

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO  
ODDELEK ZA FIZIKO

Seminar

# MIKROELEKTROMEHANIČNI SISTEMI

Avtor: Alan Šuligoj  
Mentor: doc. dr. Primož Ziherl

Ljubljana, 3. 5. 2007

## Povzetek

V seminarju so predstavljeni mikroeletromehanični sistemi (MEMS). Začne se s splošno predstavitevijo MEMS, nato sledi predstavitev materialov in tehnologij, ki se uporabljajo za izdelavo MEMS. Razmerja med fizikalnimi količinami se pri prehodu na mikroskopsko skalo spremenijo; o tem govori poglavje o skaliranju. V nadaljevanju so predstavljeni glavni tipi MEMS, večji poudarek je na fizikalno pomembnejših senzorjih. Čisto na koncu je omenjeno pakiranje kot tehnološko zelo pomemben proces.

# Kazalo

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Tehnologija izdelave</b>	<b>2</b>
2.1	Materiali . . . . .	2
2.2	Jedkanje . . . . .	3
2.3	Vezanje rezin . . . . .	4
2.4	Površinska obdelava . . . . .	6
2.5	Metoda DRIE . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Skaliranje</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Aktuatorji</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Senzorji</b>	<b>13</b>
5.1	Senzorji tlaka . . . . .	13
5.2	Senzorji sile . . . . .	15
5.3	Senzorji pospeška . . . . .	15
5.4	Senzorji pretoka . . . . .	16
<b>6</b>	<b>Pakiranje</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>Zaključek</b>	<b>19</b>

# 1 Uvod

Elektromehanični sistemi so naprave, ki električni signal pretvorijo v mehanični odziv (aktuatorji) ali mehanične deformacije pretvorijo v električen odziv oziroma signal (senzorji). V mnogih tehničnih aplikacijah je vedno bolj opazen močan trend miniaturizacije elektromehaničnih sistemov, kar privede do mikroelektromehaničnih sistemov (MEMS). MEMS so tako po definiciji [1] integrirani mikrosistemi, ki

- konvertirajo fizikalne impulze, pojave in parametre v električne, mehanične in optične signale ter obratno
- izvajajo pogon (aktuatorji), merjenje ozitoma detekcijo (senzorji) in še druge funkcije
- vključujejo kontrolo, diagnostiko, procesiranje signalov in zbiranje podatkov.

Danes obstajajo že nanoelektromehanični sistemi (NEMS), ki so še manjši od MEMS. V glavnem velja, da so dimenzije MEMS in njihovih komponent reda od 100 nm do 1 cm [1].

MEMS so večinoma izdelani iz silicija, ki se je izkazal kot material, ki ima zelo dobre lastnosti za te namene. Odkar je postala na račun izdelave integriranih vezij tehnologija obdelave silicija dovolj dovršena, se je začela tudi bolj množična izdelava MEMS. MEMS imajo za razliko od integriranih vezij še dodatne (konstrukcijske) elemente, kot so luknje, votline, kanali, nosilci-konzole, membrane itd, ki imajo velik vpliv na proces izdelave. Vedno bolj se uporabljajo tudi drugi materiali (polimeri, stekla, kovine...) [2].

Gonilo razvoja MEMS je potreba po miniaturizaciji sistemov, kar privede do zmanjšanja stroškov in večje uporabnosti mikro naprav. Tipičen primer so senzorji pospeška, ki so v sistemih za proženje avtomobilskih zračnih blazin, saj so manjši in zanesljivejši od klasičnih. Poleg tega omogočajo simulacijo trka in s tem preverjanje delovanja, kar se navadno zgodi ob vsakem vžigu motorja. Hitro so se začeli uporabljati tudi v digitalnih fotoaparatih in kamerah za stabilizacijo slike. Vendar pa MEMS ne morejo cenovno konkurirati navadnim napravam, če le-te izpolnjujejo vse zahtevane tehnične lastnosti. Dejstvo pa je, da miniaturizacija velikokrat producira tehnično boljše naprave [2].

Cena MEMS je močno odvisna od množičnosti izdelave. Tako po množičnosti izdelave in s tem relativno majhno ceno najbolj izstopajo brizgalni tiskalniki ter senzorji tlaka in pospeška. Gonilna sila so avtomobilska in telekomunikacijska industrija, industrija tehničnih naprav in medicina [2].

## 2 Tehnologija izdelave

Načrtovanje MEMS je zelo kompleksno delo. V primerjavi z integriranimi vezji, kjer je načrtovanje mogoče s skoraj popolno separacijo med procesom izdelave, načrtom vezja in pakiranjem, morajo pri načrtovanju MEMS vsi ti aspekti teči simultano. Pakiranje je sicer končen, a vseeno pomemben proces, saj pogosta vpliva na delovanje celega sistema. Poleg tega lahko prispeva preko 50% končne cene produkta [2].

MEMS imajo lahko ločeno elektroniko na nekem drugem čipu, vendar je večina MEMS izdelanih skupaj z elektroniko na istem čipu. Ločena elektronika se priporoča zgolj v posebnih primerih, ko taka konfiguracija prinaša kakšno izrazito prednost (delovanje, velikost, cena) [2].

### 2.1 Materiali

Izbira materialov poteka na osnovi primerjave mehaničnih lastnosti (kontrolirane notranje napetosti, nizka temperatura proizvodnje, združljivost z drugimi materiali, možnost nalaganja tankih filmov...). Za specifične aplikacije so pogosto zahtevane posebne materialne lastnosti (recimo prozornost in majhne električne izgube). Predvsem zaradi že dodelane

tehnologije izdelave integriranih vezij se tudi pri MEMS največ uporabljajo silicij in njegove spojine: silicijev dioksid ( $\text{SiO}_2$ ) in silicijev nitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) [2]. Silicij ima skoraj tolikšen elastični modul kot jeklo, a je lažji od aluminija (tabela 1). Njegove mehanične lastnosti so anizotropne (odvisne od orientacije kristala), kar je v mnogih aplikacijah tudi koristno uporabljeno. Posebna lastnost je elastičnost vse do meje trdnosti za monokristalni silicij. Kot senzor ima velik piezouporovni koeficient. Iz silicijevega nitrida je možno narediti 1  $\mu\text{m}$  tanke membrane s površino več kot 1  $\text{cm}^2$  [3].

