



MEMS

komponente

Prof. dr Vesna Paunović

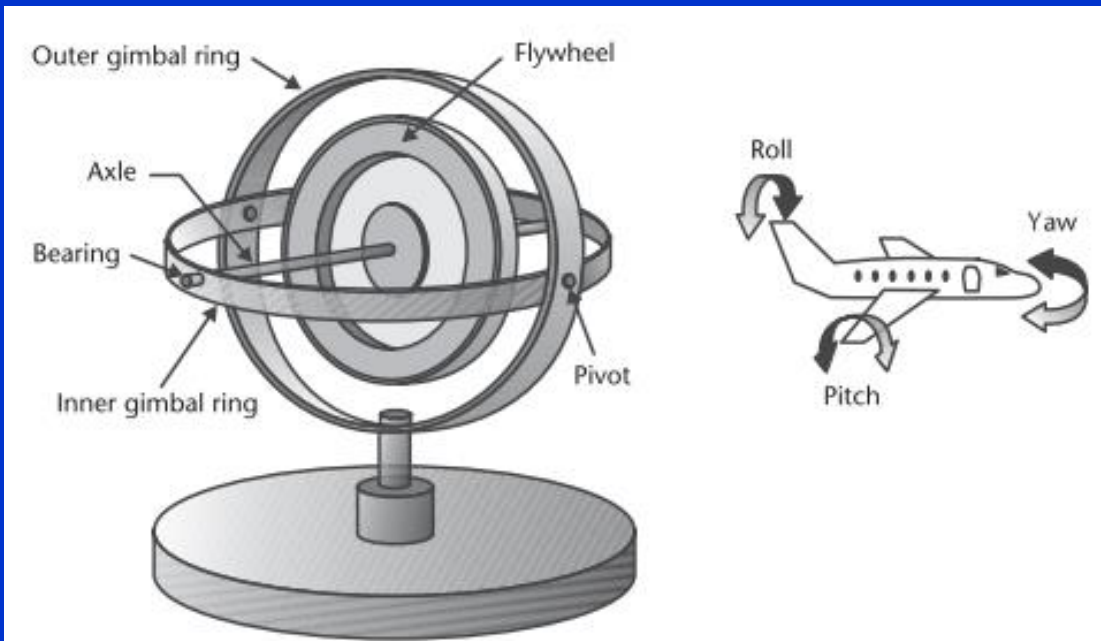
Prof. dr Dragan Pantić



Senzori ugaone brzine

Mnogo pre pronalaska GPS sistema, žiroskop je bio navigacioni instrument kritičan za održavanje fiksne orijentacije plovnog objekta bez obzira na rotaciju Zemlje. Pronadjen je u 19-tom veku i sastojao se od zamajca (flywheel) montiranog na prstenovima (gimbal rings). Veliki ugaoni momenat zamajca delovao je suprotno primenjenom obrtnom momentu i održavao je orijentaciju ose obrtanja nepromenjenom.

1963. god. mehanički žiroskop zamenjen je žiroskopom na bazi prstenastog lasera koji se i danas koristi u mnogim visokopreciznim primenama, uključujući avijaciju.



Žiroskopi imaju veliku preciznost zbog velikog ugaonog momenta koji je proporcionalan velikoj masi zamajca, njegovoj značajnoj veličini i brzini obrtanja.

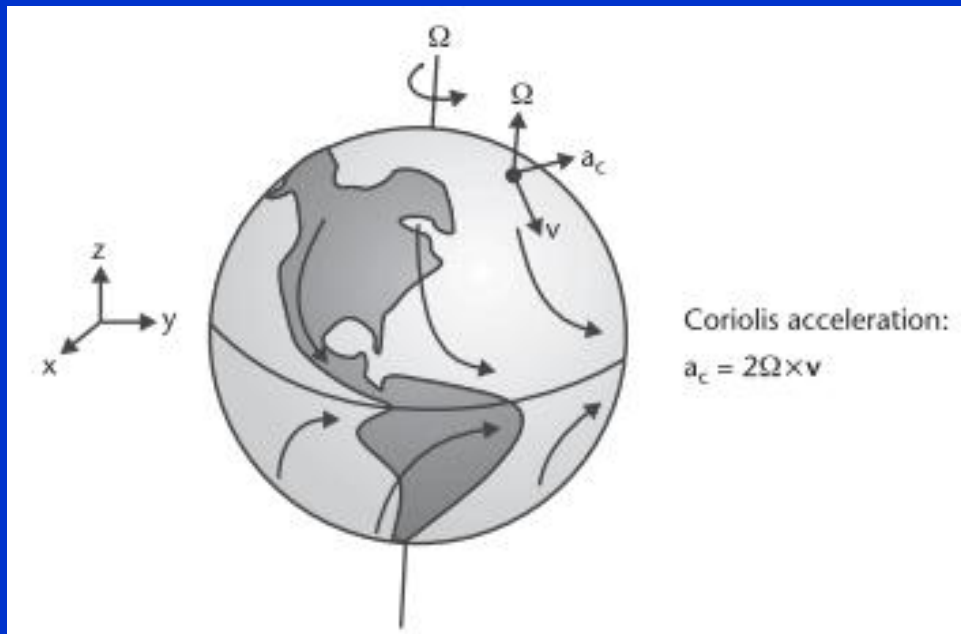
Ova činjenica sama po sebi isključuje korišćenje minijaturnih komponenata kao žiroskopa, ali se MEM senzori koriste za detektovanje ugaone rotacije na bazi Coriolis-ovog efekta.

Ilustracija konvencionalnog mehaničkog žiroskopa i tri rotaciona stepena slobode koje može da meri.



Coriolis-ov efekat se manifestuje u brojnim klimatskim fenomenima uključujući uragane i tornada, i direktna je posledica kretanja tela u rotirajućem referentnom okviru.

Da bi se razumeo ovaj efekat, treba zamisliti automobil koji polazi iz Washington-a (48°N) i ide u Los Angeles (34°N). Na početku puta automobil se zapravo kreće ka istoku zbog rotacije Zemlje (rotirajući referentni okvir) brzinom od oko 1120 km/h. Na kraju puta njegova brzina je 1385 km/h. Pošto se auto kreće ka jugu, njegova istočna brzina se mora povećavati od 1120 do 1385 km/h. Suprotno, on će konstatno kliziti i nikad neće dostići destinaciju. Autoput (rotirajuća površina) saopštava istočno ubrzanje da održi vozilo na njegovom kursu. To se ubrzanje naziva *Coriolis-ovim* ubrzanjem. Ono predstavlja ubrzanje koje se mora primeniti da bi se održalo upravljanje tela koje se kreće po rotirajućoj površini.



Ilustracija *Coriolis-ovog* ubrzanja na objekat koji se kreće brzinom v po površini Zemlje sa oba pola ka ekvatoru.

Coriolis-ovo ubrzanje u severnoj hemisferi otklanja objekat na način suprotan kretanju kazaljki na časovniku, a na južnoj hemisferi u pravcu kretanja kazaljki. Vektor Ω predstavlja rotaciju Zemlje.



