5.340 | 0.0140 | 0.1360 | 0.390 | 10.000 | 1 | 0.0130 | 13.290 | 1.329 |
| 14.503 | 0.9870 | 33.514 | 402.164 | 1.0200 | 10.2110 | 29.625 | 752.470 | 75.247 | 1 | 1000.0 | 100.00 |
| 0.014 | 0.0009 | 0.033 | 0.402 | 0.0010 | 0.0102 | 0.029 | 0.752 | 0.075 | 0.001 | 1 | 0.100 |
| 0.145 | 0.0098 | 0.335 | 4.021 | 0.0100 | 0.1020 | 0.296 | 7.525 | 0.752 | 0.010 | 10.000 | 1 |

Literatura

- 1/ Ristić L., *Sensor Technology and Devices*, Norwood, Artech House, 1994
- 2/ Pavlin M., *Temperature lastnosti silicijevega piezoresistivnega senzora tlaka*, diplomska naloga, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana, 1995
- 3/ Aljančič U., *Simulacija odziva in optimizacija tehnologije silicijevega piezoresistivnega senzora tlaka*, magistrska naloga, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana, 1993
- 4/ Ko W.H., et al, *A High-Sensitivity Integrated-Circuit Capacitive Pressure Transducer*, IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. ED-29, No.1, Jan. 1982, pp. 48-56
- 5/ Interna dokumentacija Hipot-Hybrid d.o.o.
- 6/ S.E. Clark, K.D. Wise, *Pressure Sensitivity in Anisotropically Etched Thin-Diaphragm Pressure Sensors*, IEEE Trans. on Electron Devices, Col. ED-26, No. 12, Dec. 1979, pp. 1887-1896
- 7/ C.S. Smith, *Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon*, Physical Review, Vol. 94, No. 1, Apr. 1954, pp. 42-49
- 8/ O.N. Tulte, E.L. Stelzer, *Piezoresistive Properties of Silicon Diffused Layers*, J. of Applied Physics, Vol. 34, No. 2, Feb. 1963, pp. 313-318

Viri slik:

Sl.6. in sl.7.: Aljančič U., *Simulacija odziva in optimizacija tehnologije silicijevega piezoresistivnega senzora tlaka*, magistrska naloga, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana, 1993

Sl.9 do sl.13.: Fotografski arhiv in interna dokumentacija Hipot-Hybrid d.o.o.