	Si	jeklo	Al	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	kvarc	Pyrex
Youngov modul(GPa)	190	200	70	303	73	107	64
Poissonovo število	0.22	0.3	0.33	0.21	0.17	0.16	0.20
gostota ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.3	8	2.7	3.8	2.3	2.6	2.3
meja elastičnosti	7	3.0	0.17	9	8.4	9	
temp. koef. dolžinskega raztezka ( $10^{-6}\text{K}^{-1}$ )	2.3	16	24	6	0.55	0.55	3.25
toplotna prevodnost ( $\text{WK}/\text{cm}$ )	1.48	0.2	2.37	0.25	0.014	0.015	0.011
temperatura taljenja ( $^\circ\text{C}$ )	1414	1500	660	2000	1700	1600	

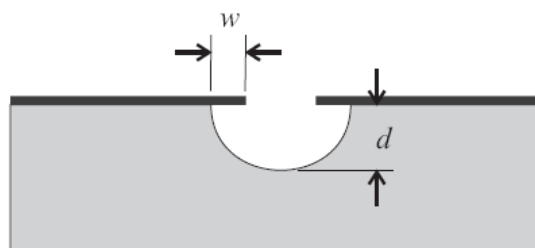
Tabela 1: Snovne lastnosti silicija in nekaterih izbranih materialov. Posebno pomembna je primerjava silicija in jekla, ki imata skoraj enak Youngov modul, vendar pa ima silicij več kot dvakrat večjo mejo prožnosti. Tudi zato je tako zelo primeren material za izdelavo MEMS [3].

V določenih aplikacijah se uporabljajo tudi drugi materiali: kvarc (velik piezoelektrični efekt), steklo (tvori tesne vezi s silicijem, biološka združljivost), polimeri (biološka razgradljivost in absorptivnost) in kovine (električna prevodnost, tanki filmi) [2].

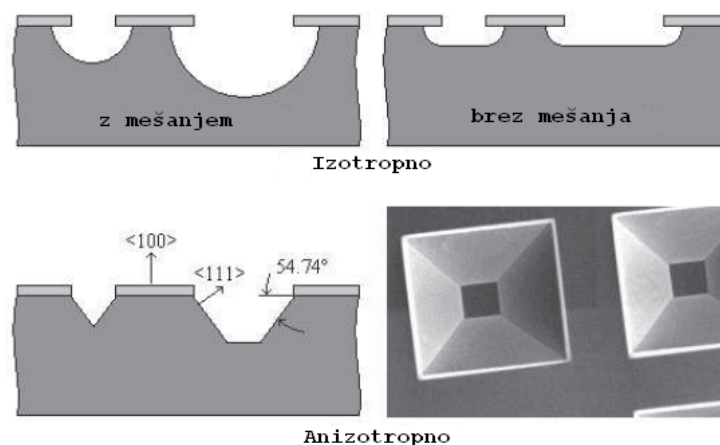
## 2.2 Jedkanje

Jedkanje spada v kategorijo prostorninske obdelave substrata, kjer se deli le-tega odstranjujejo. Pri mokrem jedkanju substrat potopimo v kemično kopel, ki raztaplja površino substrata, ki ni zaščitena z masko. Prednosti obdelave z mokrim jedkanjem so hitrost, selektivnost, enotnost in cena. Hitrost jedkanja in dobljeni profil sta odvisna od substrata, kemijskih snovi v kopeli, temperature, mešanja. Mokro jedkanje običajno delimo na izotropno (enaka hitrost jedkanja substrata v vseh smereh) in anizotropno [2].

Razmerje hitrosti definiramo kot  $w/d$  (slika 1), obsega pa vrednosti od 1 za izotropno do okoli 0.01 za zelo orientirano jedkanje (Si v KOH) [2]. V splošnem so izotropni jedkarji kisline, anizotropni pa baze. Popolno izotropno jedkanje lahko dosežemo le z mešanjem snovi za jedkanje, ker tako omogočimo dotok sveže snovi v vseh smereh (slika 2) [2].

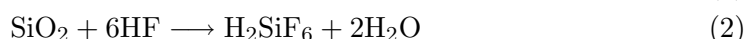


Slika 1: Rezultat mokrega jedkanja, kjer je hitrost jedkanja v različnih smereh lahko različna. Označeni sta razdalji, s katerima izračunamo razmerje hitrosti jedkanja v dveh medsebojno pravokotnih smereh [2].



Slika 2: Primerjava izotropnega in anizotropnega mokrega jedkanja. Za izotropno jedkanje je značilno jedkanje substrata tudi pod zaščitno plastjo in vpliv mešanja na hitrost jedkanja v različnih smereh, medtem ko na anizotropijo vpliva tudi orientacija kristala [2].

Običajni izotropni jedkar za silicij je HNA (zmes HF, HNO<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>COOH), kemijska reakcija



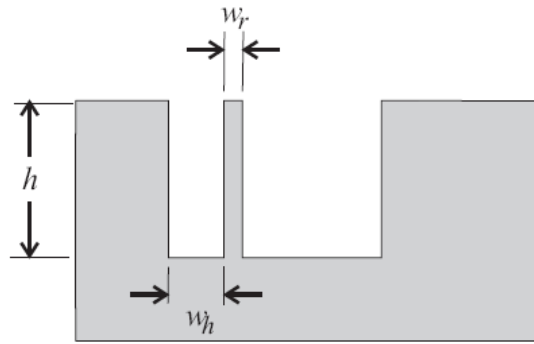
hitrost jedkanja pa lahko doseže 80  $\mu\text{m}/\text{min}$ , medtem ko se maska (oksid) raztaplja s hitrostjo 30-80 nm/min [2]. Kontroliranje geometrije jedkanja ni enostavno, ker predvsem pri izotropnem jedkanju na robovih maske tudi pod njo (sliki 1 in 2). Anizotropno jedkanje dosežemo z pravo izbiro jedkarja (KOH, EDP, TMAH), ki ima različne hitrosti jedkanja za različne kristalne ravnine. Razmerja med hitrostmi so reda 500 [2].

Suho jedkanje je skupina metod, kjer trden substrat jedkamo s plini. Ponavadi v proces vključimo plazmo, da s tem povečamo hitrost jedkanja in dovedemo reaktivne ione in radikale. Jedkanje je lahko vršeno fizikalno (obstreljevanje z ioni) ali kemično (kemijske reakcije na površini substrata). Fizikalno jedkanje je tipično bolj anizotropno oziroma navpično. Te metode so se najprej uporabljale v mikroelektroniki, vendar MEMS zahtevajo večje globine jedkanja ( $> 5 \mu\text{m}$ ) [2].

Ponavadi definiramo dve velikostni razmerji:  $h/w_h$  za luknje v substratu in  $h/w_r$  za stene med luknjami (slika 3). Za zadnje razmerje da večina metod boljše rezultate. Tipične vrednosti so od 1 (izotropno) do 50 (zelo anizotropno) [2]. Večinoma se za povečanje anizotropije uporablja tehnika zaščite sten med jedkanjem. To lahko dosežemo kontinuirano s polimeri (sproti se nalagajo na stene) ali še bolje v korakih, kjer se jedkanje izmenjuje z rastjo oksida na stenah. Slednja metoda da boljše rezultate, ker je oksid odpornejši na jedkanje kot polimeri [2].