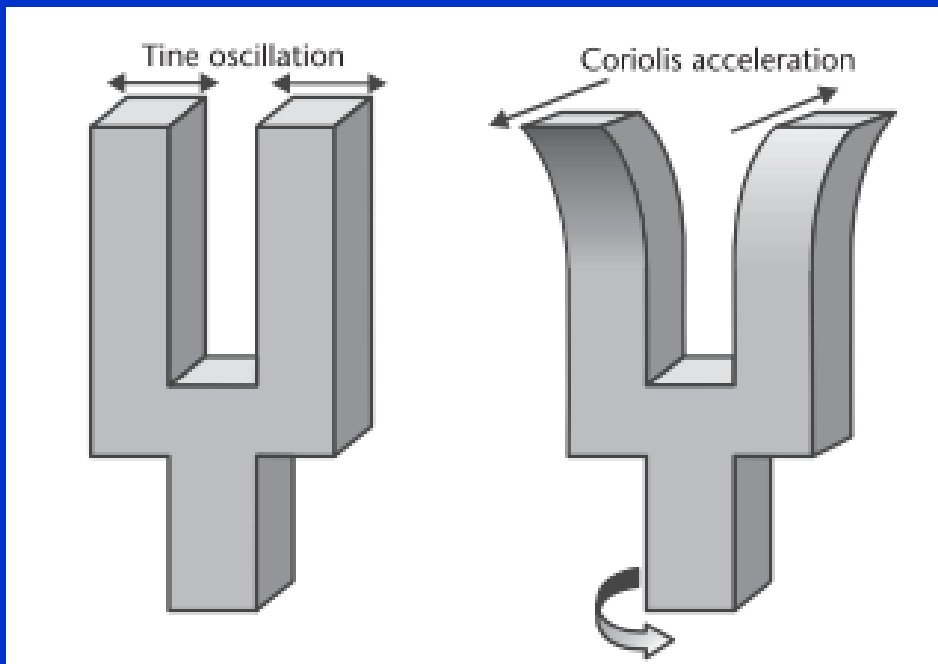
Svi MEM senzori ugaone brzine imaju vibrirajući element na njihovom jezgru (objekat koji se kreće) .

U fiksiranom referentnom ramu odabrana tačka na elementu osciluje brzinom v . Kada referentni okvir počne da rotira brzinom Ω , odabrana tačka biva podvrgnuta *Coriolis-ovoj* sili i ubrzanju $2\Omega \times v$. Vektor ovog ubrzanja ukazuje da su *Coriolis-ovo* ubrzanje i odgovarajući pomeraj odabrane tačke normalni na oscilacije. Ovo dovodi do procesa transfera energije iz primarnog režima oscilacija u sekundarni koji se može meriti.

Za visoko simetrične elemente kao što je prsten, cilindar ili disk javlja se rezonantna frekvencija, što znači da postoje dva rezonantna režima koji dele istu frekvenciju oscilacija. Ova degeneracija dovodi do toga da se signal pobude (primarni režim) razlikuje od signala sensorisanja u četvrtini faze, što ima za posledicu minimizaciju veze između dva režima i poboljšanje osetljivosti i preciznosti.



Jednostavan primer je zvučna viljuška. Njena dva zupca obično vibriraju u suprotnim pravcima u ravni viljuške (fleksibilni režim). *Coriolis-ovo* ubrzanje prisiljava zupce da se pomeraju normalno na primarni režim oscilacije, tako da svaki zubac opisuje eliptičnu putanju. Dakle, rotacija pobudjuje torzioni režim vibracije oko drške sa energijom prenetom sa primarnog režima vibracije. Kvarcna zvučna viljuška koristi piezoelektrične osobine materijala za pobudjivanje i sensorisanje oba režima vibracija.



Druge strukture senzora ugaone brzine uključuju rezonantne trake (beams), vibrirajuće prstenove, lance, cilindre, itd.

Ilustracija strukture zvučne viljuške. Coriolis-ov efekat prevodi energiju iz primarnog (fleksibilnog) režima u sekundarni (torzioni) režim.



Glavne karakteristike senzora ugaone brzine i jedinice kojima se izražavaju su:

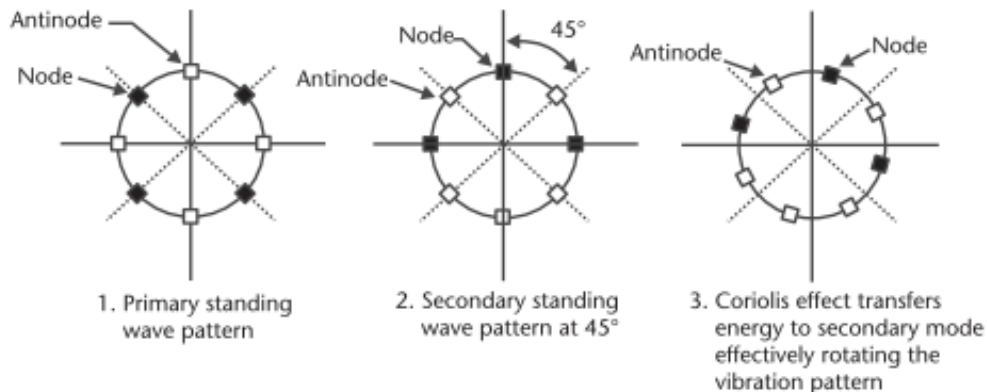
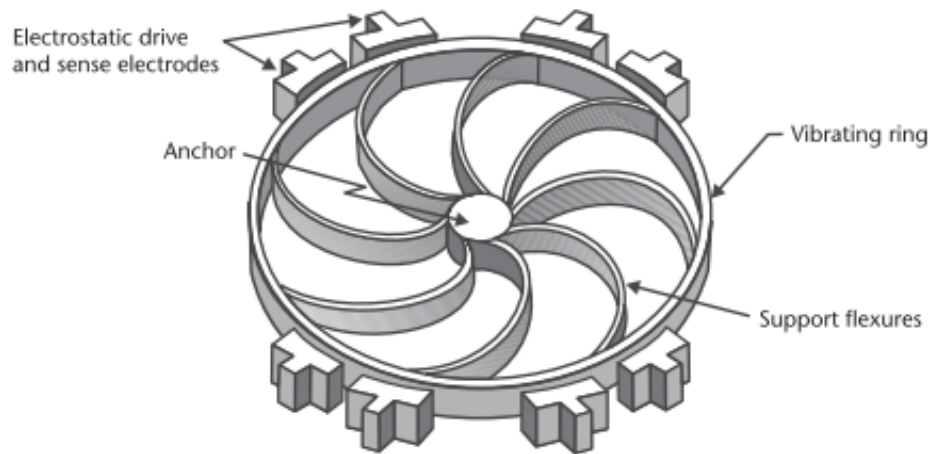
- opseg merenja, $^{\circ}/s$ ili $^{\circ}/h$;
- osetljivost, $V/(^{\circ}/s)$;
- šum, $^{\circ}/(s\sqrt{Hz})$;
- propusni frekventni opseg, Hz;
- rezolucija, $^{\circ}/s$;
- dinamički opseg, dB;
- kratkotrajni i dugotrajni drift izlaza (drift polarizacije), $^{\circ}/s$.

Senzori ugaone brzine se koriste u automobilskoj industriji u sistemima za stabilnost vozila. Detektuju neželjeno krivudanje vozila usled loših uslova na putu i informaciju prenose kontrolnom sistemu koji može aktivirati ABS (Antilock Braking System) ili TCS (Traction Control System).



Senzor ugaone brzine firme Delco Electronics

Ovaj senzor na jezgru ima vibrirajući prsten a rad zasniva na principu vinske čaše koja zvoni. Princip je 1890. god. otkrio Bryan zapazivši da stojeći talas vinske čaše ne ostaje stacionaran u inercijalnom prostoru, ali učestvuje u kretanju kada čaša rotira oko svoje drške.



Ilustracija senzora ugaone brzine firme Delco i odgovarajućih šema stojećih talasa. Struktura se sastoji od prstena koga drže savijene trake. 32 elektrode koje se nalaze oko prstena (nisu sve prikazane) eksituju primarni režim koristeći elektrostatičku aktuaciju. Sekundarni set elektroda kapacitivno senzoriše režime vibracija.



