

MEMS - Mikroelektromehanski sistemi

Polona Antončič, Ana Žavbi, Primož Kržišnik, Matija Verbič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko

Povzetek.

MEMS oziroma mikroelektromehanski sistemi združujejo mehanske elemente, senzorje, aktuatorje in elektroniko. V nadaljevanju bomo opisali materiale in postopke, s katerimi izdelujejo strukture MEMS in najpogostejše aplikacije MEMS ter podrobneje opisali MEMS merilec pospeškov.

Kazalo.

1 Uvod	3
2 Materiali	4
2.1 Silicij	4
2.2 Polimeri	4
2.3 Kovine	5
3 Osnovni procesi	6
3.1 Depozitni proces	6
3.2 Jedkanje	6
3.3 Patterning	6
4 Proizvodne tehnologije	7
4.1 Bulk Micromachining (masovno)	7
4.2 Surface micromachining (površinsko)	7
4.3 DRIE metoda (Deep Reactive-ion etching)	7
4.4 Wafer bonding	8
5 Aplikacije MEMS	9
5.1 Mikrofluidi/bioMEMS	9
5.1.1 Ink Jet	9
5.2 Vztrajnostni senzorji	9
5.2.1 Žiroskop	9
5.2.2 Akcelerometer	10
5.3 Senzor tlaka	10
5.3.1 Silicijev mikrofoni	11
5.4 RF MEMS (radio frequency)	11
5.5 MOEMS (Optical MEMS)	11
6 Merilec pospeška izdelan v MEMS tehnologiji	13
6.1 Nekatere pomembne razlike med akcelerometri	16
6.2 Uporaba akcelerometrov	16
7 Zaključek	17
Literatura	18

1. Uvod

Mikroelektromehanski sistemi združujejo mehanske elemente, senzorje, aktuatorje in elektroniko. Mehanski sistemi so ponavadi zobniki, vzmeti, zrcala ipd. Senzorji v splošnem pretvarjajo mehanske spremembe v električni signal (oz. električne spremembe), aktuatorji pa glede na električni pulz prožijo mehansko gibanje. Elektronika med drugim poskrbi, da se signali iz senzorjev pravilno interpretirajo in ojačajo, prav tako odstranjuje šume. Povprečna velikost MEMS komponent je 50 mikrometrov. MEMS se že več kot 30 let uporabljajo na širokem področju industrije. V tej seminar-ski nalogi so opisani materiali in postopki, najpogostejše aplikacije, posebno poglavje pa opisuje MEMS merilec pospeškov.

2. Materiali

Širše uporabljene materiale za izdelavo MEMS lahko glede na atomsko strukturo razdelimo na kristale(Si), polikristale(Al, Au, polikristalni silicij) in amorfne(SiO₂,steklo. MEMS se odvisno od uporabe izdelujejo iz silicija, polimerov in kovin.

2.1. Silicij

Eden redkih materialov, ki ga lahko tovarniško proizvedemo v enem kristalu. Je polprevodnik (z dodanimi nečistočami). Uporablja se v večini današnjih integriranih vezjih, je lahko dostopen in poceni. Primeren je za elektronsko, mehansko, termično in optično integracijo. Zdrži visoke mehanske obremenitve, saj ob konstantnem gibanju vzdrži milijone ali več ciklov. Silicij lahko obdelujemo z vsemi osnovnimi procesi (razloženi v nadaljevanju).



2.2. Polimeri

Naziv izhaja iz grških besed poly - polys, kar pomeni mnog, in meros, kar pomeni del. Iz teh dveh besed torej sledi naziv polimer. Te snovi pridobivajo na umeten način in v naravi kot take ne obstajajo. Da se jih masovno proizvajati, zato so cenejši in imajo lahko veliko različnih materialnih značilnosti. Uporabljajo se predvsem pri zaznavanju kemičnih plinov, vlažnosti in za fotorezistorje. Prav tako so primerni za aplikacije, kjer so prisotni mikrofluidi. Polimere obdelujemo s procesi: Injection molding (brizganje v kalup), embossing (reliefno), stereolitography.

2.3. Kovine

Kovine se prav tako lahko uporabljajo za izdelavo MEMS. Dokler jih uporabljamo v okviru njihovih omejitev, lahko izkažejo visoko stopnjo zanesljivosti. Aluminij se naprimer uporablja za osnovne električne povezave v nekorozivnem okolju. Prav tako dobro odbija svetlobo. Zlato, titan, tungsten se bolje obnesejo pri visokih temperaturah in manj prijaznih okoljih. Zlato tudi dobro odbija svetlobo v IR spektru. Platina in paladij sta primerna za uporabo v elektrokemiji. Kovine so od vseh materialov najboljše toplotno prevodne. Uporablja se še veliko ostalih kovin, npr.: srebro, baker, krom, iridij, volfram.