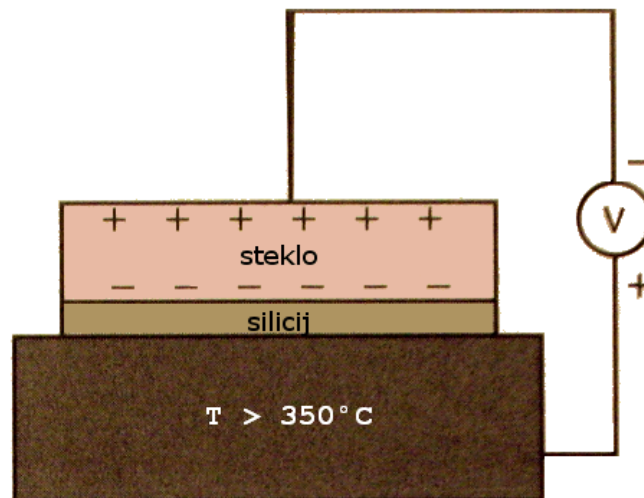
### 2.3 Vežanje rezin

S to metodo vežemo skupaj dve rezini (običajno dve tanjši plošči), kar se veliko uporablja tudi pri pakiranju. Silicij je zelo gladek in če sta površini dveh rezin čisti in neukrivljeni, potem se vežeta skupaj (van der Waalsova sila v primeru silicij — silicij), če ju zgolj položimo eno na drugo. To je posledica gladkosti, zato površini nimata zgolj treh stičnih točk, ampak je stično območje veliko. Vežavo lahko izboljšamo z električnim poljem ali tankimi filmi [4].



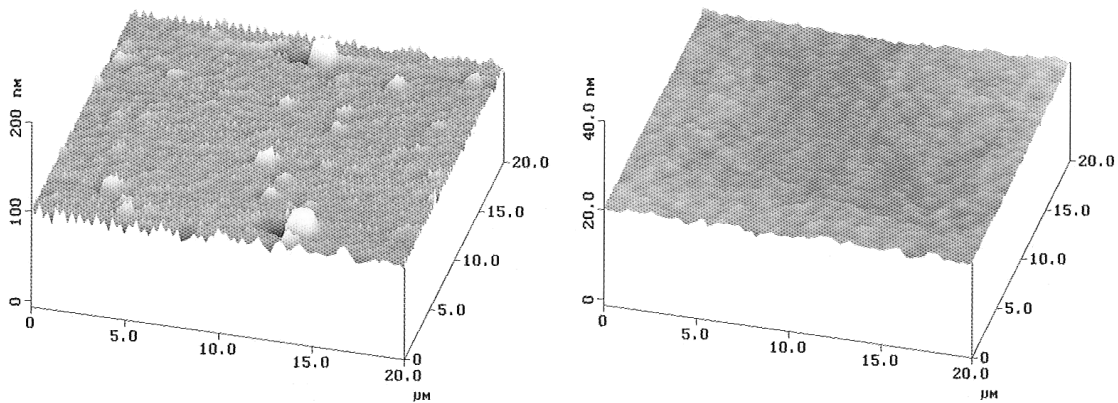
Slika 3: Geometrija substrata pri suhem jedkanju, ki je praviloma anizotropno. Pravokotne stene v substratu na sliki pomenijo skrajno mejo anizotropije, ko je hitrost jedkanja v vodoravni smeri nič. V praksi so bili z jedkanjem že doseženi koti preko  $89^\circ$ , kar je za večino praktičnih primerov že dovolj pravokotno [2].

Anodno vezanje je vezanje kovinske (tudi silicijeve) in steklene rezine, ki postane prevodna pri visokih temperaturah (slika 4). Tako je električno polje zgolj v špranji med rezinama. Če površini rezin nista preveč hrapavi (manj kot  $1 \mu\text{m}$  [4]), električno polje ustvari dovolj veliko silo, da se hrapavost površin zgladi. Pri dovolj visoki temperaturi kovina oksidira in tvori s steklom kovalentne vezi. Da vez med rezinama vzdrži vse napetosti, se morata temperaturna koeficienta raztezka kovine in stekla dovolj ujemati. Za silicij je najbolj primerno Pyrex steklo; tudi zato, ker je za vezavo potrebna manjša električna napetost [4].



Slika 4: Anodno vezanje rezin je primerno za vezavo steklene rezine na silicijevo. Potrebna sta dovolj visoka temperatura in električna napetost, da električna sila zgladi stični površini, kjer se tvorijo kovalentne vezi [3].

Sicer velja, da se v splošnem dva materiala vežeta, če je hrapavost njunih površin manjša od  $1 \text{ nm}$  [4]. Takšne izjemne gladkosti se da doseči s poliranjem površin rezin (slika 5), kot je to CMP metoda (kemično-mehanično poliranje), kjer na polirno glavo montirano rezino pod tlakom vrtimo na polirni površini z dodano rahlo alkalno pasto [4].



Slika 5: Površina pred (levo) in po poliranju. Očitno je, da imata dve gladki površini večjo stično ploskev kot dve hrapavi površini. Takšno poliranje se največ uporablja za vezanje dveh silicijevih rezin [4].

## 2.4 Površinska obdelava

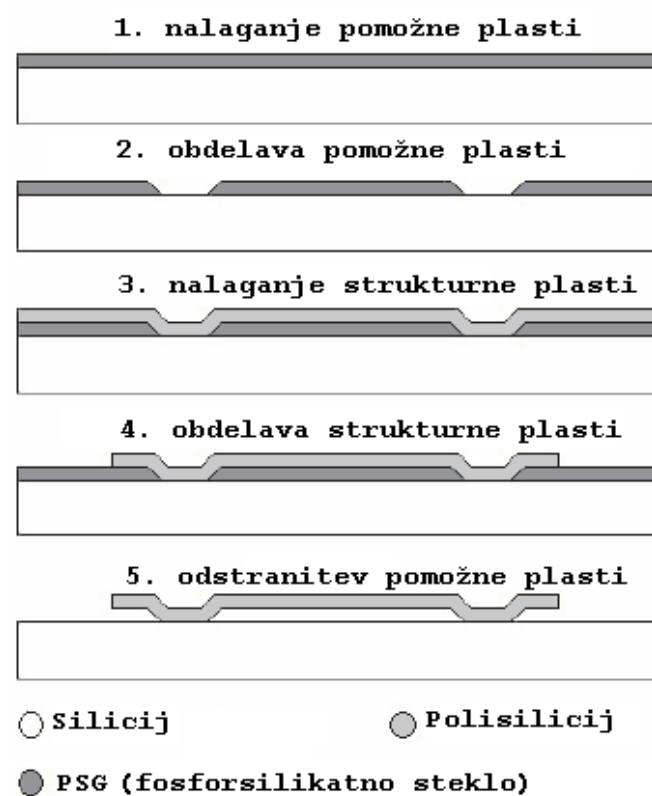
S površinsko obdelavo razumemo gradnjo struktur na površini substrata z dodajanjem materialov plasti za plastjo. Tanki filmi plasti so tipično debeli med 10 in 20  $\mu\text{m}$ . Ločimo strukturne in pomožne plasti, kjer pomožne služijo samo kot začasne plasti med obdelavo, v končni fazi pa jih odstranimo. Suho jedkanje se navadno uporablja za oblikovanje strukturnih in pomožnih plasti, mokro jedkanje pa za končno odstranjevanje pomožnih plasti. Slika 6 prikazuje nastanek mikrostrukture [2].