Kompletna teorija senzora ugaone brzine sa vibrirajućim prstenom je dobro poznata. Prsten koji je u centru povezan sa supstratom kada vibrira deformiše se u sledećem ciklusu: iz kruga prelazi u elipsu, pa opet u krug, onda u elipsu koja je pod pravim uglom u odnosu na prvu elipsu i na kraju ponovo u krug. Tačke na prstenu koje ostaju stacionarne zovu se čvorovi, dok se tačke koje imaju maksimalno skretanje zovu antičvorovi.

Čvorovi i antičvorovi formiraju šemu stojećeg talasa oko prstena, što je karakteristika rezonantnog režima. Usled simetrije, prsten poseduje dva rezonantna režima sa šemama vibracija koje su pomerene za ugao od 45° . Zbog toga se čvorovi prvog režima poklapaju sa antičvorovima drugog režima.

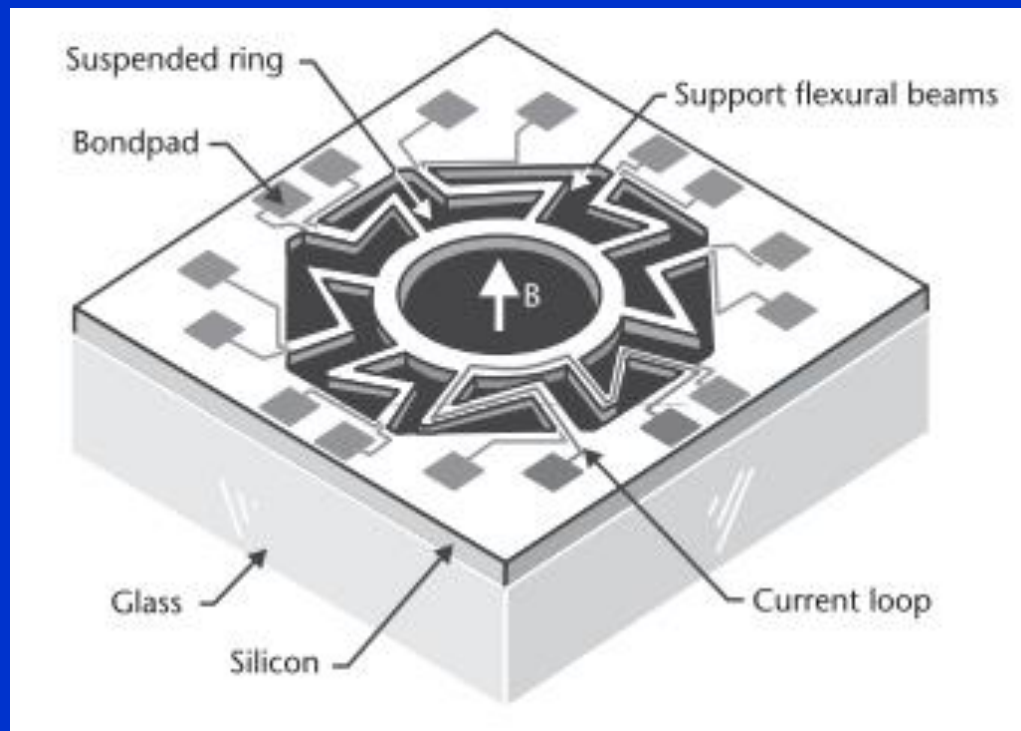
Spoljna kontrolna elektronika pobudjuje samo jedan od dva režima (primarni), ali pod rotacijom, Coriolis-ov efekat eksituje sekundarni rezonantni režim kada se dešava prenos energije izmedju dva režima. Ukupna vibracija postaje linearna kombinacija dva režima, sa novim setom čvorova i antičvorova koji formiraju vibracionu šemu rotiranu u odnosu na šemu primarnog režima.

U konfiguraciji otvorene petlje amplituda skretanja na antičvorovima je mera ugaone brzine rotacije. U konfiguraciji zatvorene petlje elektrostatička akcija povratnim naponom primenjenim na elektrode nuluje sekundarni režim i vibracionu šemu održava stacionarnom. Ugaona brzina je direktno proporcionalna naponu povratne sprege.



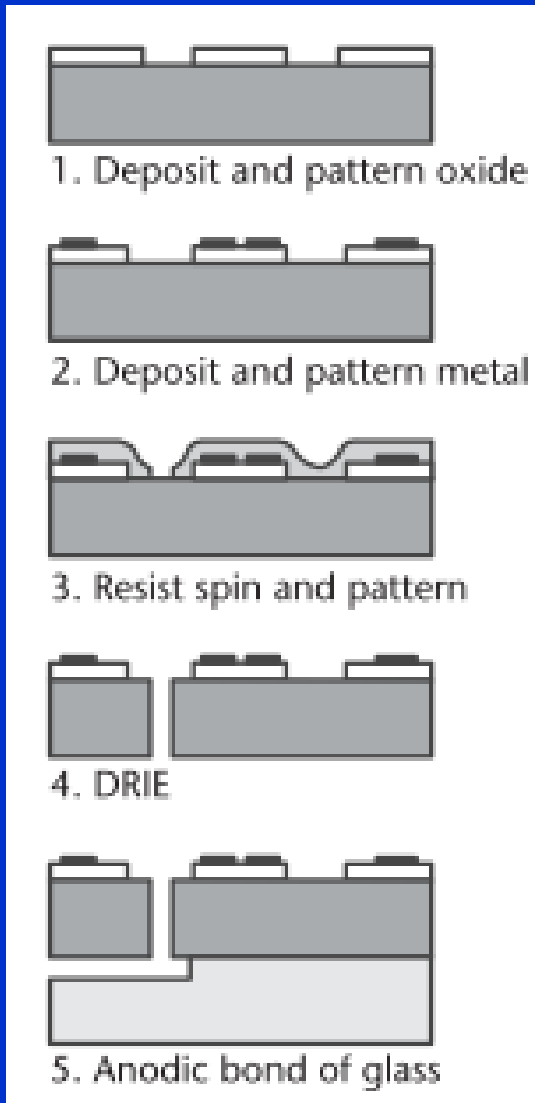
Senzor ugaone brzine firme British Aerospace Systems and Equipment

Ovaj senzor koristi vibrirajući prsten kao i senzor firme Delco, ali se razlikuje u metodama eksitacije i sensorisanja. Strujne petlje u magnetnom polju umesto elektrostatičkih elektroda eksituju primarni režim oscilovanja. Ove iste petlje omogućavaju signal sensorisanja za detekciju ugaone pozicije šeme vibriranja.



Prsten visi pomoću 8 savitljivih traka zakačenih za četvrtasti ram. Svaka od 8 ekvivalentnih strujnih petlji prostire se preko dve susedne trake. Elektromagnetna interakcija između struje u petlji i magnetnog polja indukuje Lorentz-ovu silu. Njena radialna komponenta je odgovorna za oscilaciju prstena u ravni čipa pri frekvenci od 14.5 kHz (mehanička rezonantna frekvencija prstena).

Mehanizam sensorisanja meri napon indukovano oko jedne ili više petlji shodno Faraday-evom zakonu. Dve dijametralno suprotne petlje ostvaruju merenje diferencijalnog napona koji zavisi od oscilovanja prstena, a samim tim od ugaone brzine rotacije.