3. Osnovni procesi

3.1. Depozitni proces

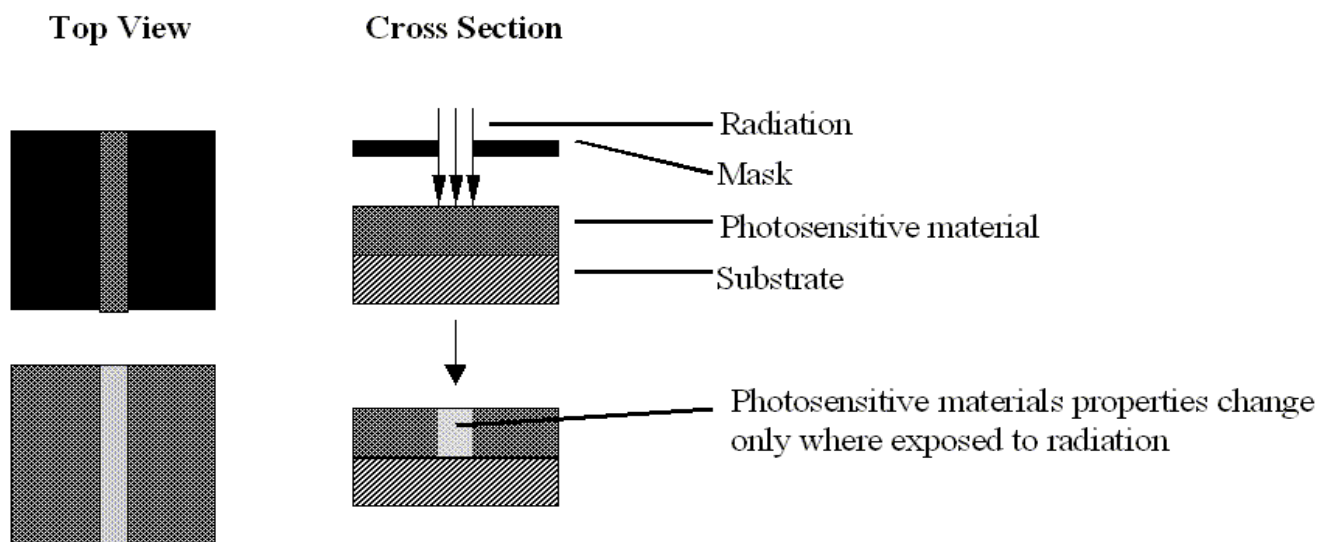
Ta proces je eden glavnih procesov pri gradnji MEMS. Tu združujemo oz. zlagamo tanke sloje materiala, ki smo ga pred tem izdelali s pomočjo jedkanja ali litografije. Poznamo fizično in kemično depozicijo.

3.2. Jedkanje

Poznamo mokro in suho jedkanje. Mokro jedkanje je kemijski postopek s katerim dosežemo odstranitev nezelenega materiala tako, da ga potopimo v raztopino kemikalij, ki topijo ta material. S tem postopkom lahko dosežemo visoko natančnost. Pri suhem jedkanju s plazmo damo substrat v reaktor, kjer je več različnih plinov. Plazma, ki je med plini, razbije molekule plinov na ione, ki nato izbijejo iz substrata atome, kar povzroči jedkanje.

3.3. Patterning

Pri patterningu gre za postopek nanašanja reliefa na material. Litografija je način patterninga. Pri litografiji gre za postopek prenosa vzorca na fotorezistiven material (na sliki spodaj s selektivnim izpostavljanjem nekemu izvoru sevanja (npr. svetlobi). Fotorezistiven material je material kateremu se fizične lastnosti spremenijo pod vplivom sevanja. Lastnosti sevanju odkritega in neodkrita dela materiala se razlikujejo. Zaradi razlik v lastnostih obeh delov lahko enega od delov odstranimo ali pa ga obravnavamo kot masko za substrat ki leži pod njim. Tipično se litografija uporablja na kovinah oz. pri odstranjevanju kakega drugega filma s pomočjo mokrega in suhega jedkanja. Poznamo fotolitografijo, litografijo z obstreljevanjem elektronov ali ionov in pa litografijo z rentgenskimi žarki.



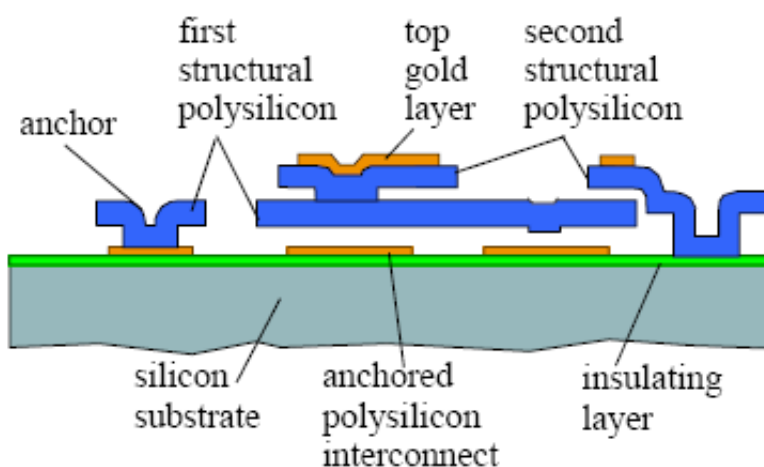
4. Proizvodne tehnologije

4.1. Bulk Micromachining (masovno)

Gre za masovno produkcijo MEMS, saj se za njihovo izdelavo uporablja celoten silicijev vafer. Silicij obdelujemo s pomočjo različnih, že prej naštetih, postopkov jedkanja. Ta postopek je bil ključen za proizvodnjo v 80' in 90'.

