



MEMS

komponente

Prof. dr Vesna Paunović

Prof. dr Dragan Pantić



Senzori pritiska

Prva proizvodnja senzora pritiska većeg obima počela je 1974. god. u firmi National Semiconductor Corporation, Santa Klarai, Kalifornija.

Skoro svi senzori pritiska se proizvode tehnologijom zapreminskog mikromašinstva.

Merenje apsolutnog pritiska i krvnog pritiska su dve najveće oblasti primene.

Većina senzora koristi piezootporne elemente da bi detektovali naprezanje u tankoj silicijumskoj membrani kao reakciju na primenjeni pritisak.

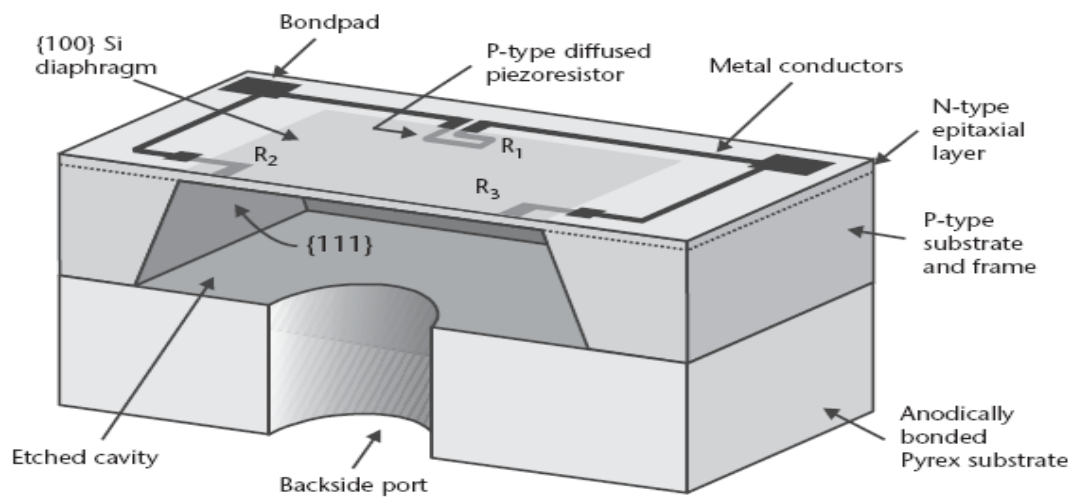
Manji broj koristi kapacitivne metode za detekciju pomeraja tanke membrane.



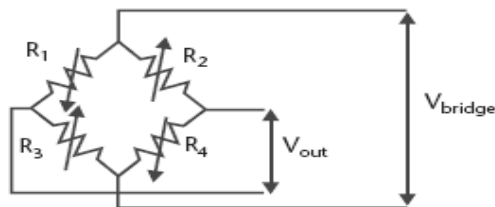
Piezootporni senzori pritiska

Osnovna struktura ovog senzora sastoji se od četiri otpornika (elemenata sensorisanja) koji u konfiguraciji Wheatstone-vog mosta mere naprezanje unutar tanke silicijumske membrane.

Naprezanje membrane je direktna posledica otklona membrane zbog razlike pritiska primenjenih sa prednje i zadnje strane senzora. Otklon membrane je obično manji od $1 \mu\text{m}$.



(a)



(b)

Pri maksimalnom primenjenoj razlici pritiska, na izlazu je napon od nekoliko mV po voltu pobude (napona napajanja) mosta.

Osetljivost se definiše kao izlazni napon normalizovan primenjenim ulaznim pritiskom $[(\text{mV/V})/\text{Pa}]$ i u direktnoj je vezi sa piezootpornim koeficijentima.

Debljina i geometrijske dimenzije membrane utiču na osetljivost i opseg pritiska koji senzor može da meri.



Uobičajeno je da se u supstrate orijentacije $\{100\}$ pozicioniraju četiri difundovana piezootpornika na tačkama gde je najveće naprezanje, tj. na sredini ivica membrane.

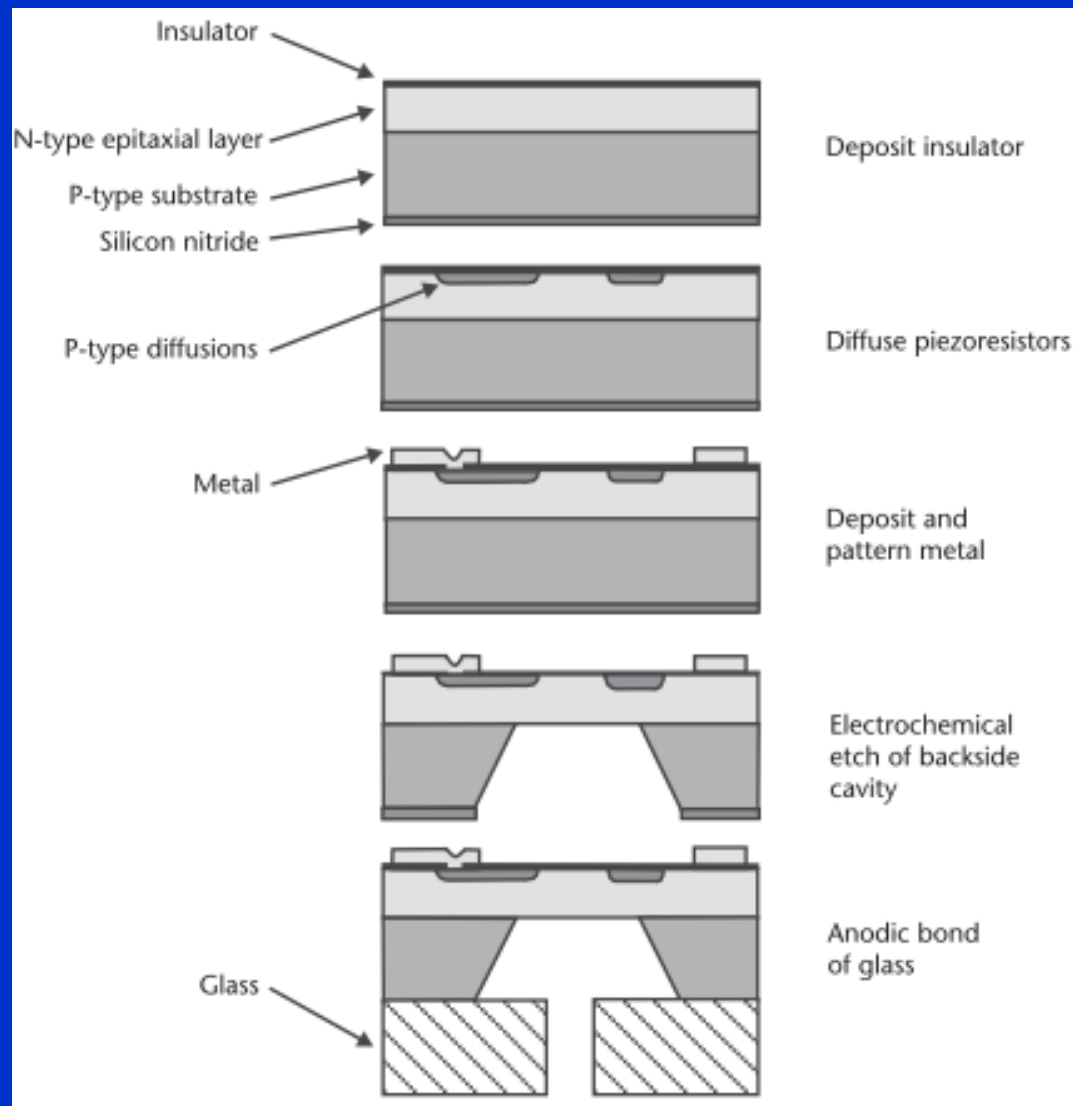
Dva otpornika imaju primarne ose paralelne ivici membrane, što ima za posledicu smanjenje otpornosti sa savijanjem membrane.