**Nalaganje plasti.** Izbiro materialov za plasti diktirajo temperatura nalaganja, obseg napetosti v plasti, prilagajanje plasti površini (slika 7), hrapavost nanešene plasti, obstoj luknjic (kapilar) v plasti, enoličnost nanosa, hitrost nalaganja (pomembno pri zelo tankih nanosih). Dodaten pogoj je združljivost med pomožnimi in strukturnimi plastmi. Izbira materialov za pomožne plasti je odvisna od metode jedkanja, saj se pri odstranjevanju pomožnih plasti strukturne plasti ne smejo bistveno poškodovati. Nekaj kombinacij prikazuje tabela 2 [2].

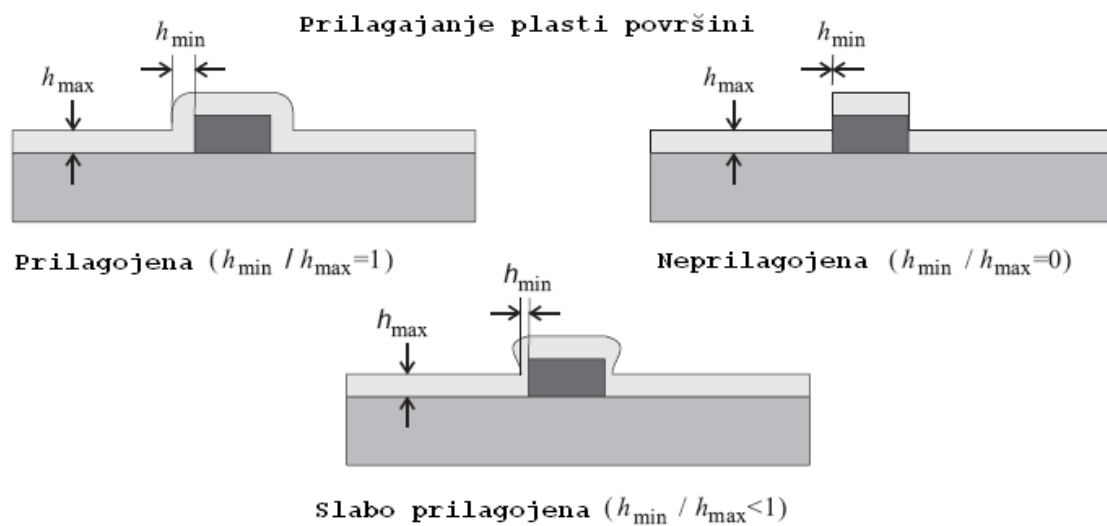
strukturni material	pomožni material	jedkar
polisilicij	oksidi (PSG, LTO)	HF
$\text{Si}_3\text{N}_4$	polisilicij	KOH
$\text{SiO}_2$	polisilicij	EDP/TMAH
poliamid	baker	železov klorid
titan	zlato	amonijev klorid
kovine	polisilicij	$\text{XeF}_2$

Tabela 2: Pogostejše kombinacije snovi za strukturne in pomožne plasti ter jedkarji, ki se skupaj uporabljajo pri površinski obdelavi [2].

Odstranjevanje pomožnih materialov povzroča veliko problemov - od tega, da se pri jedkanju uničujejo tudi strukturni materiali, do tega, kako spraviti jedkar skozi strukturne plasti, če je difuzija prepočasna. Mogoče najbolj nazoren pa je problem, kako posušiti strukturo, da se le-ta ne bi zrušila, kot se to pogosto dogaja pri mikromostičih. Tu namreč sušenje stisne mostič k substratu in ga zlomi, kar rešimo s sušenjem pri primernih temperaturah [2].



Slika 6: Nastajanje mikro strukture preko pomožne plasti, ki jo navadno obdelamo s pomočjo maske in UV svetlobe, da lahko z nalaganjem dobimo željeno obliko strukturne plasti. Pomožna plast se na koncu odstrani, kar ni vedno enostavno. Z nalaganjem plasti izvajamo površinsko obdelavo substrata [2].

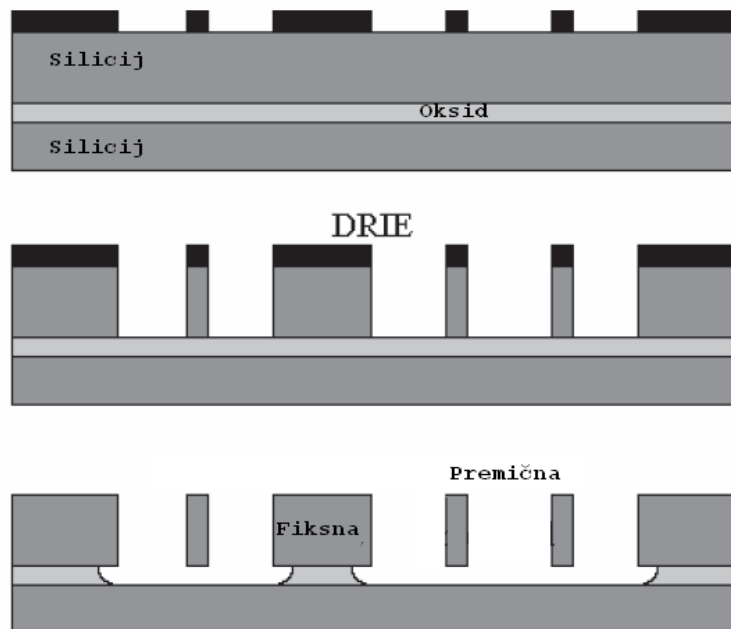


Slika 7: Različni tipi prilagajanja plasti površini imajo svoje prednosti in slabosti, kar je odvisno od posamezne aplikacije. Neprilagojena plast je pogosto zaželjena pri pomožnih plasteh, medtem ko si pri raznih zaščitnih plasteh želimo prilagojen tip plasti [2].