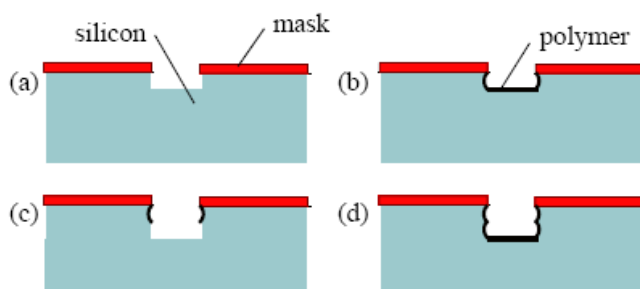
4.2. Surface micromachining (površinsko)

Tu nanese strukturne in začasne sloje na substrat, kar je drugače kot pri prejšnji proizvodni tehnologiji, kjer substrat oblikujemo z eno od osnovnih tehnik. Do končne strukture pridemo s suhim jedkanjem, ki nam oblikuje osnovno obliko oz. strukturo, mokro jedkanje pa odstrani začasne sloje, ki niso več potrebni. Tako lahko oblikujemo kompleksnejše strukture.



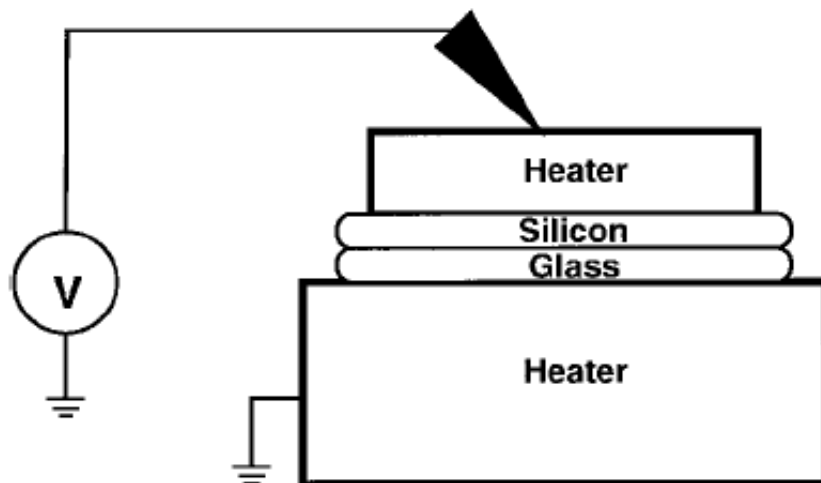
4.3. DRIE metoda (Deep Reactive-ion etching)

S to metodo proizvajajo strukture, ki imajo vertikalne vrzeli z razmerjem 20:1 globine glede na širino. Tako globino dosežemo z večkratnim jedkanjem. Proces traja do 12 sekund.