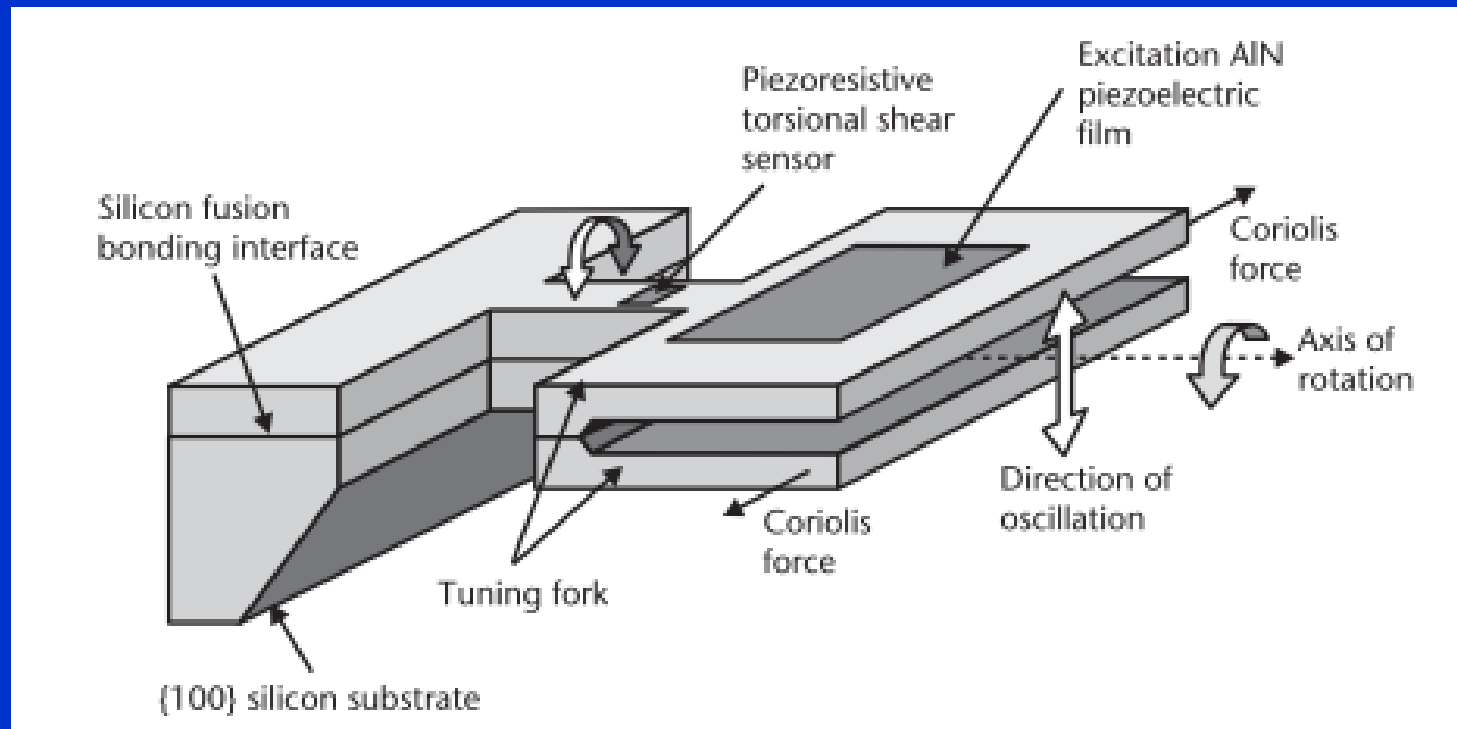
Proizvodnja senzora je relativno jednostavna.
Sastoji se iz sledećih koraka:

1. Depozicije Si-dioksida na Si pločicu koju prate procesi litografije i nagrivanja. Oksid je u funkciji izolacije strujnih petlji.
2. Spaterovanja metalizacije. Procesima litografije i nagrivanja definišu se strujne petlje i stopice za bondiranje.
3. Nanošenja fotorezista spin-on tehnikom i definisanja oblika prstena i traka. Fotorezist služi kao maska u narednom koraku.
4. Dubokog nagrivanja reaktivnim jonima (DRIE) da se formiraju kanali kroz pločicu.
5. Skidanja fotorezista i anodnog bondiranja stakla.



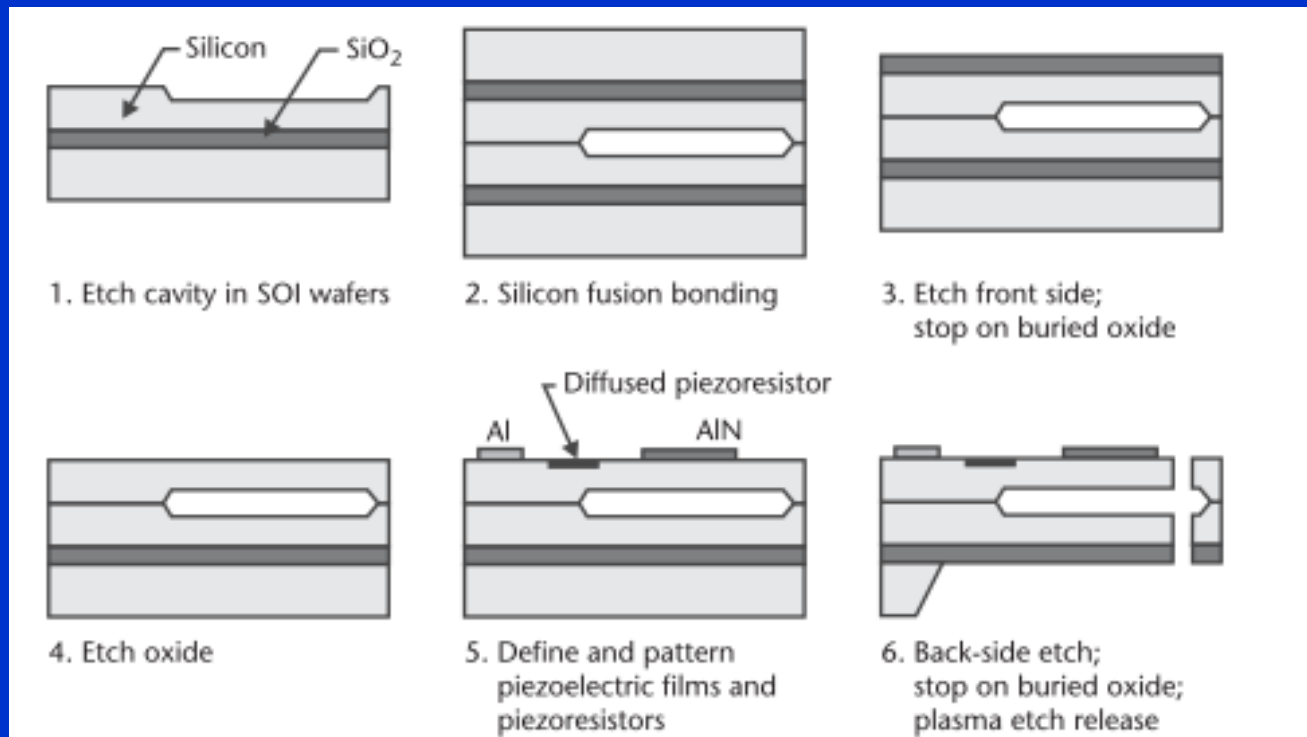
Senzor ugaone brzine firme Daimler Benz

Ovaj senzor predstavlja striktnu implementaciju zvučne viljuške korišćenjem mikromašinskih tehnologija. Zupci Si zvučne viljuške vibriraju izvan ravni čipa, pobudjeni piezoelektričnim aktuatorom od Al-nitrida koji se nalazi na vrhu jednog zupca. Coriolis-ove sile na zupcima proizvode obrtni moment oko drške viljuške, uspostavljajući raspodeljen stres koji se može sensorisati piezootpornim elementima.