Druga dva otpornika imaju glavne ose normalne na ivicu membrane, što rezultuje u povećanju otpornosti sa povećanjem pritiska.

Potrebno je da četiri piezootpornika imaju iste otpornosti u odsustvu primenjenog pritiska. Svako neslaganje otpornosti, čak i ako je prouzrokovano temperaturom, dovodi do neravnoteže Wheatstone-ovog mosta. Očitani rezultujući izlaz poznat je kao ofset nule i nije poželjan.

Duboka difuzija degradira osetljivost piezootpornika jer tada osetljivi elementi trpe naprezanje i po dubini. Plitke difuzije su sklone efektima površinskog naelektrisanja koji mogu da stvore dugoročni drift izlaznog signala. Rešenje je da piezootporne difuzije budu ukopane ispod površine membrane.

Proizvodnja tipičnog senzora pritiska oslanja se uglavnom na standardne tehnološke procese koji se sreću u industriji integriranih kola, sa izuzetkom preciznog formiranja tanke membrane korišćenjem elektrohemijskog nagrizanja (ECE). Epitaksijalni sloj Si n-tipa se formira na pločici p-tipa orijentacije {100}. Tanki izolacioni sloj se narasta na prednjoj strani pločice, dok se zaštitni silicijum-nitridni film nanosi sa zadnje strane.





Piezootporni osetljivi elementi formiraju se lokalnim dopiranjem Si koristeći implantaciju bora i visoko temperaturni difuzioni ciklus.

Nagrizanjem izolatora sa prednje strane otvaraju se kontakti za piezootpornike koji leže ispod.

Metalni sloj, najčešće od Al, se nanosi spaterovanjem i oblikuje u provodne linije i stopice za bondiranje.

Otvori kvadratnog oblika se definišu i formiraju nagrizanjem Si-nitridnog sloja sa donje strane pločice. Dvostrana litografija obezbeđuje da četvrtasti otvori budu podešeni prema osetljivim elementima sa prednje strane. U tom koraku formiraju se električni kontakti za p-supstrat i epitaksijalni sloj n-tipa, a elektrohemijski nagriza Si sa zadnje strane u rastvoru kalijum hidroksida. U toku nagrivanja prednja strana mora da bude zaštićena. Nagrivanje prestaje kada sloj n-tipa postane ogoljen. Tako se formira membrana određene debljine koju definiše epitaksijalni sloj.

Anodnim bondiranjem stakla sa zadnje strane pločica formira se senzor apsolutnog pritiska, koji meri pritisak na prednjoj strani u odnosu na pritisak u šupljini (najčešće vakuuma). Za diferencijalni tip senzora pritiska vrši se precizno bušenje rupa u staklu



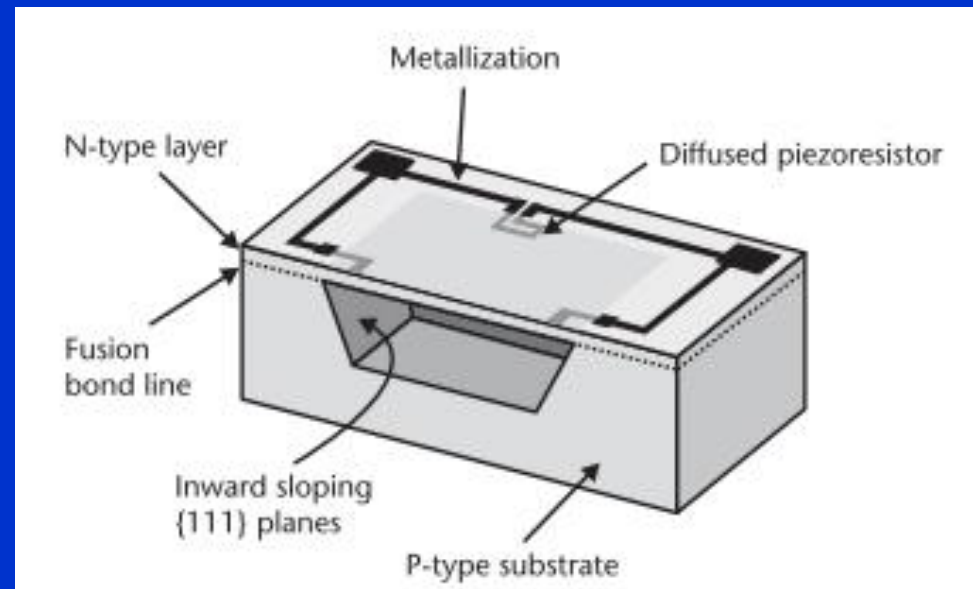
Pronalazak procesa fuzionog bondiranja dve Si pločice 80-tih godina prošlog veka doveo je do novog dizajna senzora pritiska u tehnologiji zapreminskog mikromašinstva. Ravni {111} nagnute spolja definišu veličinu senzora. Fuziono bondiranje Si omogućava formiranje membrane posle nagrizanja šupljine sa ravnima {111} koje su nagnute prema unutrašnjosti. Tako se mogu proizvesti senzori pritiska znatno manje veličine.

Proizvodnja senzora sa fuzionim bondiranjem Si počinje nagrizanjem šupljine sa donje strane pločice.

Bondiranjem druge pločice odozgo enkapsulira se šupljina.

Elektrohemijskim nagrizanjem ili standardnim poliranjem smanjuje se debljina gornje pločice do potrebnih dimenzija membrane.

U preostalim koracima definišu se piezootporni osetljivi elementi, kao i metalne veze.



Minijaturni senzor apsolutnog pritiska
dobijen fuzionim bondiranjem Si



U proizvodnji preciznih senzora pritiska neophodna je kalibracija i korekcija izvora grešaka.

Za većinu automobilskih, medicinskih i industrijskih primena tačnost od 1% za temperaturni opseg od -40 do 125°C su dovoljni.

Greške prvog reda mogu se javiti zbog ofseta nule (postojanje izlaza kada nije primenjen pritisak), nekalibrisane osetljivosti i temperaturne zavisnosti izlaznog signala.