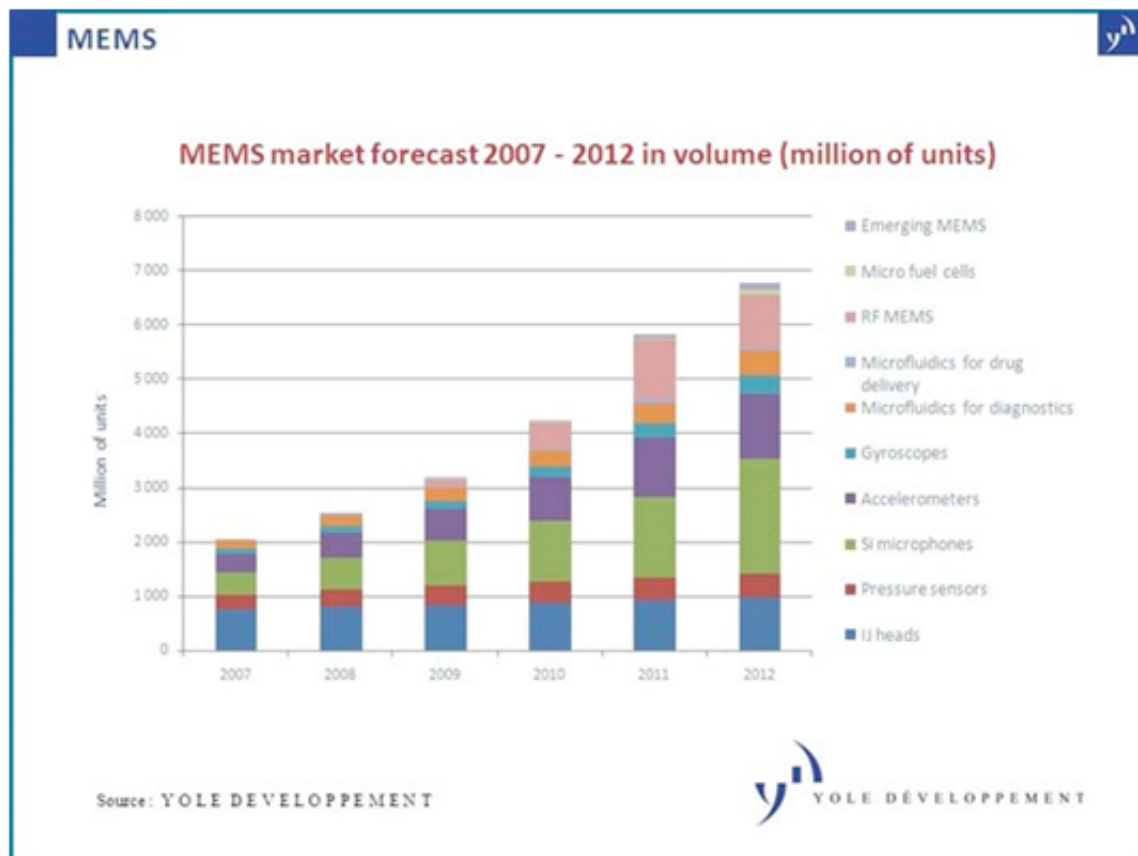
4.4. Wafer bonding

Pri tem postopku gre za združevanje večih rezin. V primeru silicija zadošča že, če ti dve površini samo položimo eno na drugo, saj se vežeta skupaj, ker sta površini popolnoma gladki in je stična ploskev velika. Če rezini nista silicijevi, vez med njima ojačamo z električnim poljem, katerega sila zgladi hrapavost in tako poveča stično ploskev.



5. Aplikacije MEMS

Produkti, ki vsebujejo MEMS tehnologijo se z leti vedno pogosteje pojavljajo na vseh področjih tehnologije.



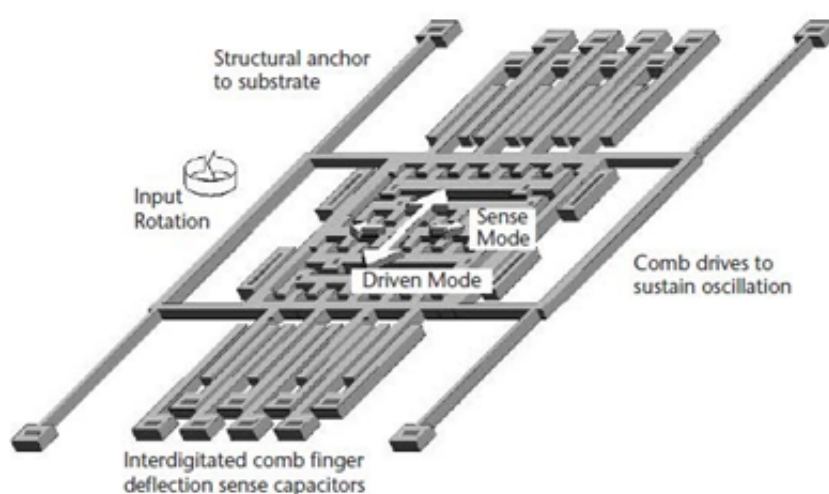
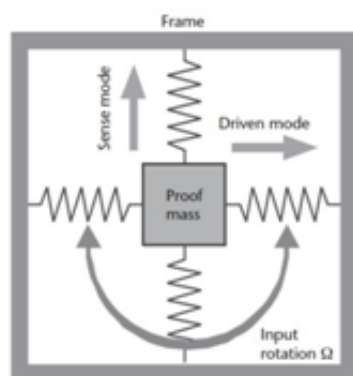
5.1. Mikrofluidi/bioMEMS

Mikrofluidi so se pojavili v 1980 letih, uporabljali so se pri proizvodnji glav za brizgalne tiskalnike (Hewlett Packard). Prav tako pa se hitro razvija trg bioMEMS aplikacij, ki jih uporabljajo za mikroanalizo snovi ali za DNA čipe.

5.1.1. Ink Jet Tiskalniki imajo komore napolnjene s črnilom, ki se nahajajo pred šobami. Za temi komorami pa je postavljen piezo-električni element, ki ob sunku napetosti potisne črnilo skozi šobo.

5.2. Vztrajnostni senzorji

5.2.1. Žiroskop Žiroskop je ključni navigacijski instrument (npr. letala) uporablja se za orientacijo v prostoru, v novejših napravah, nintendo wii se uporablja za zaznavanje rotacije igralnih pripomočkov.