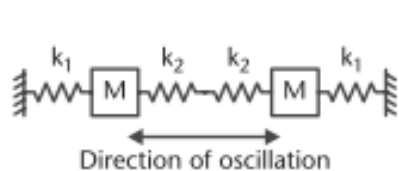
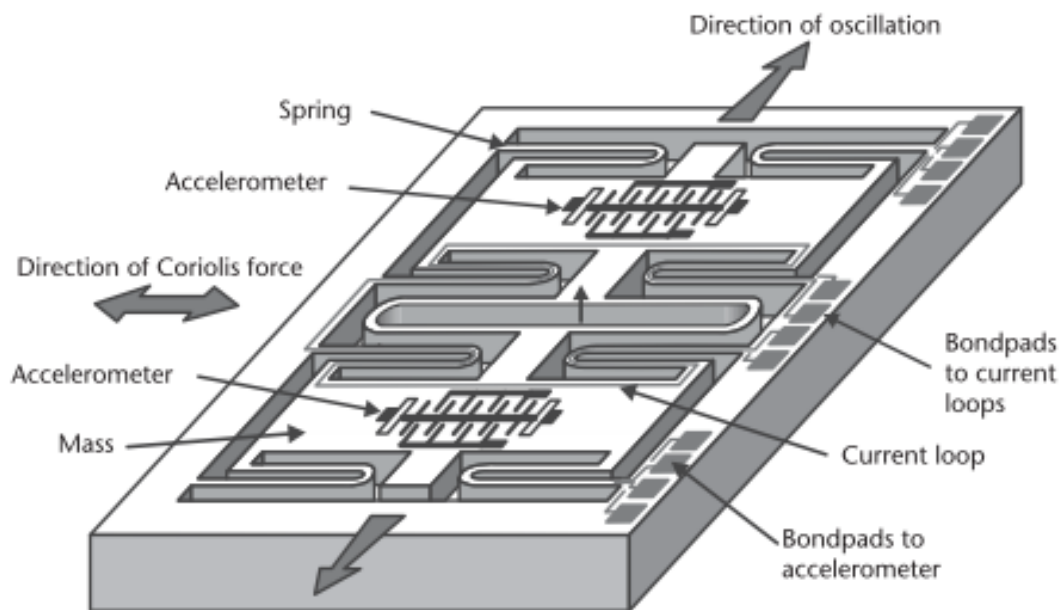
U proizvodnji ovih senzora koristi se SOI (Silicon-on-Insulator) tehnologija. Kristalni Si preko Si-dioksida definiše zupce. Na dvema identičnim SOI pločicama, nakon litografije vrši se plitko nagrizanje Si u tetra-metil-amonijum hidroksidu (TMAH). Procesom fuzionog bondiranja Si pločica formira se šupljina. Nagrizanjem u TMAH sredstvu uklanja se Si sa gornje strane, a zatim se u HF kiselini nagriza Si-dioksid. U sledećim koracima na površini Si definišu se piezoelektrični i piezootporni elementi. Piezootpornici se formiraju procesima jonske implantacije i difuzije. Piezoelektrični AlN se deponuje procesom spaterovanja Al u atmosferi azota i argona. Zatim se spateruje Al i nagriza da bi se formirale električne linije i stopice za bondiranje. Sledi nagrizanje Si sa donje strane. Na kraju se vrši plazma nagrizanje da bi se oslobodili zupci.





Senzor ugaone brzine firme Robert Bosch

Ovaj senzor je jedinstven u implementaciji mehaničke rezonantne strukture ekvivalentne zvučnoj viljuški. Oscilatorni sistem se sastoji od dve identične mase medjusobno spojene oprugom i obešene o spoljašnji ram pomoću druge dve opruge. Sistem ima dve rezonantne frekvence: u fazi i izvan faze. U režimu oscilacija u fazi trenutni pomeraji obeju masa su identični. U režimu izvan faze mase se u svakom trenutku kreću u suprotnim smerovima.



$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1 + k_2}{M}} \quad (\text{Out of phase})$$

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1}{M}} \quad (\text{In phase})$$

Lorenz-ove sile generisane strujnom petljom u polju stalnog magneta eksituju samo režim izvan faze. Oscilacija elektromagnetno indukuje napon u drugoj strujnoj petlji, što omogućava pojavu signala povratne sprege proporcionalnog brzini masa. Rezultujuće Coriolis-ove sile na dvema masama su suprotnih smerova, ali normalne na pravac oscilacija.

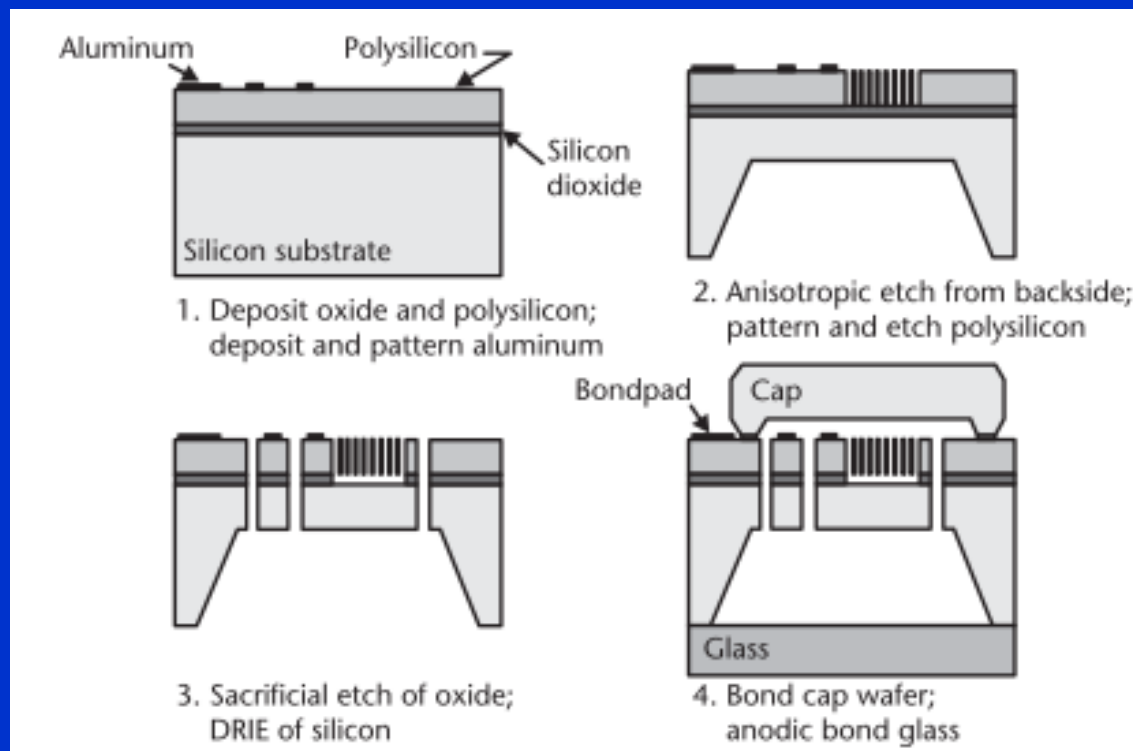
Dva poli-Si akcelerometra u tehnologiji površinskog mikromašinstva mere Coriolis-ovo ubrzanje svake mase. Razlika dva ubrzanja je direktna mera ugaone brzine, dok je njihov zbir proporcionalan linearnom ubrzanju duž ose akcelerometra.