Efekte drugog reda uključuju nelinearnost u izlaznom odzivu, kao i temperaturne koeficijente nekih članova grešaka prvog reda.

Kompenzacija i tehnike korekcije unose određene restrikcije u pogledu dizajna komponenata i tehnologije proizvodnje. Na primer, lasersko trimovanje otpornika sa približno nulnim temperaturnim koeficijentima otpornosti (TCR) može se koristiti za ispravljanje grešaka prvog reda. Za ovaj način korekcije potrebno je da prosečna koncentracija dopiranja bude iznad $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ili ispod $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$. Za koncentracije dopiranja između navedenih vrednosti kompenzacija zahteva sofisticirana električna kola koja stalno kontrolišu temperaturu Wheatstone-ovog mosta.



Visokotemperaturni senzori pritiska

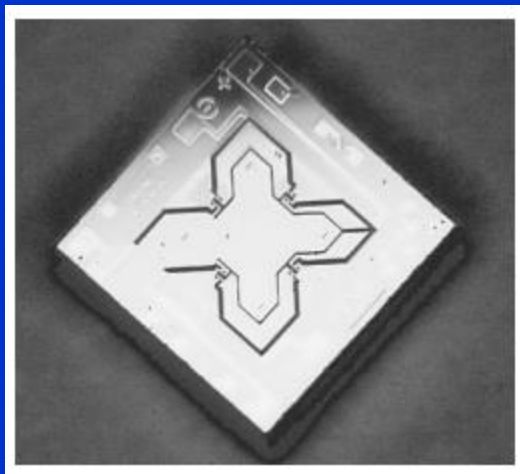
Temperaturni opseg komercijalno dostupnih senzora pritiska na bazi Si je -40 do 125°C , što pokriva automobilske i vojne specifikacije.

Iznad 125°C povećana struja curenja p-n spoja između difuzionog piezootpornog elementa i supstrata degradira karakteristike.

Tehnologija Si na izolatoru (SOI) je veoma korisna na povišenim temperaturama pošto se tanki Si otpornici nalaze preko sloja Si-dioksida (nema p-n spojeva).

Susedni Si osetljivi elementi su izolovani jedan od drugog plitkim žlebovima.

Dielektrična izolacija ispod osetljivih elemenata u potpunosti eliminiše struju curenja kroz supstrat, sve dok su primenjeni naponi ispod vrednosti napona proboja izolacionog oksidnog sloja.



Senzor pritiska u SOI tehnologiji za primene na temperaturama do 300°C



U SOI tehnologiji proces fuzionog bondiranja Si ima veoma važnu ulogu u formiranju Si supstrata.

Visoko dopirani tanki sloj p-tipa formira se na površini jedne pločice, dok sloj termičkog oksida narasta na drugoj pločici.

Fuziono bondiranje takve dve pločice dovodi do direktnog kontakta sloja p-tipa i oksidnog sloja.

Nagrivanje u etilen-diamin pirokatekolu (EDP) smanjuje debljinu kontakta, a zaustavlja se na visoko dopiranom Si p-tipa.

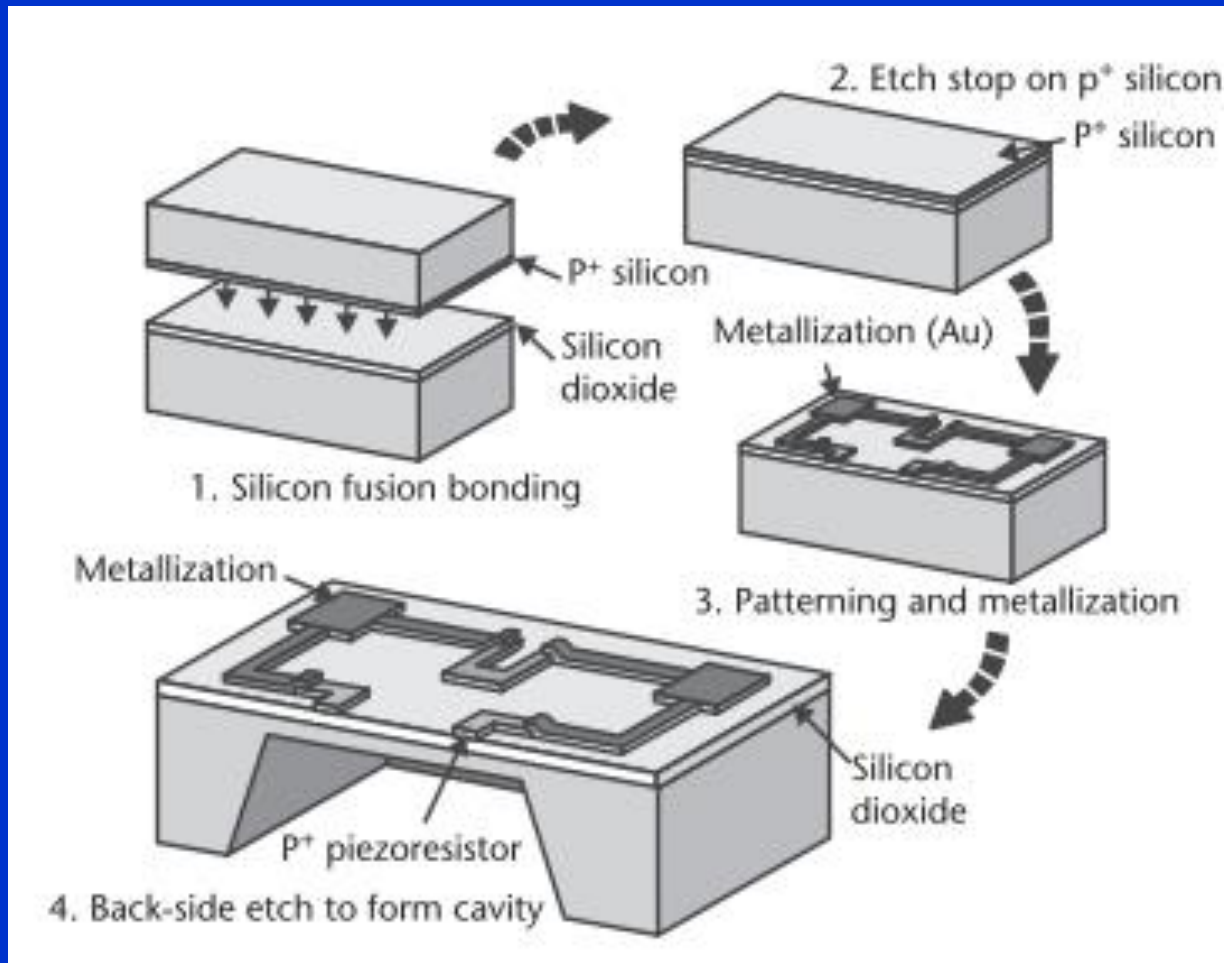
Litografski postupak na prednjoj strani je praćen nagrivanjem silicijumskih piezootpornih osetljivih elemenata.

Za metalizaciju spateruje se ili neparava Au, a zatim se litografskim postupkom oblikuje u metalne linije i stopice za bondiranje.