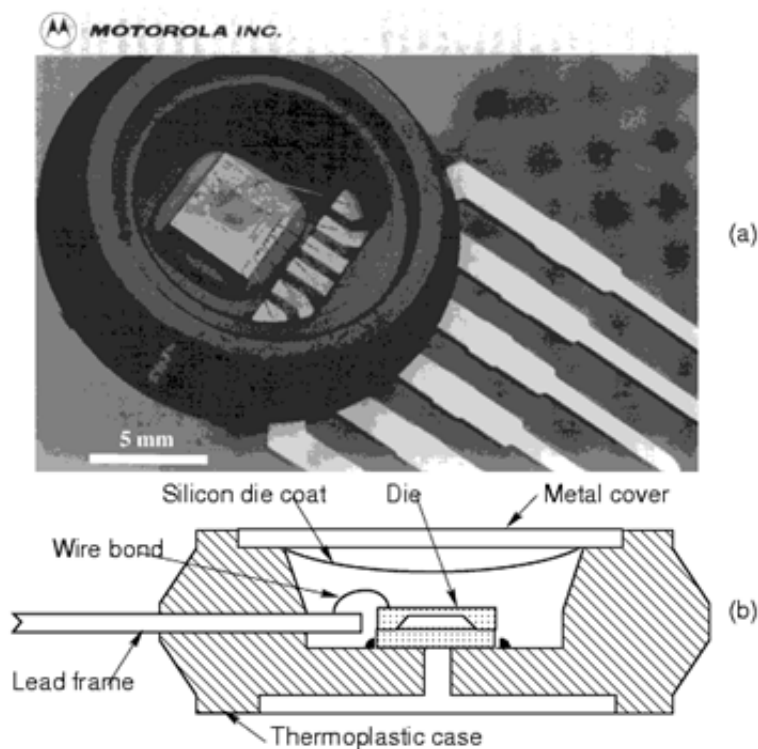


Deluje na podlagi mehničnega elementa (proof mass), ki resonira. V primeru rotacije okvirja ta povzroči oscilacije na istem ali drugem elementu, ki dajo rezultat proporcionalen iskanemu kotu.

5.2.2. Akcelerometer Podrobneje opisan v nadaljevanju.

5.3. Senzor tlaka

Senzorji tlaka imajo zelo širok spekter uporabe (merjenje zračnega tlaka, tlaka v tekočinah), z njihovo mems izvedbo pa se odpirajo še novi načini uporabe. Lahko jih uporabimo za merjenje tlaka v avtomobilskih pnevmatikah ali naprimer za merjenje krvnega pritiska. Senzorski element je prekrit s fleksibilno površino, ki se upogne pod pritiskom. Element nato prtvori ta prisk v električni signal.



5.3.1. Silicijev mikrofon Deluje podobno kot senzor pritiska navadno ima vgrajen še predojačevalnik ter analogno-digitalni pretvornik. Celotna struktura je integrirana na enem čipu.

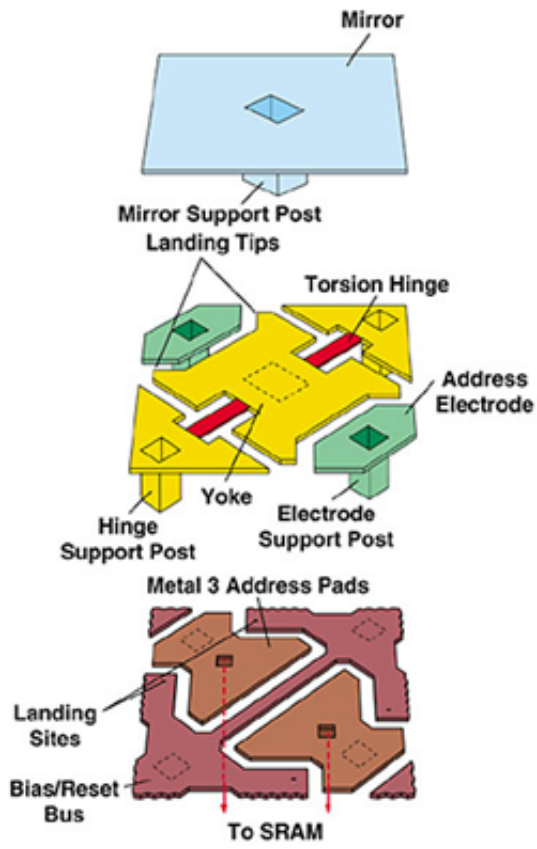
5.4. RF MEMS (radio frequency)

Uporabljamo jih v raznih aplikacijah naprimer RF switch, resonator, RF antene in RF filtri.