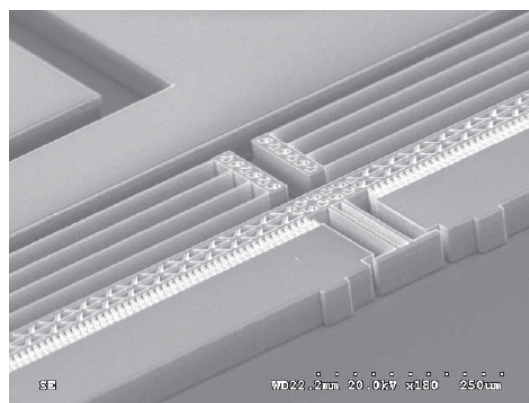


## 2.5 Metoda DRIE

Z metodo DRIE (deep reactive ion etching) lahko ustvarimo kompleksnejše strukture, vendar moramo imeti večslojni substrat (recimo silicij — oksid — silicij). Tak primer je na sliki 8, kjer najprej s suhim jedkanjem naredimo željeno strukturo v siliciju, nato pa z mokrim jedkanjem selektivno jedkamo tanko plast oksida. Tako lahko dobimo fiksne in premične stene silicija.[2]



Slika 8: Za metodo DRIE je potreben večplasten substrat, kjer je pomembna selektivnost plasti za jedkanje. Tako z večstopenjskim jedkanjem z različnimi jedkarji dobimo kompleksnejše strukture. Med najpomembnejšimi so premične stene [2].



Slika 9: Primer 50  $\mu\text{m}$  debele strukture narejene s DRIE tehnologijo. Na sredini je premična glavnična struktura [2].

### 3 Skaliranje

Pri miniaturizaciji sistemov, ko zmanjšujemo velikosti sistemov (naj bo  $l$  linearna velikost sistema), se fizikalne količine spreminjajo drugače kot  $l$ . To ima velik vpliv na obnašanje sistemov. Tako lahko s skaliranjem zapišemo, kako se fizikalne količine spreminjajo. Za površino ( $A \sim l^2$ ) in prostornino ( $V \sim l^3$ ) sta skalirna zakona splošno znana. Torej postaja npr. sila zračnega upora, ki je sorazmerna s površino, relativno bolj pomemben kot masa, ki je sorazmerna s prostornino [4].

Za študij električne sile si zamislimo kondenzator, kjer je omenjena sila odvisna od energije kondenzatorja in razmikom med ploščama

$$F_e = - \left( \frac{\partial W}{\partial x} \right)_Q, \quad (3)$$

kjer lahko energijo dobimo z integralom gostote elektrostatične energije

$$W = \int w dV = wAx, \quad (4)$$

saj je gostota neodvisna od prostornine. Po parcialnem odvajanju dobimo

$$F_e = -wA = -\frac{\epsilon_0 E^2 A}{2} = -\frac{Q^2}{2\epsilon_0 A}, \quad (5)$$

torej sta skalirna zakona  $F_e \sim l^2$ ,  $W_e \sim l^3$ . Podobno lahko izračunamo za magnetno silo in energijo. Dobimo  $F_m \sim l^4$ ,  $W_m \sim l^5$ .

Posebno zanimive in pri MEMS uporabne so konzole, to so na eni strani togo vpete plošče z dolžino  $L$ , širino  $b$  in debelino  $h$ . Za odklon  $\zeta = \zeta(x)$  kot funkcijo oddaljenosti od stene zaradi lastne teže velja diferencialna enačba [4]

$$\frac{\partial^4 \zeta}{\partial x^4} = \frac{12g\rho bL}{Ebh^3}. \quad (6)$$

Če v zgornji enačbi gledamo samo odklon pri  $x = L$  in predpostavimo fiksno geometrijsko razmerje  $L/h$ , velja

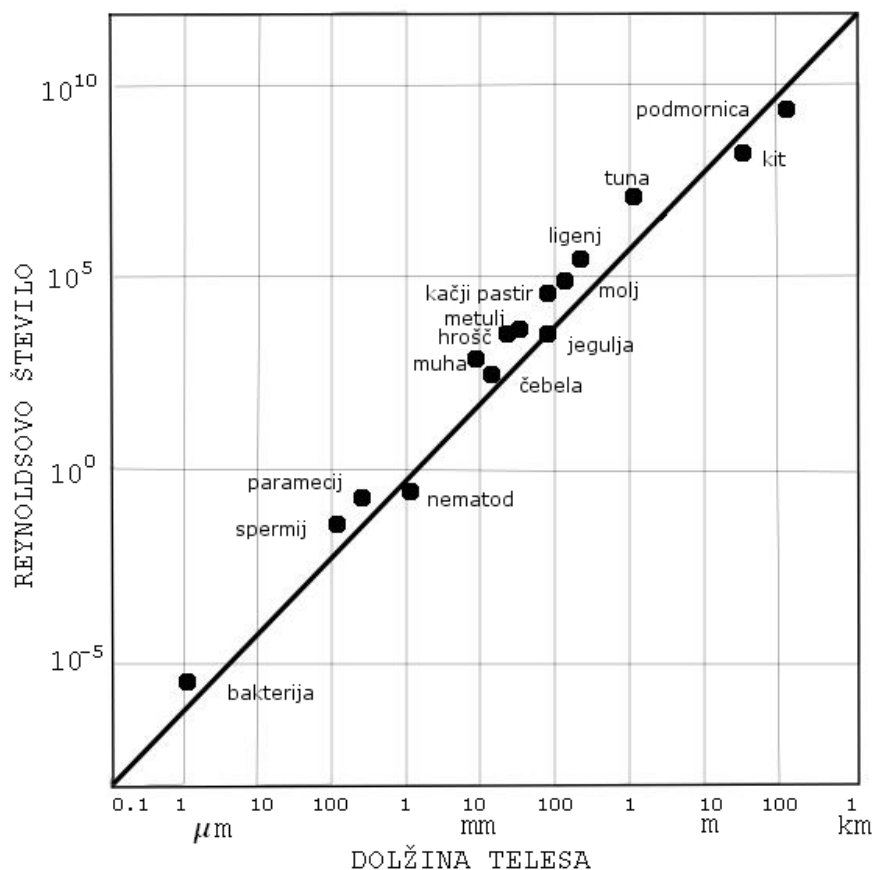
$$\zeta \sim \frac{L^5 b}{bh^3} = \frac{L^5}{h^3} \sim l^2, \quad (7)$$

kar je iskani skalirni zakon za odklon zaradi lastne teže. Vidimo, da so manjše plošče manj podvržene odklonom zaradi lastne teže. Podobno dobimo skalirni zakon za stabilno dolžino plošče (dolžina, pri kateri je plošča še stabilna):  $L_k \sim l^{4/3}$  [4].

Reynoldsovo število izračunamo iz enačbe  $Re = \rho U r / \eta$ . Če za hitrost  $U$  predpostavimo skaliranje  $U \sim l$ , dobimo  $Re \sim l^2$ . To dejstvo potrjujejo tudi meritve, saj je empirični eksponent blizu 2. Kar je najbolj zanimivo, temu zakonu se podrejajo tako živali v naravi kot tudi človeški izumi, npr. podmornice (slika 10) [4].