U završnoj fazi formira se tanka membrana nagrivanjem sa zadnje strane korišćenjem kalijum hidroksida ili sličnih rastvora za ecovanje.

Dvostrana litografija je presudna za poravnanje konture šupljine sa zadnje strane i piezootpornika sa prednje strane.

Tokom nagrivanja (formiranja šupljine) prednja strana ne mora da bude zaštićena ukoliko se umesto kalijum hidroksida koristi EDP, jer je pirokatekol visoko selektivan prema slabo dopiranom Si p-tipa, silicijum dioksidu i zlatu.



Koraci u proizvodnji visokotemperaturnog senzora pritiska u SOI tehnologiji



Senzori masenog protoka

Protok gasa preko površine zagrejanog elementa dovodi do gubitka toplote brzinom koja je proporcionalna masenom protoku.

Senzori protoka koji rade na ovom principu ponašaju se kao kategorija komponenata poznata pod nazivom „anemometri na bazi vruće žice“.

Mere temperaturu vrućeg elementa na osnovu čega se izvodi zaključak o brzini protoka.

Svi imaju strukturu sačinjenu od tankog grejnog elementa i komponente za merenje temperature koja se nalazi na tankoj (<1mm) dielektričnoj membrani koja lebdi preko šupljine formirane nagrizanjem (dubine >50mm).

Ovakav dizajn obezbedjuje izuzetnu termičku izolaciju izmedju grejača i nosećeg mehaničkog okvira, što garantuje da gubitak toplote nastaje isključivo zbog protoka mase preko grejnog elementa.

Termička izolacija iznosi 15°C po mW snage grejača. Mali tolotni kapacitet omogućava brz vremenski odziv.

Metod odredjivanja temperature grejnog elementa može se zasnivati na merenju njegove otpornosti i izračunavanju T preko temperaturnog koeficijenta otpornosti (TCR). Alternativno, temperatura se može direktno meriti korišćenjem p-n diode ili termospoja.



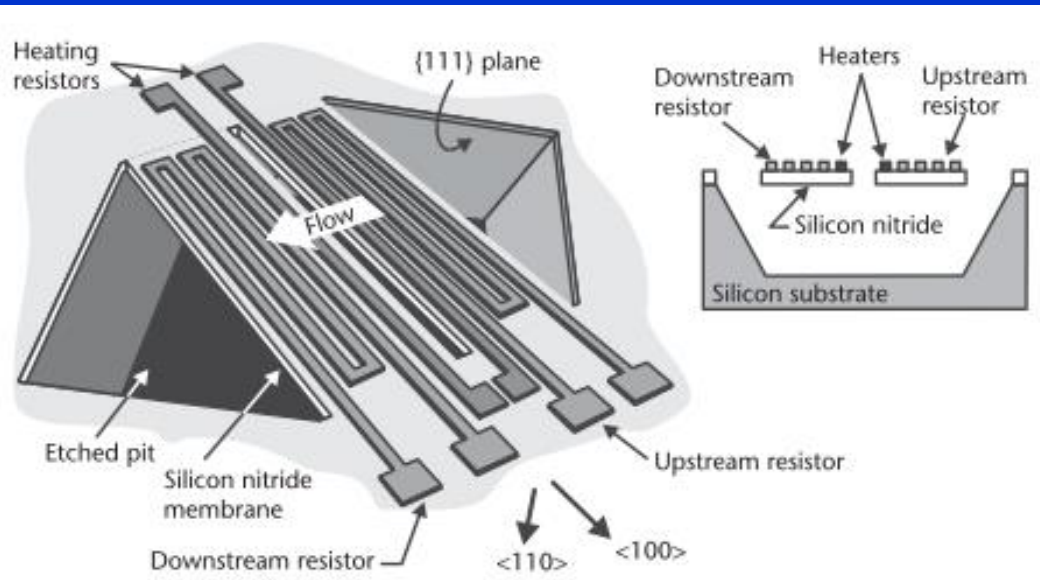
Honeywell proizvodi AWM seriju bidirekcionih senzora protoka vazdušne mase korišćenjem dve susedne tanke membrane (napravljene od Si nitrida) koje sadrže po grejni element i temperaturno osetljivi otpornik.

Membrane su malih dimenzija ($<500 \times 500 \mu\text{m}^2$).

Gas teče preko membrane hladeći uzvodni i grejući nizvodni element. Ova dva grejača su deo prvog Wheatstone-ovog mosta, dok temperaturno osetljivi otpornici formiraju dva kraka u drugom Wheatstone-ovom mostu čiji je diferencijalni izlaz direktno proporcionalan brzini protoka.

Pravac protoka utiče na polaritet diferencijalnog napona na izlazu mosta – karakteristiku dizajna sa dvostrukim osetljivim elementima. Polaritet određuje koji od dva grejača je uzvodni, a koji nizvodni.

Lasersko trimovanje otpornika omogućava kalibraciju, kao i nulovanje bilo kog ofseta usled neslaganja otpornosti u Wheatstone-ovom mostu.





Proizvodnja započinje se deponovanjem tankog sloja Si-nitrida (približne debljine od $0.5\mu\text{m}$) preko Si pločice orijentacije $\{100\}$. Si-nitrid je izvrstan izbor za izradu tankih membrana zato što se formira pod naprezanjem na istezanje, a zadržava strukturni integritet u većini rastvora za anizotropno nagrizanje.

Zatim se deponuje tanak film za grejače i osetljive elemente postupkom spaterovanja metala (Pt ili Ni) ili CVD depozicijom visokodopiranog poli-Si posle čega sledi standardni litografski i postupak nagrizanja filmova.

Pasivizacioni slojevi, uglavnom od Si-nitrida, enkapsuliraju i štite grejače i osetljive elemente. Onda se litografskim postupkom i nagrizanjem oba sloja Si-nitrida oblikuju dve viseće membrane.

Završni korak uključuje nagrizanje Si u rastvoru kalijum hidroksida da bi se formirala duboka šupljina. Nagrizanje se prvo odigrava u otvorenim Si oblastima, a zatim nastavlja ispod Si-nitrida kako bi se dobile viseće membrane.



Senzori ubrzanja - akcelerometri

Prva demonstracija MEM akcelometra bila je 1979. god. na Stanford univerzitetu, ali je trebalo blizu petnaest godina da takava komponenta postane prihvaćena kao glavni proizvod sa višenamenskim primenljivošću.