5.5. MOEMS (Optical MEMS)

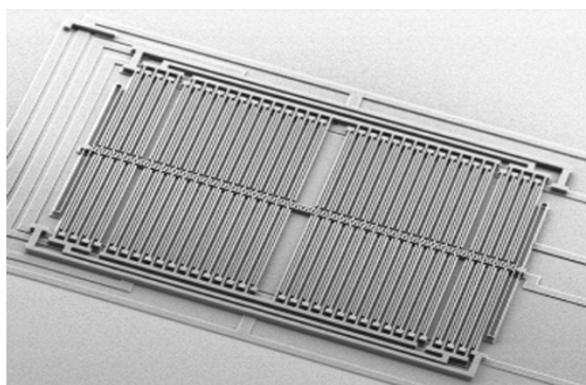
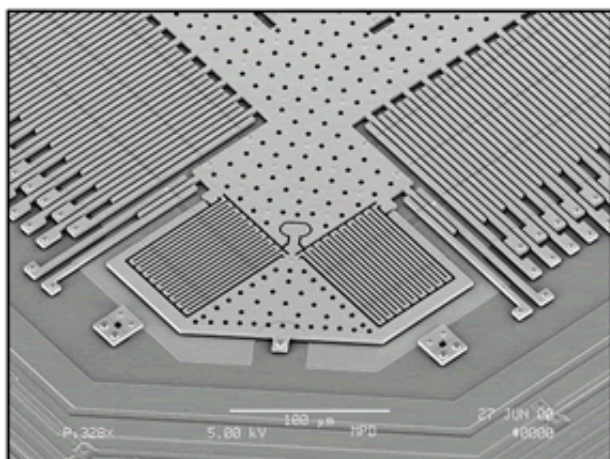
MOEMS služijo manipulaciji in zaznavanju optičnih signalov. Uporabljajo se v širokem spektru naprav optični switch, mikro polja ogledal za projekcijo (DLP), optični čitalec. Polje ogledal si lahko predstavljamo kot bitno sliko, kjer vsako od ogledal predstavlja en piksel. Ogledala so lahko usmerjena proti ali stran od vira svetlobe, glede na to, kakšen procent časa so usmerjena proti viru svetlobe, tako intenziteto/odtenek piksla prikažejo. Daljši čas pomeni večjo, krajši pa manjšo intenziteto piksla.

Ločljivost je odvisna od števila ogledal. Poleg sistema ogledal, čip sestavlja še CMOS DDR SRAM, ki na podlagi shranjene logične vrednosti skrbi za nagib zrcal (premikajo se lahko za max. $10-12^\circ$), heat sink skrbi za to, da optični žarek ne zadane ogledala, vse skupaj je zaščiteno z okencem, ki prepušča svetlobo, obenem pa skrbi za zaščito čipa pred nečistočami.



6. Merilec pospeška izdelan v MEMS tehnologiji

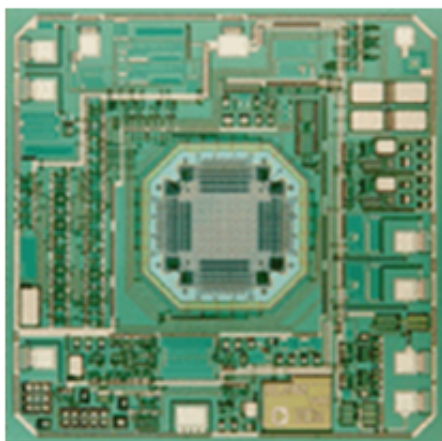
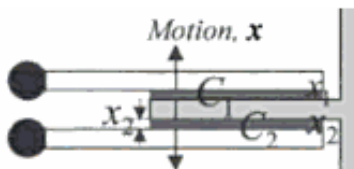
Akcelerometer je merilnik pospeška, ki lahko meri statične (gravitacija) ali dinamične sile (zaviranje). Spada med enostavne MEMS, so zelo splošno uporabni (avtomobili, računalniki, prenosne naprave, zaščita diska, igralni pripomočki). Obstaja več možnosti realizacije akceleratora. Nekateri uporabljajo piezo-električni efekt - vsebujejo mikroskopsko majhne kristalne strukture, ki se ob spremembi pospeška premaknejo, kar povzroči generacijo napetosti. Ti akceleratorji so veliki in nerodni (niso pravi MEMS). Druga od možnosti je zaznavanje sprememb v kapacitivnosti. Akcelerator, ki je deloval na ta princip je bil prvič izdelan leta 1979 na univerzi v Stanfordu, v splošno proizvodnjo pa je prišel v devetdesetih letih.



Kondenzatorji lahko delujejo kot senzorji in kot aktuatorji (sprožilci gibanja ali splošen vpliv). Imajo dobro občutljivost in so neobčutljivi za temperaturne spremembe. Zaznavanje kapacitivnosti je neodvisno od osnovnega materiala in se zanaša na spremembo kapacitivnosti ob fizični spremembi položaja elektrod. Kapacitivnost je odvisna od površine elektrod, od razdaja med njima in od dielektričnosti materiala med njima. Sprememba kateregakoli od teh parametrov se lahko izmeri kot sprememba kapacitivnosti in ravno to je osnova delovanja MEMS akceleratora. Merilci

vlage naprimer merijo samo dielektričnost, merilci pospeška pa merijo razdaljo ali površino in sicer neodvisno od dielektričnosti če je konstantna oz. če je vmes zrak.