U proizvodnji ovih senzora koristi se tehnologija zapreminskog mikromašinstva za definisanje masa i tehnologija površinskog mikromašinstva za formiranje akcelometara. Fabrikacija započinje depozicijom Si-dioksida na Si-supstratu. Epitaksijom preko oksida narasta sloj jako dopiranog poli-Si. Ovaj sloj formira bazu za senzore u tehnologiji površinskog mikromašinstva. U sledećem koraku spateruje se Al i oblikuje u metalne linije i stopice za bondiranje.

Nagrizanjem u KOH sa donje strane tanji se centralni deo pločice. Dva sekvencijalna DRIE nagrizanja definišu strukturne elemente akcelometara i oscilujuće mase.

Sledeći korak uključuje nagrizanje pomoćnog sloja Si-dioksida da bi se oslobodile poli-Si strukture.

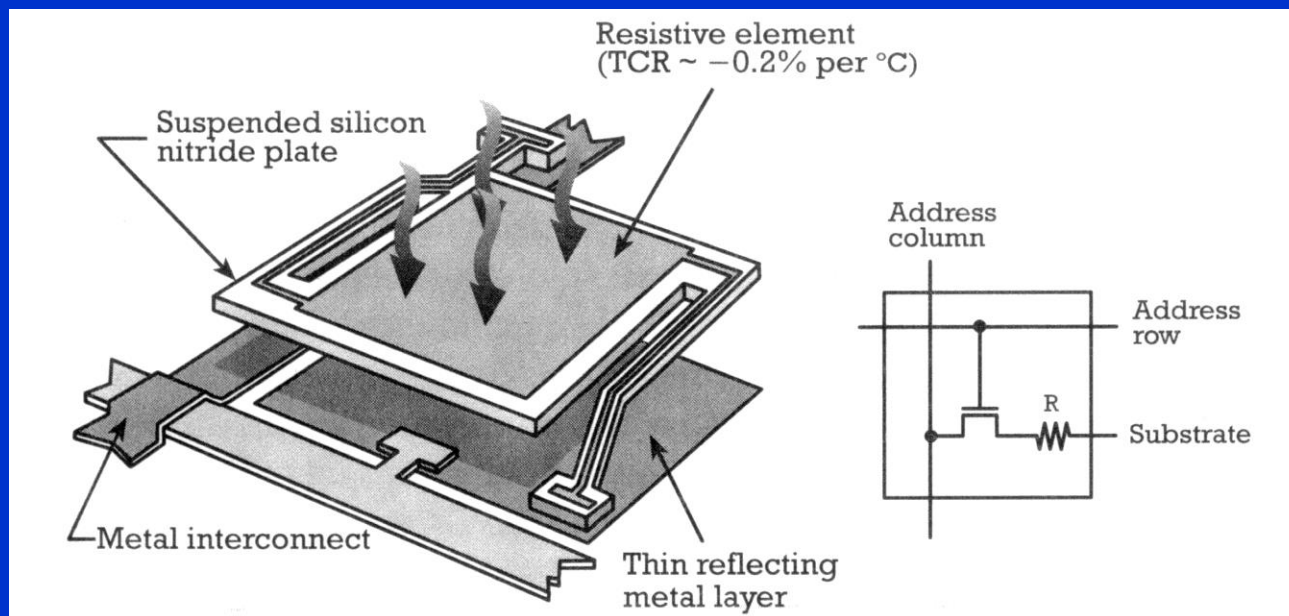
Na kraju, procesom zatapanja stakla sa gornje strane stavlja se Si kapa, a procesom anodnog bondiranja sa donje strane komponenta se zatvara staklom.





Senzori IR zračenja

Demonstracija MEM senzora infracrvenog zračenja postoji duži niz godina. Dvodimenzionalni niz ćelija za infracrveno snimanje proizvođača Honeywell, izdvaja se od ostalih jer uključuje hlađenje kamere.



Senzori postižu visoku osjetljivost na zračenje jer je obezbedjena ekstremna termička izolacija teperaturno osjetljivog otpornog elementa. Upadno infracrveno zračenje zagreva viseći (suspendovani) osjetljivi otpornik, izazivajući promenu njegove otpronosti koja je direktno proporcionalna intezitetu zračenja.



Dvoslojna struktura, sastavljena od gornje silicijum–nitridne ploče i supstrata, obezbedjuje visok stepen termičke izolacije koja odgovara termičkoj konduktansi od oko 10^{-8} W/K. Ova vrednost se približava teoretskoj granici od 10^{-9} W/K, zbog gubitka toplote radijacijom.

Kvadratna silicijum–nitridna ploča je dimenzija $50\mu\text{m}$ $50\mu\text{m}$ i debljine $0.5\mu\text{m}$. Tanki ($50\text{--}100$ nm) otporni element ima visoki temperaturni koeficijent otpornosti (u opsegu od -0.2 do -0.3 $\%/^{\circ}\text{C}$). Procep između suspendovane ploče i supstrata je približno $1.8\mu\text{m}$.

Silicijum–nitridna ploča i tanki reflektujući metal ispod nje formiraju četvrtinu talasne rezonantne šupljine da bi apsorpcija infracrvenog zračenja talasnih dužina oko 10 μm bila maksimalna, što odgovara piku radijacije crnog tela na 20°C . Dvodimenzionalni niz piksela snima aktivnost na sobnoj temperaturi, ali je koristan i za noćno posmatranje.



Proizvodnja ovih senzora zasniva se na površinskom mikromašinstvu, s tim što se kao pomoćni sloj koristi organski materijal – poliamid. Proizvodnja piksela sledi posle proizvodnje standardnih CMOS elektronskih kola na Si supstratu. Integrisana elektronika omogućuje operacije multipleksiranja, skeniranja i očitavanja. Poslednji korak u CMOS procesiranju obezbeđuje planarnu površinu, a postiže se hemomehaničkim poliranjem (CMP) silicijum-dioksidnog pasivizirajućeg sloja.

Stvaranje osetljivih piksela započinje depozicijom i pateringom donjih metalnih filmova dvoslojne strukture. U sledećem koraku se nanosi pomoćni sloj debljine 1.8 μm . Obično se koristi organski poliamidni film ili fotorezist koji može izdržati naredne termičke cikluse. Standardnim litografskim postupkom i procesom nagrivanja definišu se otvori u pomoćnom sloju za kontakte osnovnog metala. Kontakti služe i kao tačke pričvršćenja suspendovane ploče. Silicijum-nitridni sloj debljine 0.5 μm nanosi se pri niskoj temperaturi i standarnim litografskim postupkom oblikuje u vidu suspendovane ploče. Sledeći korak depozicije je kritičan zato što se njime definiše tanki temperaturno osetljivi otpornik. Dve familije materijala imaju pogodne osobine za izradu osetljivih otpornika:

- oksidi vanadijuma (VO_2 , V_2O_3 i V_2O_5) i
- složeni oksidi lantan-mangana ($\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$; A=Ca, Sr, Ba ili Pb).



Vanadijumski oksidi imaju pogodnu slojnu otpornost ($\sim 25 \text{ k}\Omega$ po kvadratu na $25 \text{ }^\circ\text{C}$), prihvatljivi $1/f$ šum, visoku apsorpciju infracrvenog zračenja i veliki temperaturni koeficijent otpornosti (TCR) $\sim -0.2 \text{ \% / }^\circ\text{C}$. Oksidi lantan–mangana imaju još veći TCR od $-0.3\% / ^\circ\text{C}$ sa niskim $1/f$ šumom. Kombinacija niskog šuma i visokog TCR su kritični za povećanje osetljivosti.