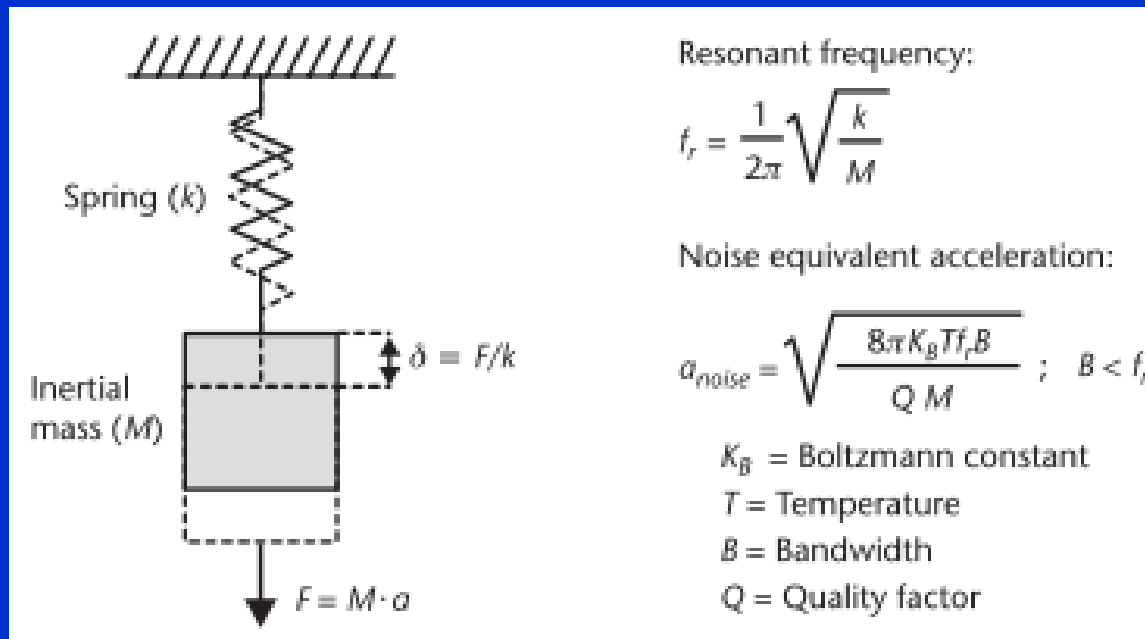
Celokupno tržište silicijumskih mikroakcelometara se postepeno povećavalo, dostižući obim od 27 miliona komponenata 1998. god., a bilo je inspirisano potrebama sistema za senzorisanje sudara i aktivaciju vazdušnih jastuka.

Povećanje proizvodnje pratilo je smanjenje cene koja je 1990. god. iznosila 10 dolara, a 1998. samo 3 dolara po komadu. Jasno, za male obime proizvodnje cene komponenata su znatno više od onih dobijenih masovnom proizvodnjom kakva je u automobilskoj industriji .



Neke primene MEM akcelerometara

Merenja	Primena
Ubrzanje	Detekcija udara spreda i sa strane za vazdušne jastuke; Električki kontrolisano vešanje automobila; Polaganje zaštitnih pojaseva; Sistemi kontrole vozila i vuče; Inercijalna merenja, pozicioniranje objekta, navigacija; Kontrola ljudske aktivnosti za pejsmejker.
Vibracija	Kontrola motora; Održavanje motora i mašinerije u zavisnosti od uslova; Uređaji za obezbedenje vozila; Praćenje potresa i udara; Praćenje seizmičkih aktivnosti;
Uglo skretanja	Inklinometari i senzorisanje zaokreta; Stabilnost i prevrtanje vozila; Periferije kompjutera (džojstik, displej...); Prepoznavanje rukopisa; Mostovi, rampe i konstrukcije;



Osnovna struktura svih akcelerometara sastoji se od inercijalne mase zakačene na oprugu. Ipak, razlikuju se po sensorisanju relativne pozicije inercijalne mase koja se pomera pod dejstvom spoljašnjeg ubrzanja.

Najčešća tehnika sensorisanja je kapacitivna, gde jedna ploča kondenzatora predstavlja inercijalnu masu. Ova tehnika zahteva korišćenje specijalnih elektronskih kola za detekciju trenutnih promena kapacitivnosti ($<10^{-15}$ F) i prevodjenje tih promena u pojačani izlazni napon.

Druga tehnika koristi piezootpornike za sensorisanje stresa indukovanog u opruzi.

U trećoj tehnici, opruga je piezoelektrična ili sadrži piezoelektrični tanki film, što omogućava da napon bude u direktnoj proporciji sa pomerajem.

U retkim slučajevima, kao što je rad na povišenim temperaturama, neophodno je koristiti optičko vlakno za sensorisanje pozicije.



Glavne karakteristike akcelometra su: opseg ubrzanja (dat u G, $1 \text{ G} = 9.81 \text{ m/s}^2$), osetljivost (V/G), rezolucija (G), frekventni propusni opseg (Hz), osetljivost po različitim osama i imunost na potrese.

Opseg ubrzanja i propusni opseg frekvenci mogu da variraju značajno u zavisnosti od primene komponente. Akcelerometri za vazdušne jastuke rade u opsegu ubrzanja od $\pm 50 \text{ G}$ i širinom propusnog opsega od oko 1 kHz. Suprotno, komponente za sensorisanje lupanja motora ili vibracija rade u opsegu ubrzanja od oko 1 G, ali moraju da reše problem malih ubrzanja ($< 100 \mu\text{G}$) u velikom propusnom opsegu ($> 10 \text{ kHz}$). Moderni srčani pejsmejkeri koriste multiosne akcelerometre za praćenje nivoa aktivnosti čovekovog tela, na osnovu čega podešavaju frekvenciju stimulacije rada srca. Oblast primene takvih senzora je $\pm 2 \text{ G}$ sa propusnim opsegom frekvenci manjim od 50 Hz, ali imaju izuzetno nisku potrošnju čime obezbeđuju dugo trajanje baterija. Akcelometri za vojne primene u radu mogu često preći ubrzanja od 1000 G.

Osetljivost na unakrsnim osama ukazuje na imunost senzora na ubrzanja duž pravaca normalnih na glavnu osu sensorisanja. Poželjno je da ta osetljivost bude iznad 40 dB. Imunost na potrese je bitna zbog zaštite komponente tokom rukovanja ili operacije. Ova karakteristika se definiše tokom testa koji uključuje ispuštanje komponente sa visine od 1m na beton, pri čemu udar može lako dostići dinamični pik od 10000 G. Osim jakog udara, test ispuštanja pobudjuje razne rezonantne režime koji su skloni da izazovu katastrofalne otkaze.