Nekatere fizikalne količine z miniaturizacijo sistemov naraščajo tudi absolutno, kot npr. električni upor ( $R_e \sim l^{-1}$ ) in resonančne frekvence ( $\nu \sim l^{-1}$ ). Slednje najlažje vidimo na stoječem valovanju strune, kjer valovanju z najnižjo (osnovno) frekvenco  $\nu$  po enačbi  $c = \lambda \nu$  ustreza največja možna valovna dolžina  $\lambda$ , polovica le-te pa je enaka dolžini strune [4].

Pomembnejši skalirni zakoni so zbrani v tabeli 3.



Slika 10: Empirične vrednosti Reynoldsovega števila in ujemanje s skalirnim zakonom. Glede na to, da je skalirni zakon izpeljan zelo preprosto, je ujemanje z realnim svetom presenetljivo dobro, in to na območju velikem deset velikostnih redov [4].

dolžina	$l \sim l^1$
površina	$A \sim l^2$
prostornina	$V \sim l^3$
elektrostatična energija	$W_e \sim l^3$
elektrostatična sila	$F_e \sim l^2$
magnetna energija	$W_m \sim l^5$
magnetna sila	$F_m \sim l^4$
odklon pod lastno težo	$\zeta \sim l^2$
stabilna dolžina	$L_k \sim l^{4/3}$
difuzijski čas	$\tau \sim l^2$
končna hitrost (difuzija)	$v_\infty \sim l^2$
prehodni čas (difuzija)	$\tau \sim l^2$
električni upor	$R_e \sim l^{-1}$
hidravlični upor	$R_h \sim l^{-3}$
Reynoldsovo število	$Re \sim l^2$
resonančna frekvenca	$\nu \sim l^{-1}$

Tabela 3: Pomembnejši skalirni zakoni. Vidimo, da z miniaturizacijo najbolj slabijo magnetni pojavi, medtem ko električni in hidrodinamični upor postajata vedno večja, kar je, razen ko upor uporabljamo za Joulovo gretje, večinoma nezaželen pojav [4].

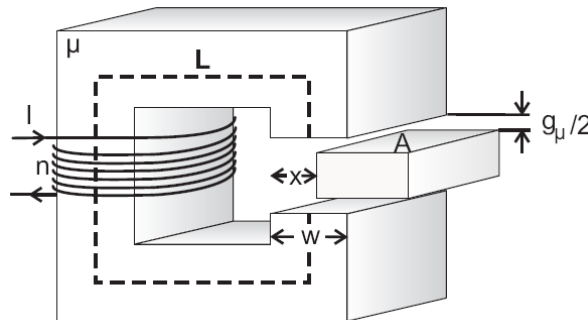
## 4 Aktuatorji

Aktuatorji so naprave, ki električno energijo pretvarjajo v mehanično, vendar ne nujno neposredno (lahko npr. preko toplote). Aktuatorji kot MEMS se tipično uporabljajo za (natančno) premikanje majhnih mas. Generirajo mehanične sile v območju  $\mu\text{N}$ - $\text{mN}$  z dosegom od nekaj  $\mu\text{m}$  do več sto  $\mu\text{m}$ . Ločimo jih po načinu delovanja (tabela 4) [2].

tip aktuatorja		sila	doseg	učinkovitost	izdelava
elektromagnetni		+	+	-	-
elektrostatični	kondenzator	0	-	+	+
	glavnični	-	+	+	+
	drsni	0	+	+	0
piezoelektrični		+	-	+	-
termični	bimetalni	+	+	0	0
	dvoslojni	0	0	0	+
	SMA (spominski kristali)	+	+	+	-
	termično-tekočinski	+	-	0	0

Tabela 4: Primerjava različnih tipov aktuatorjev (+ je dobro, - je slabo, 0 je nevtralnno). V splošnem piezoelektrični in termični aktuatorji proizvedejo veliko silo, medtem ko je najlažje izdelati elektrostatične. Slednji so zato tudi zelo pogosti [2].

**Elektromagnetni aktuatorji.** Predstavnik elektromagnetnih aktuatorjev je elektromagnetni motor, katerega struktura ni preprosta, tako da imajo trenutno najmanjši mikro elektromotorji premer 1 mm [2]. Obstaja pa več preprostejših elektromagnetnih mikroaktuatorjev. Tak primer je na sliki 11.

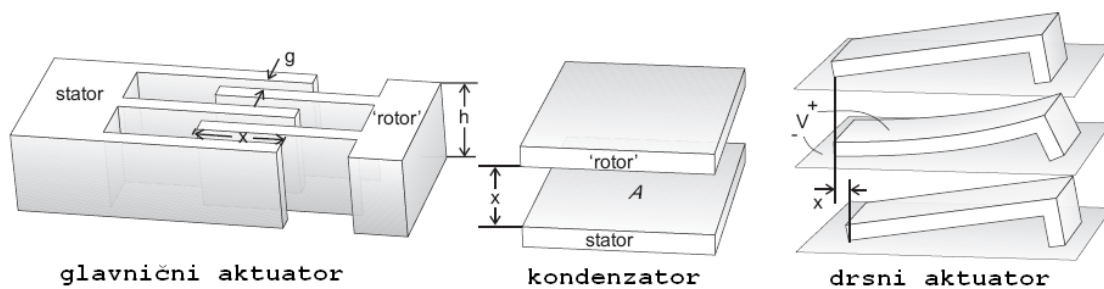


Slika 11: Primer elektromagnetnega aktuatorja, kjer z elektromagnetno interakcijo premikamo maso. Glede izdelave je najzahtevnejši element tuljava, saj je tipična tridimenzionalna struktura in jo je nemogoče izdelati s površinsko obdelavo [2].

V tem primeru silo na prečni del kontroliramo s tokom skozi tuljavo (tehnološko najzahtevnejši element), odvisnost sile od toka pa žal ni linearna [2]

$$F_m = \frac{(nI)^2}{2w} \left( \frac{\mu_0 A}{g_\mu + \mu_0 L/\mu} \right). \quad (8)$$

**Elektrostatični aktuatorji.** V tem primeru imamo v osnovi potencialno razliko med elektrodama in s tem elektrostatično interakcijo. Med seboj oddaljeni elektrodi predstavljata kondenzator, torej je sila med njima  $F_e \propto V^2 dC/dx$ . Vidimo, da v splošnem sila ni linearno odvisna od napetosti  $V$ . Najpogostejši trije tipi elektrostatičnih aktuatorjev so (slika 12): glavnični aktuator (elektrodi kot dva glavnika), ploščati kondenzator, drsni aktuator [2].



Slika 12: Najpogostejši tipi elektrostatičnih aktuatorjev. Glavnični aktuator je zelo uporaben zaradi konstantne sile na velikem območju, kondenzator je preprost za izdelavo; oba sta pogosto uporabljena v raznih aplikacijah. Drsni aktuator je bil izdelan šele pred kratkim in je zato še nerazširjen [2].