Posle depozicije i oblikovanja otpornog elementa, nanosi se drugi silicijum-nitridni sloj za enkapsulaciju osetljivih komponenata. Plazma ecovanjem uklanja se pomoćni sloj i time oslobađa silicijum-nitridna ploča. Plazma kiseonika je efikasna za izotropno uklanjanje organskih materijala, uključujući poliamid i fotorezist. Konačno se Si-pločice seku, a čipovi pakuju pod vakuumom ($<10 \text{ Pa}$) da bi se smanjio gubitak toplote provođenjem.

Elektronika za očitavanje primenjuje konstantan naponski impuls na svaki piksel sekvencijalno i meri odgovarajuću struju. Procenjena promena temperature za snagu upadnog zračenja od 10^{-8} W je samo $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$. Termičku kapacitivnost piksela od 10^{-9} J/K određuje veoma mala termička masa suspendovane ploče. Zbog toga je termičko vreme odziva, definisano odnosom termičke kapacitivnosti i termičke konduktanse, manje od 10 ms . Odnos signal-šum (termički i $1/f$ šum) iznosi oko 49 dB . Za kalibraciju senzora se koriste specijalna elektronska kola koja omogućavaju da se od signala aktivne slike oduzme signal blanko scene.



Senzor ugljen-monoksida

Mnogi gasni senzori rade na principu promene otpornost oksida metala usled adsorpcije molekula gasa na površini elementa. Adsorbovani molekuli gasa reaguju sa površinom na taj način što zahvataju (trapuju) jedan ili više provodnih elektrona čime efikasno smanjuju površinsku provodnost materijala. Otpornost je inverzno proporcionalna koncentraciji gasa.

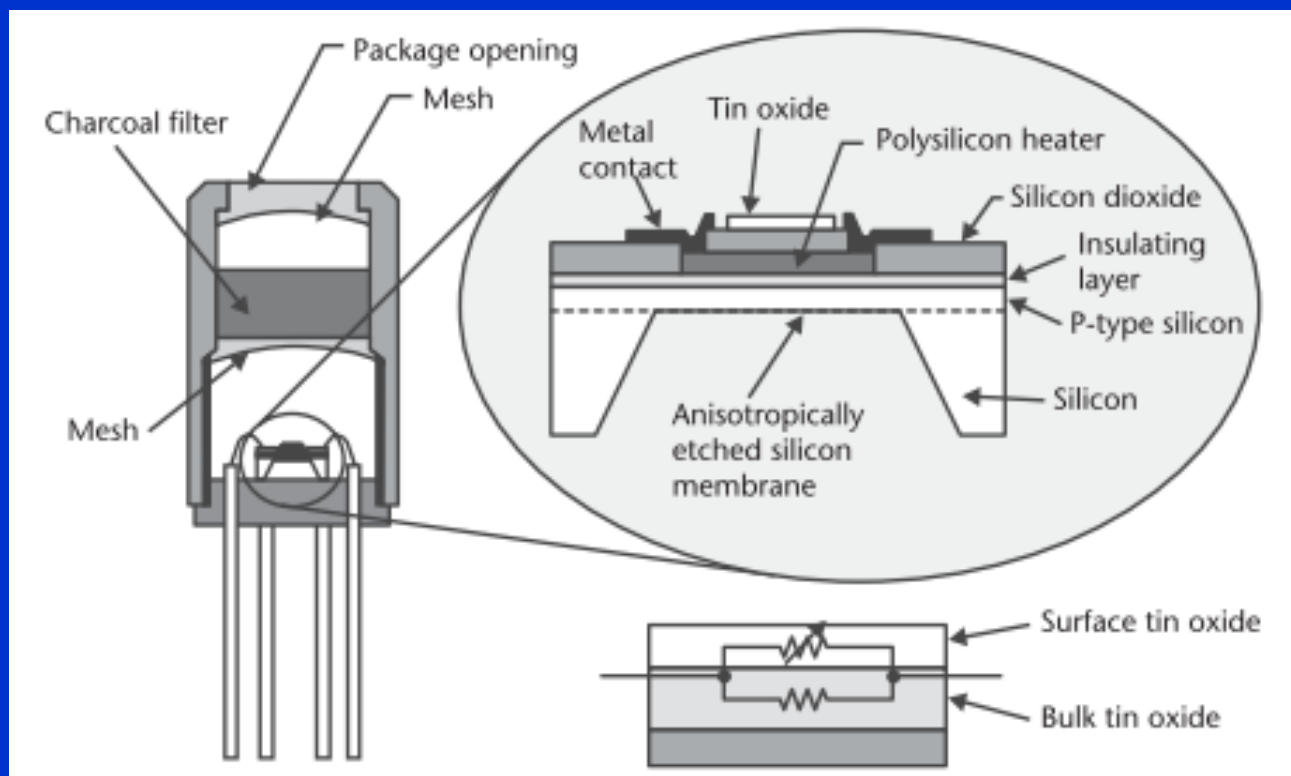
U klasu senzorskih materijala spadaju oksidi kalaja (SnO_2), titana (TiO_2), indijuma (In_2O_3), cinka (ZnO), volframa (WO_3) i gvoždja (Fe_2O_3). Svaki oksid metala je osetljiv na različite gasove. Na primer, oksid kalaja je efikasan u detekciji alkohola, vodonika, kiseonika, vodonik-sulfida i ugljen-monoksida. Nasuprot ovome, oksid indijuma je osetljiv na ozon (O_3), a cink-oksidi na halogenzirane ugljovodonike.

Vlaga negativno utiče na senzorske karakteristike, zato se mora kontrolisati sve vreme.



Motorolin senzor ugljen-monoksida MGS1100 sadrži osetljivi otpornik od kalaj-oksida koji se nalazi preko policicijumskog grejača. Uloga grejača je da održava senzor na radnoj temperaturi između 100 i 450 °C, čime se redukuje štetni razblažujući efekat vlage. Sensorni otpornik i grejač su razdvojeni tankom silicijumskom membranom, koja minimizuje gubitak toplote kroz supstrat.

Postoji ukupno četiri električna kontakta: dva povezuju senzorski otpornik, a druga dva polisilicijumski grejač. Najjednostavniji metod merenja otpornosti ostvaruje se protokom konstantne struje kroz senzorski element i merenjem izlaznog napona.