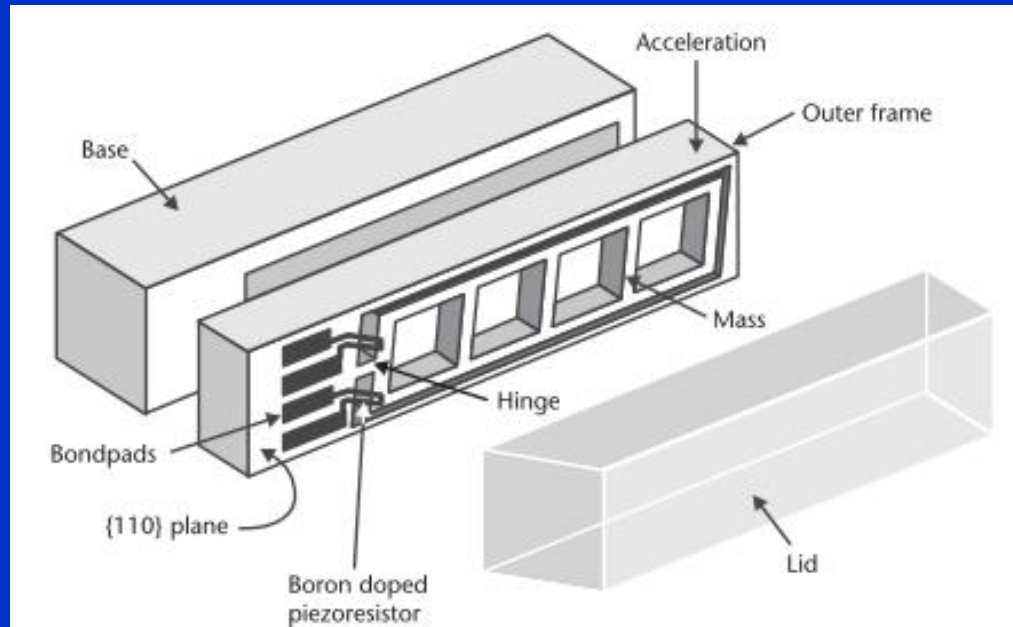


Piezootporni akcelometri u tehnologiji zapreminskog mikromašinstva

Sve do skora piezootporni tipovi senzora ubrzanja bili su široko zastupljeni.

Mnoge kompanije, kao što je Lucas NovaSensor, Fremont, California i EG&G IC Sensors, Milpitas, California, nudile su proizvode na bazi anizotropno ecovane silicijumke inercijalne mase i difundovanih piezootprnih osjetljivih elemenata. Ali ovi proizvodi su povučeni zbog agresivnih zahteva automobilske industrije u pogledu snižavanja cene.

Uvodjenje proizvoda Endevco korporacije iz San Juan Capistrano, California 1996.god pokazalo je da piezootporni akcelometri mogu da opstanu na tržištu velike konkurencije



Ilustracija piezootpornog akcelometra Endevco korporacije proizvedenog korišćenjem anizotropnog nagrizanja Si pločica.

Jezgro u sredini sadrži inercijalnu masu okačenu šarkom.

Dva piezootporna osjetljiva elementa mere otklon mase.

Osa osjetljivosti je u ravni jezgra.

Spoljašnji okvir deluje kao mehanizam za zaustavljanje koji sprečava preterana ubrzanja i oštećenje delova.



Endevco senzor se sastoji od tri supstrata: baze, jezgra (koje sadrži oprugu nalik šarci, inercijalnu masu i osetljive elementa) i zaštitni poklopac.

Inercijalna masa je unutar okvira okačena oprugom. Dva tanka, borom dopirana piezootporna elementa u Wheatstone-ovom mostu prostiru se iznad $3.5 \mu\text{m}$ uskog medjuprosta između spoljašnjeg okvira jezgra i inercijalne mase.

Piezootpornici su debljine $0.6 \mu\text{m}$ i dužine $4.2 \mu\text{m}$, zbog čega su veoma osetljivi na trenutno pomeranje inercijalne mase. Izlaz od 25 mV je posledica ubrzanja od 1 G pri pobudi Witstonovog mosta od 10 V .

Debela a uska struktura šarke dopušta pomeranja unutar ravni komponente, ali je veoma kruta u pravcima normalnim na pločicu, što ima za posledicu visoki imunitet na ubrzanja van ose.

Spoljašnji okvir štiti komponentu u slučaju preteranih potresa pri ubrazanju. Potrebno je ubrzanje od 6000 G da bi inercijalna masa dotakla okvir, a komponenta može da preživi šokove koji prekoračuju 10000 G .

Otvori na jezgru smanjuju težinu inercijalne mase i kombinovani sa krutom šarkom da obezbedjuju visoku rezonantnu frekvenciju od 28 kHz .



Proces proizvodnje je donekle jedinstven, jer za jezgro koristi pločice orijentacije $\{110\}$. U tom slučaju, neke $\{111\}$ kristalografske ravni su ortogonalne na $\{110\}$ površinu pločice, što dopušta formiranje vertikalnih kanala pri anizotropnom mokrom nagrivanju.

Proizvodnja započinje implatacijom i difuzijom bora na $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ da bi se formirali jako dopirani piezootpornici p-tipa. Kako bi se postigla maksimalna osetljivost, piezootpornici su poređani u pravcu $\langle 111 \rangle$. Si-oksadni ili Si-nitridni slojevi maskiraju silicijum u formi inercijalne mase i šarke tokom sledećeg anizotropnog nagrivanja u etilendiamin-pirokakolu (EDP).

Inercijalna masa je ograničena vertikalnim $\{111\}$ ravnima, što joj daje oblik paralelograma čiji je unutrašnji ugao 70.5° .

Sledeći koraci proizvodnje obezbeđuju depoziciju i oblikovanje aluminijumskih električnih kontakata i stopica za bondiranje.

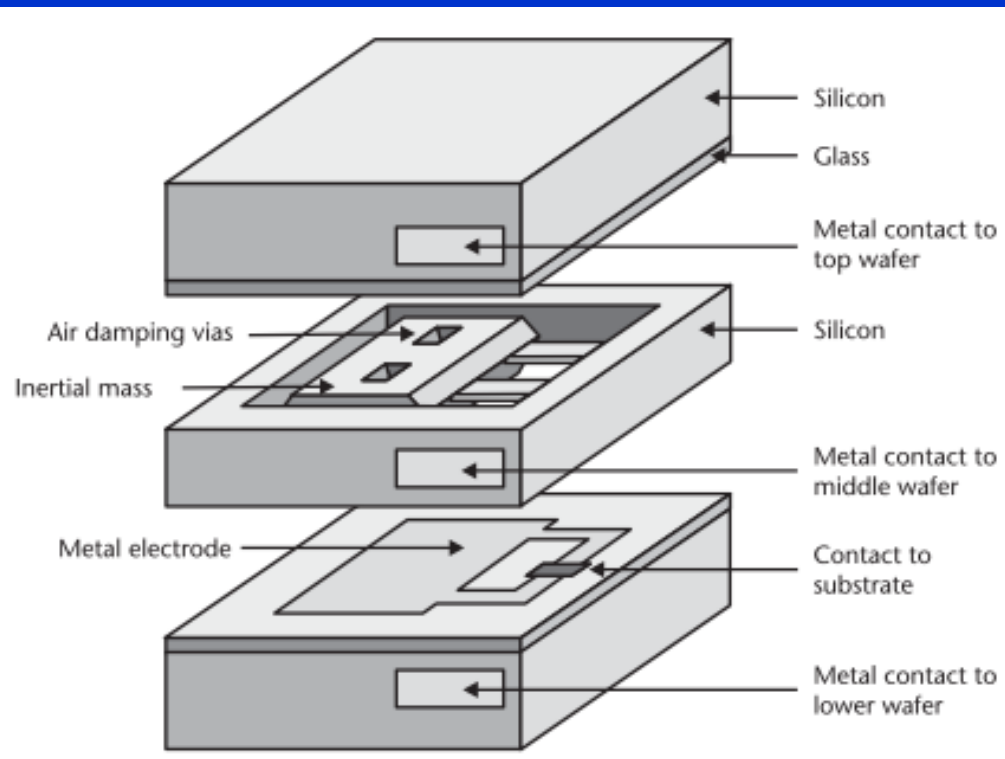
Plitka udubljenja se prave u supstratima baze i poklopca pre nego što se sa jezgrom povežu lemnim staklom kao athezivom.