Sila, ki jo ustvarja glavnični aktuator, je podana z

$$F_{cd} \approx n\epsilon_0 \frac{h}{g} V^2. \quad (9)$$

Sila ima kvadratno odvisnost od napetosti in linearno od števila zob glavnika. Pomembno pa je, da ni odvisna od lege ( $x$ ). Sila enega zoba je relativno majhna (nekaj 10 nN), tako da imajo ponavadi glavnični aktuatorji dolge glavnike z veliko zobmi [2].

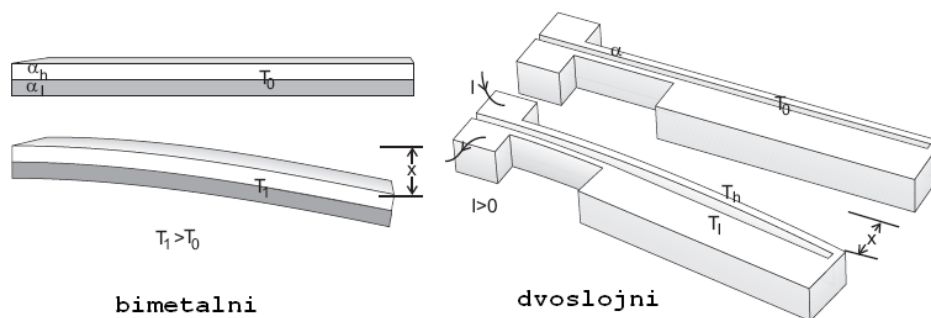
Ploščati kondenzator navadno da večjo silo, ki pa ima obratno kvadratno odvisnost od lege

$$F_{gc} \approx \frac{A}{2x^2} V^2. \quad (10)$$

Drsni aktuator je zmožen ustvariti večje sile (100  $\mu\text{N}$ ) od zgornjih dveh. Ko se ustvari potencialna razlika, se elektrostatična energija pretvori v deformacijo strukture. Ko izključimo napetost, se struktura vrne v začetno lego in pri tem ustvari omenjeno silo, ki je tudi v tem primeru odvisna od lege [2].

**Termični aktuatorji.** Termična energija, uporabljena v teh aktuatorjih, je skoraj vedno posledica Joulovega gretja, ko tok teče skozi uporovni element. Tovrstni aktuatorji so relativno močni, njihova slaba stran je počasnost. Vendar je prenos toplote na mikrometrski skali hiter, tako da nekateri termični aktuatorji dosežejo operativne frekvence okoli 1 kHz [2]. Najpogosteje so termični aktuatorji sestavljeni iz dveh plasti materialov z različnima koeficientoma temperaturnega raztezka, tako da se pri spremembi temperature (ki je za oba enaka) aktuator deformira (slika 13 levo). Heatuatorji delujejo na drugem principu (slika 13 desno). Imajo namreč dve plasti različnih debelin istega materiala (lažja izdelava), ki nimata iste temperature. Ko skozi aktuator teče električni tok, se debelejša plast manj segreva, ker ima manjši upor, medtem ko je tanjša plast toplejša. Tako se aktuator deformira in proizvede silo. Vendar se slednja zmanjšuje z večanjem deformacije. Sile so reda 10  $\mu\text{N}$  [2].

Aktuatorji s spominom oblike (SMA) uporabljajo kovinske kristale (npr. baker), ki imajo po toplotni obdelavi dve trdni fazi z dobro definirano temperaturo prehoda. Pri nižji temperaturi je kristal mehak in ga z lahkoto deformiramo, pri višji temperaturi pa se vrne v originalno obliko. Pri tem preoblikovanju proizvede relativno veliko silo [2].



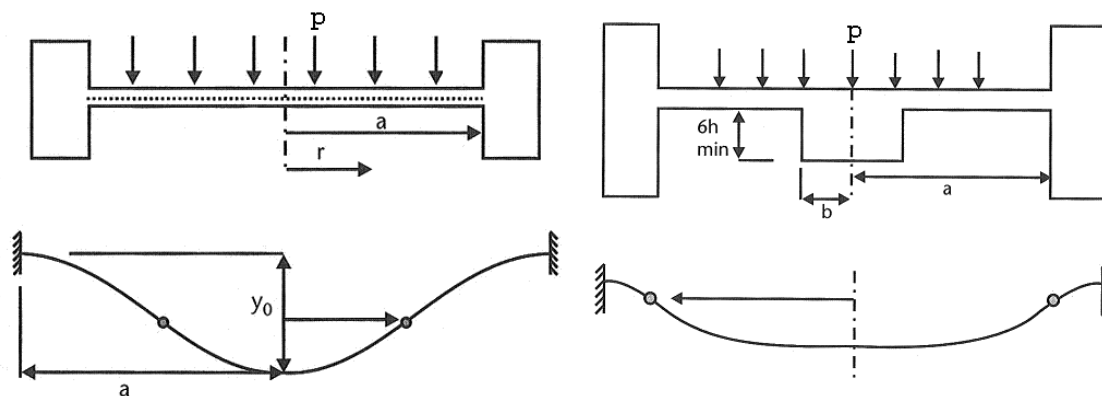
Slika 13: Bimetalni in dvoslojni (asimetrični) aktuator. Sta tipična predstavnika termičnih aktuatorjev in zelo uporabna (predvsem bimetalni), saj proizvedeta veliko silo ob ne preveč zahtevni izdelavi [2].

## 5 Senzorji

### 5.1 Senzorji tlaka

Mikrosenzorji tlaka imajo že več kot tridesetletno zgodovino in so najbolj razvito področje MEMS, ki pokriva tudi velik delež tovrstnega trga. Največ se uporabljajo v avtomobilski industriji, pri kontroli industrijskih procesov, hidravličnih sistemih, mikrofoni in v medicini (npr. za intravenozno merjenje krvnega tlaka). Navadno imajo tlačni senzorji senzorični element, ki tlak predvori v neko drugo fizikalno količino, slednjo pa transducer pretvori v električni signal [3].

**Membrane.** Kot senzorični element se pogosto uporabljajo (neprepustne) membrane, ki se zaradi tlačne razlike na obeh straneh deformirajo. Kot je pogosto pri tlačnih senzorjih, tudi membrane nimajo linearne odziva na velikih območjih. Za izboljšanje linearnosti se recimo uporablja t.i. izbočena membrana (slika 14 desno). Mikromembrane dobimo

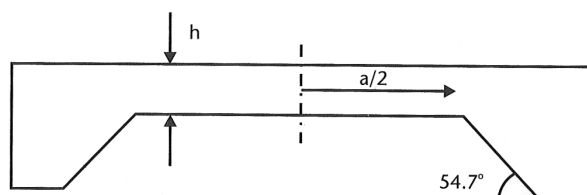


Slika 14: Presek navadne ravne (levo) in izbočene membrane ter njun profil odmika pod tlakom. Izbočena membrana se uporablja za izboljšanje linearnosti odziva. Pomembne so dimenzije izbočenega dela [3].

recimo z mokrim anizotropnim jedkanjem silicija, kjer debelimo lahko kontroliramo s časom jedkanja (slika 15) [3].