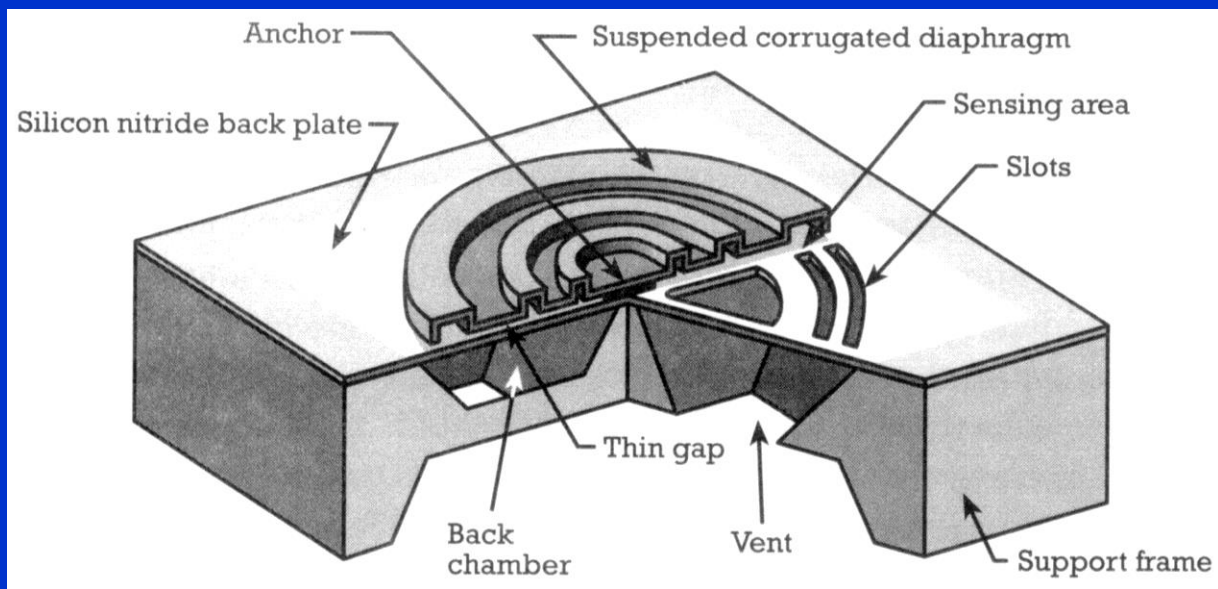
Proces proizvodnje počinje formiranjem sloja jakodopiranog silicijuma p-tipa, debljine 2 μm epitaksijom ili jonskom implantacijom. Zatim sledi depozicija sloja silicijum-nitrida. CVD postupakom formira se polisilicijumski film koji se nagriza u obliku grejača. Polisilicijumski film se dopira tokom CVD procesa ili posle depozicije procesom jonske implantacije. Nakon toga obavlja se depozicija oksidnog sloja i u njemu ecovanjem formiraju otvori za kontakte. Namena ovog sloja je da električno izoluje polisilicijumski grejač od senzorskog elementa (kalaj-oksida). Spaterovanjem kalaja i oksidacijom na oko 400 °C dobija se sloj kalaj-oksida. Standarnom litografijom i nagrivanjem ovog sloja oblikuje se senzorski element. Spaterovanjem aluminijuma formira se metalizacija kontakata. Konačno, ecovanjem Si pločice sa zadnje strane u kalijum hidroksidu ili ethylenediamine pyrocatechol-u (EDP) formira se tanka membrana. Pri tome su neophodni maskirajući slojevi (npr. od silicijum-nitrida) sa obe strane supstrata.

Rad senzora se sastoji u dovođenju napona na grejač od 5 V u trajanju od 5 s i snižavanjem napona na 1 V u trajanju od 10 s. Tokom prvog intervala temperatura je 400 °C, a u drugom opada na 80 °C. Otpornost se uvek meri istim korakom tokom trajanja periode, u ovom slučaju na 9.5 s unutar drugog intervala. MGS1100 registruje koncentracije ugljen-monoksida u intervalu 1 do 4000 ppm za opeg vlage od 20 – 80 %. Izlazni signal je proporcionalan kvadratnom korenu koncentracije CO.



MEM mikrofon

Korišćenje MEM mikrofona u aplikacijama niskih cena, kakvi su mobilni telefoni, ugrožava egzistenciju konvencionalnih mikrofona. Ovde će biti opisan MEMS mikrofon koji se koristi u industriji slušnih aparata. Njega odlikuju male dimenzije, što je jako važno za ovu primenu.



MEM kapacitivni mikrofon meri ekstremno male fluktuacije pritiska (manje od 0.1 Pa ili 10⁻⁶ atm.) koji se javljaju kao posledica prenosa akustične energije kroz vazduh. Njegovu osnovnu strukturu čini membrana koja visi preko donje ploče. Membrana i donja ploča obrazuju kondenzator. Rupe kroz donju ploču i potporni supstrat obezbeđuju propusni put za akustičnu energiju, sprečavajući pojavu statičkog pritiska na dvema stranama membrane. U suprotnom, promene atmosferskog pritiska bile bi dovoljne da preopterete izlaz senzora.

U toku rada membrana vibrira usled akustičnih talasa. Promena kapacitivnosti između membrane i donje pločice direktno je proporcionalna nivou akustičnog pritiska. Zadnja komora (ispod donje ploče) formira Helmholtz-ov rezonator koji definiše akustičnu impedansu i ukupni frekventni odziv senzora.



Osetljivost, frekventni odziv i ulazni šum su tehničke karakteristike koje odražavaju performanse kondenzatorskog mikrofona.

Tipični kondenzatorski mikrofoni imaju osetljivost između 5 i 30 mV/Pa i frekventni odziv od 10 Hz do 30 kHz. Osetljivost opada na visokim frekvencijama zbog strujanja vazduha kroz uski procep između membrane i donje ploče. Ako je V_b napon na kondenzatoru, s rastojanje između membrane i donje pločice i p akustični pritisak, onda je osetljivost $(V_b/s)(ds/dp)$.

Naelektrisanje stalno nagomilano u konvencionalnom elektretnom kondenzatorskom mikrofoni obezbeđuje ekvivalentni napon od nekoliko stotina volti, što je mnogo više nego 10 do 20 V, tipično dostupnih kod MEM mikrofona.

Postoje dva izvora šuma: mehanički i elektronski. Mehanički šum je termičke prirode i potiče od Braunovog kretanja materijala membrane. Njegov ekvivalentni pritisak jednak je $(kTc)^{1/2}$, gde je k - Bolacmanova konstanta, T - temperatura i c - akustična impedansa mikrofona. Akustična impedansa raste sa smanjenjem zapremine zadnje komore. Ova činjenica ne favorizuje MEM mikrofoni za niskošumne aplikacije. Termički šum koji odgovara zapremini zadnje komore od 1 mm³ je aproksimativno 30 dB SPL (Sound Power Level – nivo jačine zvuka), što je ekvivalentno šapatu.



Proizvodnja mikrofona započinje integracijom elektronska kola korišćenjem standardne niskonaponske CMOS tehnologije.

Posle toga sledi depozicija $1.1 \mu\text{m}$ tankog silicijum–nitrida kombinovanjem PECVD i LPCVD procesa i perforacija sloja (formiranje rupica postupcima standardne litografije i nagrivanja). Zatim se spateruje i oblikuje tanak sloj hroma koji će služiti kao prva elektroda konenzatora. Ovim se završava proizvodnja donje ploče.

U sledećim koracima formiraju se pomoćni slojevi i valovita membrana. Prvi pomoćni sloj je od aluminijuma debljine $3 \mu\text{m}$ koji posle depozicije i nagrivanja dobija oblik talasastog reljefa. Drugi aluminijumski sloj debljine $1 \mu\text{m}$ služi kao pomoćni sloj koji definiše rastojanje tankog procepa i povećava debljinu ispod udubljenja do $4 \mu\text{m}$. Procesom PECVD silicijum-nitrida, kao i postupcima litografije i nagrivanja, definiše se talasasta membrana. Dizajn membrane je takav da je u svom centru pričvršćena za supstrat.

Spaterovanjem hroma preko membrane formira se druga elektroda kondenzatora. Ukupna debljina membrane je $0.75 \mu\text{m}$. Konačno, depozicijama titan–volframa (TiW) i zlata (Au) formiraju se električne veze i stopice za bondiranje.

Poslednji korak u proizvodnji obuhvata nagrivanje u kalijum-hidroksidu. Ecovanje se odvija kroz otvore u silicijum-nitridu na zadnjoj strani, kao i sa prednje strane da bi se uklonili pomoćni aluminijumski slojevi i oslobodila donja ploča od silicijum-nitrida.