Kapacitivni akcelerometri u tehnologiji zapreminskog mikromašinstva

Mnoge kompanije nude kapacitivne akcelerometre u tehnologiji zapreminskog mikromašinstva.

Primer opisuje SCA seriju firme VTI Hamlin, Vantaa, Finland. Senzor se sastoji od tri bondirane Si pločice, sa šarkom i inercijalnom masom inkorporiranim u srednju pločicu. Inercijalna masa formira unutrašnju pokretnu elektrodu promenjivog diferencijalnog kondenzatorskog kola. Dve spoljašnje pločice su indentične i predstavljaju fiksirane elektrode dva kondenzatora.



Rupe u inercijalnoj masi smanjuju efekat dampinga vazduha zarobljenog u zatvorenoj šupljini, povećavajući frekventni propusni opseg senzora.

Za razliku od drugih dizajna, kontakti elektroda su sa bočnoj strani čipa i zato moraju biti definisani posle sečenja pločice na pojedine delove senzora.

SCA serija senzora se koristi u mernom opsegu od ± 1.5 G do ± 50 G. Elektronska kola senzorišu promene kapacitivnosti, zatim ih konvertuju u izlazni napon između ± 2.5 V, sa znakom koji pokazuje pravac vektora ubrzanja. Procenjen propusni opseg je 400 Hz, osetljivost poprečnih osa manja od 5% izlaza, a imunost na udarce 20 000 G.



Tri pločice se odvojeno procesiraju i na kraju spajaju nekim od sledećih procesa povezivanja: anodnim bondiranjem, fuzionim bondiranjem Si, ili termokompresionim bondiranjem stakla.

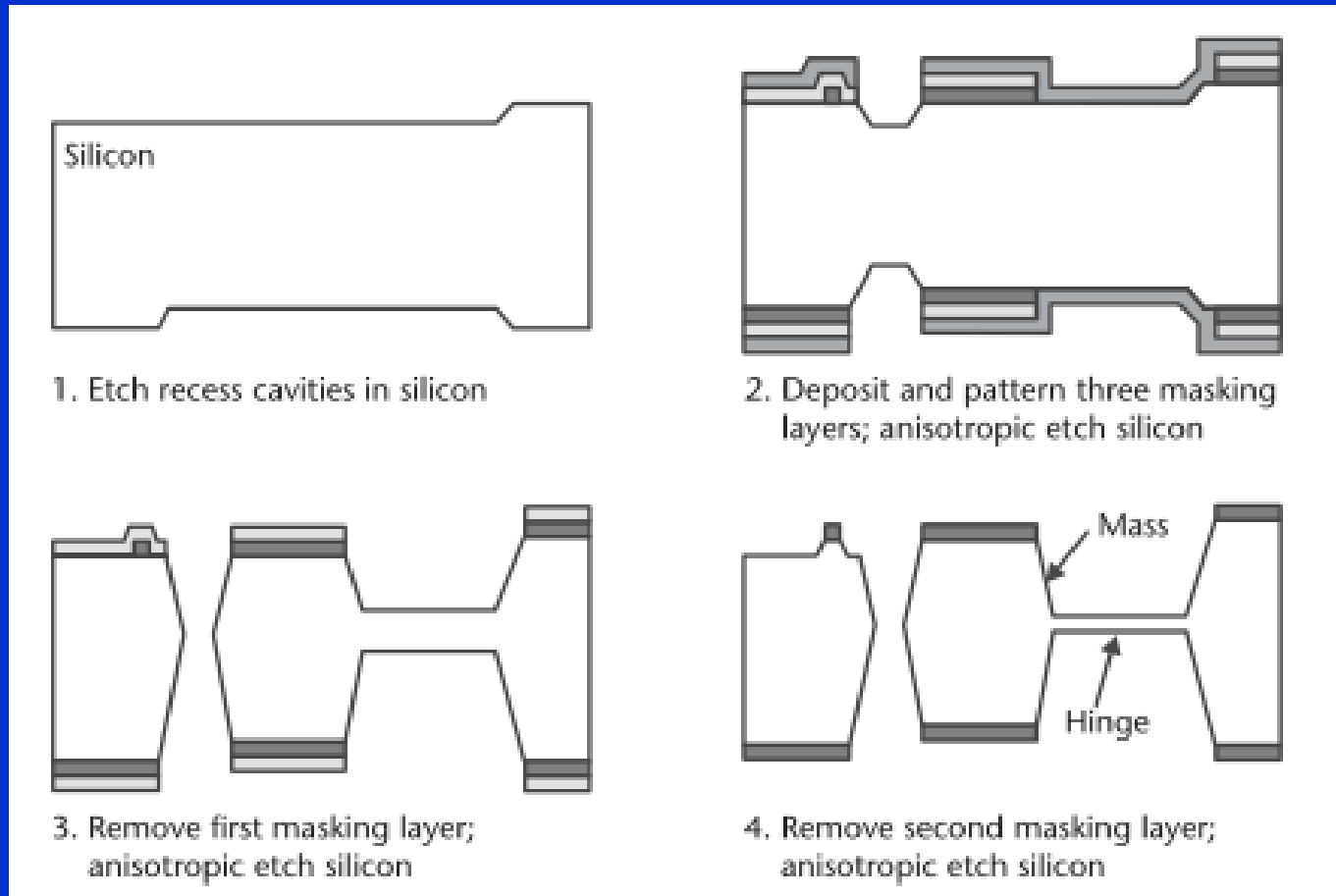
Gornja i donja pločica su indentične i sadrže metalne elektrode iscrtane standardnom litografijom preko tankog sloja Si-dioksida.

Inercijalna masa i šarka se formiraju u srednjoj pločici koristeći sledeća četiri koraka anizotropnog nagrivanja u kalijum-hidroksidu ili sličnom sredstvu za nagrivanje.

Prvo se formiraju plitka udubljenja nagrivanjem sa obe strane pločice. Onda se odvojeno deponuju i oblikuju tri različita maskirajuća sloja. Kao materijal mogu se koristiti Si-dioksid i Si-nitrid.

Svaki od ova tri maskirajuća sloja se uklanja redom posle svakog koraka mokrog nagrivanja u anizotropnom rastvoru. U suštini, informacija o šemi se kodira u svakom od tri maskirajuća sloja. Nagrivanje u tačno definisam vremenu prosto prevodi kodiranu informaciju u promenjivu topografiju slicijumskog supstrata.