Tipični MEMS akcelerator je sestavljen iz statičnega in gibljivega dela, ki je preko vzmeti vpet v ohišje. Premikajoče se in fiksne ploščice predstavljajo kondenzator. Ko se dinamični del premakne, se to odrazi v spremembi kapacitivnosti na stiku z ohišjem. Vsak senzor ima veliko takih kondenzatorjev, ki so vezani paralelno, tako se kapacitivnosti seštejejo, sicer bi bile te majhne razlike v kapacitivnostih praktično nezaznavne.



V splošnem se kapacitivnost med dvema elektrodama izračuna po formuli:

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon \frac{A}{d}$$

Kjer je d razdalja med elektrodama, A je površina, dielektričnost snovi med njima pa predstavlja epsilon. Sprememba pospeška se meri tako, da se odčita razlika med dvema kapacitivnostima C_1 in C_2 . Ti dve tvorita dve zunanji fiksni elektrodi in ena notranja dinamična.

Na vsaki strani je torej vrzel, ki se ob premiku manjša ali večja. Sprememba velikosti vrzeli pa vpliva na razliko obeh kapacitivnosti, ki sta v mirovnem stanju sicer teoretično enaki. Ko pride do spremembe velikosti vrzeli, se kapacitivnost spremeni.

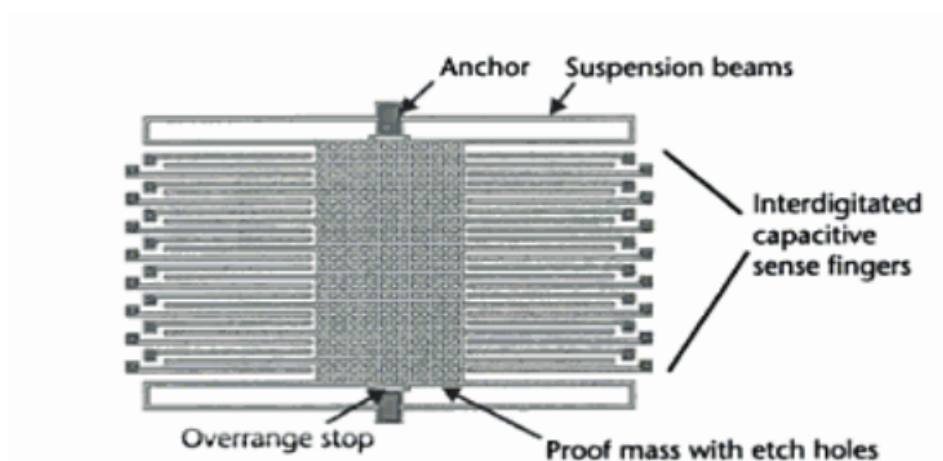
Ko pride do spremembe velikosti vrzeli, se kapacitivnost spremeni po enačbi:

$$C_2 - C_1 = 2\Delta C = \epsilon_0 \epsilon \frac{x}{d^2 - x^2}.$$

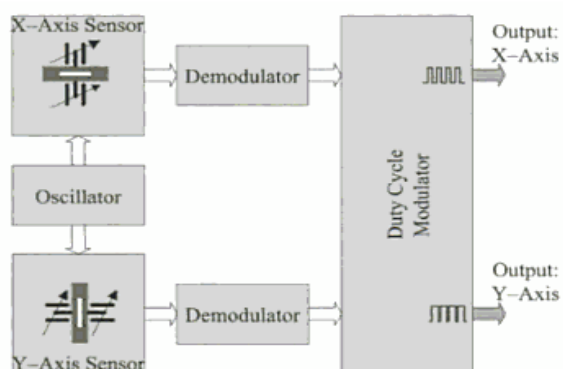
Iz tega lahko izračunamo spremembo velikosti vrzeli (ki je neposredno povezana s spremembo pospeška), če poznamo spremembo kapacitivnosti in sicer po nelinearni enačbi: $\Delta C x^2 + \epsilon_0 \epsilon x + \Delta C d^2 = 0$.

Če to enačbo poenostavimo, lahko izračunamo spremembo velikosti vrzeli in vidimo, da je ta proporcionalna spremembi kapacitivnosti

$$x \approx d \frac{\Delta C}{C_0}, .$$



Da bi lahko učinkovito izmerili razliko kapacitivnosti, pripeljemo pa oba kondenzatorja pravokotna periodična signala (1Mhz) z določeno amplitudo oz. napetostjo, ki sta zamaknjena za 180 stopinj. Na drugem koncu kondenzatorja povežemo in odčitamo napetost, ki je proporcionalna odmiku vrzeli oz. pospešku. To napetost z uporabo demodulatorja množimo z vhodnim periodičnim signalom, da dobimo pravi predznak. Da vse to pravilno deluje, moramo uporabiti vzmet, ki ima odmik proporcionalen z dovedeno silo.