Krajnji rezultat je tanka šarka i deblja inercijalna masa. Udubljenja na bilo kojoj strani mase formira tanke međuprostore za dvopločaste kondenzatore sensorisanja



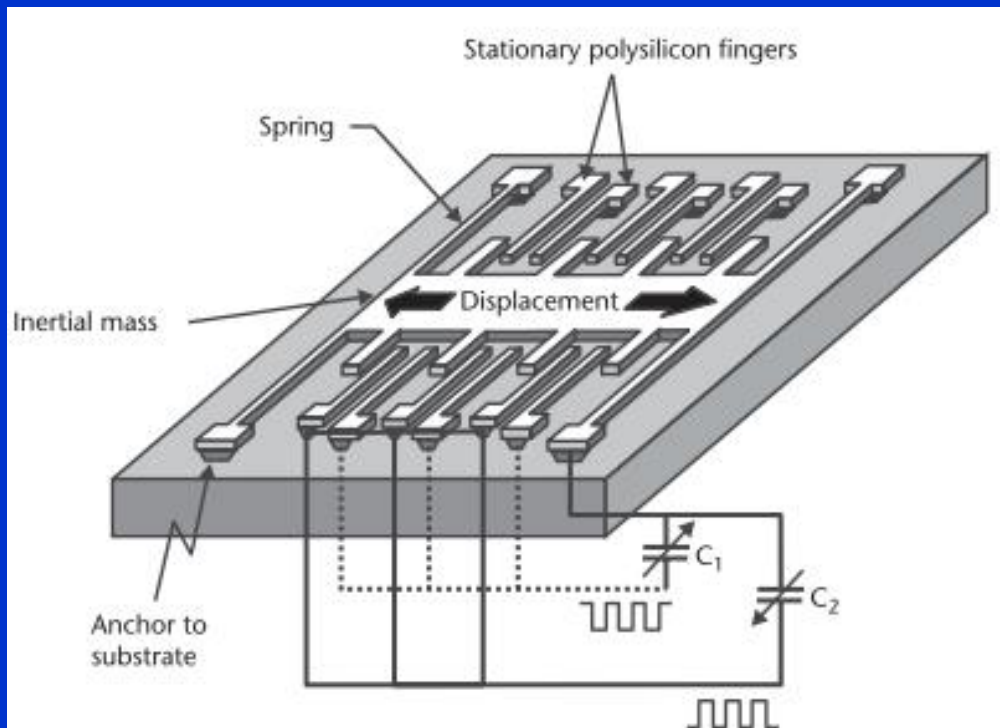
Koraci u proizvodnji srednje pločice koja sadrži šarku i inercijalnu masu kapacitivnog akcelometra u tehnologiji zapreminskog mikromašinstva



Kapacitivni akcelerometri u tehnologiji površinskog mikromašinstva

Tehnologija površinskog mikromašinstva se pojavila kasnih 80-tih god. Prošlog veka kao jeftinija tehnologija za izradu akcelerometara namenjenih automobilskoj industriji. Kompanije Robert Bosch GmbH, Germany, i Analog Devices, Inc., USA nude akcelerometre u tehnologiji površinskog mikromašinstva, ali je samo američka profitirala sa familijom proizvoda ADXL.

Za razliku od akcelerometara u tehnologiji zapreminskog mikromašinstva, ovi u tehnologiji površinskog mikromašinstva u svom sastavu imaju viseću strukturu nalik češlju čija primarna osa osetljivosti leži u ravni čipa. To se odnosi na x-osni (ili y-osni) tip komponente, dok je kod z-osnih akcelerometara osa sensorisanja normalna na ravan čipa.



ADXL komponenta se sastoji od tri seta poli-Si elektroda. Dva seta vezana za supstrat (stacionarna) formiraju gornje i donje elektrode sistema diferencijalne kapacitivnosti. Treći set je u obliku dvostranog češlja čiji su prsti smešteni između prvih dva seta. On visi $1\mu\text{m}$ iznad površine pomoću dva duga držača koji deluju kao opruga. Treći set formira zajedničku srednju, pokretnu, elektrodu za dva kondenzatora. Inercijalna masa se sastoji od centralnog elementa i prstiju.



Kada nema ubrzanja, dve kapacitivnosti su identične, pa je izlazni signal (proporcionalan razlici kapacitivnosti) jednak nuli.

Primenjeno ubrzanje pomera viseću strukturu, što ima za posledicu neravnotežu kapacitivnosti polu mosta. Diferencijalna struktura je takva da se jedna kapacitivnost povećava, a druga smanjuje. Ukupna kapacitivnost je mala, reda 100 fF.

Za seriju ADXL05 (sa opsegom ubrzanja ∓ 5 G) promena kapacitivnosti kao odgovor na ubrzanje od 1 G iznosi 100 aF. Ona je ekvivalent 625 elektrona za primenjen napon od 1 V. Zato se mora meriti elektronskim kolima integrisanim na čipu. Osnovno kolo dvofazni oscilator malih amplitudakoji pobudjuje oba kraja kapacitivnog polumosta suprotnih faza pri frekvenci od 1 MHz. Neravnoteža capacitivnosti uzrokuje napon u srednjem čvoru. Sigal se onda demoduliše i pojačava.

Za ADXL familiju opseg ubrzanja varira od ∓ 2 G (serija ADXL 202) do ∓ 100 G (serija ADXL 190). Dinamički opseg je ograničen na oko 60 dB za propusni opseg frekvenci 1-6 kHz.

Mala promena kapacitivnosti u kombinaciji sa relativno malom masom daju prag šuma koji je relativno veliki u poredjenju sa piezootpornim i akcelerometrima u tehnologiji zapreminskog mikromašinstva.



Primena visokoamplitudnog napona niske frekvence (ispod prirodne frekvence senzora) izmedju dve ploče kondenzatora proizvodi elektrostatičku silu koja privlači ploče jedna drugoj. Ovaj efekat omogućava primenu povratne sprege ka inercijalnoj masi. Svaki put kada ubrzanje odvlači set visećih prstiju od jednog stacionarnog seta, na pločama tog seta javlja se napon amplitude znatno veće od napona sensorisanja, ali manje frekvence, zbog čega se ploče privlače kontrabalansirajući efekat spoljašnjeg ubrzanja.

Napon povratne sprege je proporcionalan izmerenoj neravnoteži kapacitivnosti kako održao viseće prste u njihov početni položaj, praktično u pseudostacionarno stanje. Ova elektrostatička akcija nazvana sila za balansiranje je povratna sprega u obliku zatvorene petlje. Minimizira pomeranje, a značajno poboljšava izlaznu linearnost pošto se centralni element nikad ne pomera više od nekoliko nm.

Značajna prednost tehnologije površinskog mikromašinstva je laka integracija dva jednoosna akcelerometra na istom čipu da bi se dobio dvoosni akcelerometar. U najjednostavnijoj konfiguraciji, jednoosni akcelerometri su normalni jedan na drugi.

ADXL200 serija dvoosnih akcelerometara ima softiciraniju strukturu u kojoj je inercijalna masa raspodeljena izmedju dva akcelerometra.