Ker so MEMS akcelometri uporabljeni v veliko sistemih, so pomembne tudi karakteristike napetostnega šuma ki se spreminja z inverznim kvadratnim korenem pasovne širine. Hitreje ko moramo meriti spremembe akcelometra, slabšo natančnost imamo, kar pomeni da bo močno vplival na performanse akcelometra pri nižjih pospeških, saj takrat na izhodu dobimo šibkejši signal. Poznamo 3 vire šuma: mehanične vibracije vzmeti, šum zaradi meritvenega sistema in nenatančnost logike za odstranjevanje šuma.

6.1. Nekatere pomembne razlike med akcelerometri

- akcelerometri z digitalnim ali analognim izhodom
- število osi in območje merjenja ($\pm 1.5g$ akcelerometer bo dovolj za merjenje gravitacije, medtem ko bomo za gibanje avta potrebovali območje $\pm 2g$ ali več)
- občutljivost in pasovna širina - to je frekvenca s katero merimo spremembe v pospešku, frekvenca oscilatorja mora biti veliko večja kot pasovna širina, ker mora elektronika brati spremembe v kapacitivnosti hitreje kot se pospešek spreminja, demodulator pa potrebuje tudi nekaj urinih period da izračuna izhod.

6.2. Uporaba akcelerometrov

Akcelerometri so dandanes vgrajeni v različne osebne elektronske naprave. Primer so mobilni telefoni, kjer je njihov namen preklon slike iz portretnega v ležeči način, števec korakov, itd. Nekateri modeli vsebujejo 3D akcelerometer, ki nam omogoča izvedbo določene akcije že samo z rahlim udarcem oz. hitrim premikom telefona (npr. zamenjava pesmi v predvajalniku). Digitalne kamere uporabljajo akcelerometre za stabilizacijo slike in zajemanje slike brez zameglitve, pa tudi za orientacijo slike pri njenem ogledu na vgrajenem zaslonu.

Vgrajujejo se tudi v igralne kontrolerje za konzole in miške, v trdih diskih prenosnih računalnikov, da se pri morebitnem padcu ne poškodujejo, saj akcelerometer zazna padanje oz. udarec in še pravočasno izklopi disk. Kar se tiče avtomobilske industrije, se vgrajujejo z namenom zaznavanja trkov in sprožitve varnostnih blazin v pravem trenutku. Zaznavajo nenaden negativen pospešek in na podlagi le-tega ocenijo kdaj je prišlo do trka, poleg tega so pa sposobni testirati sami sebe ob vsakem ponovnem vžigu vozila. Prav tako so namenjeni meritvam tresljajev v avtomobilih, strojih, stavbah, meritve nihanj (seizmologija), merjenju hitrosti, itd. Uporabljajo se tudi pri kontroli in nadzoru vojaških in vesoljskih sistemov, med katere spadajo pametna orožja (npr. rakete zemlja-zemlja), pa tudi v satelitih.

7. Zaključek

Glavna prednost MEMS je njihova majhnost, cena, odpornost na toploto in silo. Pri izdelavi imamo veliko možnosti izbire materialov glede na uporabo aplikacije. Tehnologije izdelave se neprestano izboljšujejo, kar bo v prihodnosti pripomoglo k še nižjim cenam in zanesljivosti. MEMS se bodo v prihodnosti uporabljali na širšem področju, v tej tehnologiji vidimo velik potencial.

Literatura

Microelectromechanical systems: Advanced materials and fabrication methods (National Academy Press, 1997)

S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, MEMS mechanical sensors (Artech house inc., USA, 2004)

Lyshevski, Sergey Edward, MEMS and NEMS: systems, devices and structures (CRC press LCC, 2002)

<http://www.sensordynamics.cc/cms/cms.php?pageId=51>

<http://www.embedded.com/columns/technicalinsights/15306091?requestid=214333>

http://www.princeton.edu/mae/people/faculty/soboyejo/research_group/research/mems/

<http://www.itcprogramdev.org/itc2003proc/Papers/PDFs/00273c.pdf>

<http://www.eng.tau.ac.il/hanein/teaching/materials>

<http://iopscience.iop.org/0964-1726/10/6/302/pdf?ejredirect=.iopscience>

http://www.eetasia.com/ART8800502986480500_NTe2b23026.HTM

http://www.microfab.com/about/papers/smta_hawaii2006.pdf

<http://knol.google.com/k/a-glimpse-at-mems>

<http://www.aero.org/publications/helvajian/helvajian-3.html>

<http://www.directindustry.com/prod/akustica/digital-mems-microphone-35135-216205.html>

http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semitech_n/kap7/backbone/r711.html

<http://electronics.howstuffworks.com/dlp1.htm>

http://www.microfab.com/about/papers/smta_hawaii2006.pdf