Če je membrana pravokotna, jo lahko analitično opišemo [3]

$$y_0 = \alpha \left( \frac{pa^4}{Eh^3} \right) (1 - \nu^2), \quad (11)$$



Slika 15: Geometrija anizotropno jedkane silicijeve membrane. Ob strani je odebeljena, saj je tam pritrjena na preostali del sistema [3].

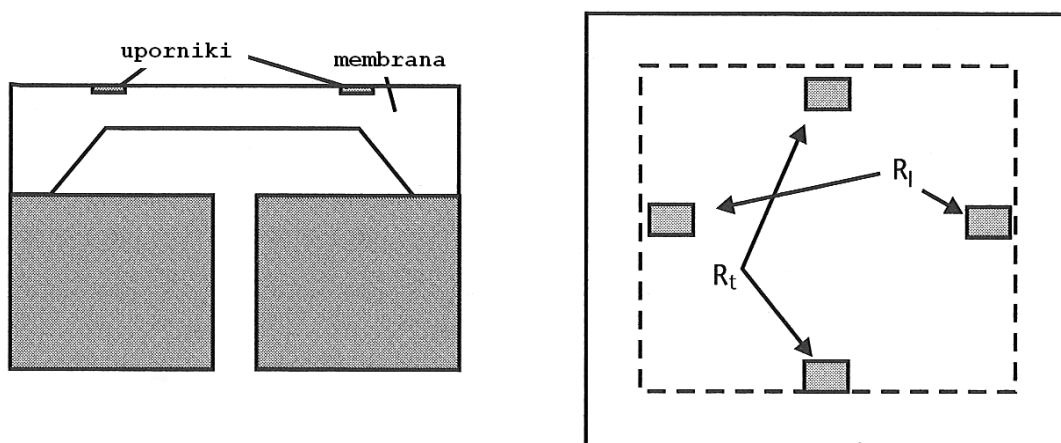
$$\sigma = \beta \left( \frac{pa^2}{h^2} \right) \quad (12)$$

( $p$  je tlačna razlika,  $a$  je manjša stranica,  $\alpha$  in  $\beta$  sta geometrijska koeficienta,  $\nu$  je Poissonovo število,  $E$  je prožnostni modul,  $y_0$  je odmik na sredini membrane,  $\sigma$  je maksimalna napetost v membrani). Nedušena resonančna frekvenca vpete kvadratne membrane je

$$f = 1.654 \left[ \frac{E}{\rho} (1 - \nu^2) \right] \frac{h}{a^2}. \quad (13)$$

Nekako velja, da se morajo resonančne frekvence membran gibati med  $\sim 80$  kHz (1 bar) in 57 5kHz (40 bar). Za membrane iz nerjavečega jekla so zahtevane nižje resonančne frekvence [3].

**Piezouporovni senzori** Piezouporovnost silicija omogoča merjenje raztezka membrane pod tlakom. Uporniki so postavljeni na vseh štirih stranicah membrane in sicer so vsi enako orientirani, tako da sta dva paralelna z največjim raztezkom ( $R_l$ ), dva pa nanj pravokotna ( $R_p$ ) (slika 16). Tu se da občutljivost in linearnost izboljšati z izbočenimi



Slika 16: Piezouporovni senzor. Levo je prikazana vezava membrane na trdno podporno strukturo, desno pa postavitve štirih uporov na membrani, ki so postavljeni ob vsaki stranici membrane, obrnjeni pa so vsi v smeri največjega raztezka membrane [3].

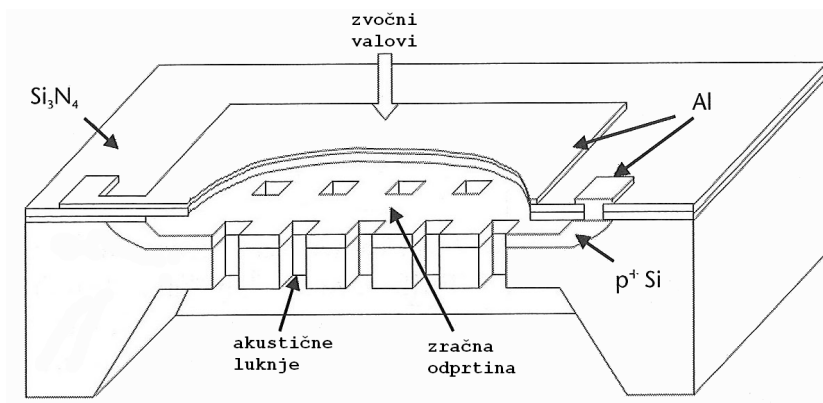
membranami, le da so tu štirje uporniki postavljeni v eni liniji [3].

Problem tovrstnih senzorjev je temperaturna odvisnost upornosti; absolutna sprememba upora zaradi temperature je lahko bistveno večja kot sprememba zaradi tlaka. Obstaja možnost integracije temperaturnega in tlačnega sensorja na isti čip, tako da lahko temperaturne vplive kompenziramo, kar zahteva kalibracijo. Alternativa so kompenzacijski upori, ki pa morajo biti montirani tako, da se ne raztezajo zaradi tlaka [3].

**Kondenzatorski senzorji.** Kondenzator z eno fiksno in drugo premično elektrodo deluje kot senzor tlaka, če je premik premične elektrode odvisen od tlaka, saj se s tem spremeni kapaciteta. Uporabnost teh senzorjev zmanjšujeta nelinearen odziv in zahtevna elektronika. Obstajajo pa kondenzatorski senzorji tlaka, ki znajo kompenzirati vpliv pospeška; le redki senzorji tlaka so namreč vgrajeni v naprave, ki niso zaščitene pred vplivi pospeška [3].

**Resonančni senzorji** uporabljajo resonančno mehanično strukturo (resonator) za merjenje odklona na tlak občutljive membrane. Običajno je resonator kar del membrane in pri deformaciji le-te se deformira tudi resonator in s tem se mu spremeni resonančna frekvenca [3].

**Mikrofon** je lep primer senzorja, ki akustični signal spreminja v električni signal. Mikrofon mora pravilno slediti tudi dinamiki akustičnega signala, zato morajo biti tudi membrane zelo občutljive in hitro odzivne ter zapakirane tako, da so neobčutljive na statične tlake. Najpogostejši so kondenzatorski mikrofoni, ki so se izkazali kot dovolj občutljivi in z zelo malo šuma. Membrana deluje kot premična elektroda, spodnja fiksna elektroda pa je navrtana, tako da se zmanjša dušenje in zagotovi primerne dinamične karakteristike [3].



Slika 17: Shema kondenzatorskega mikrofona. Glavni element je membrana kot premična elektroda, ki deluje kot senzor tlaka, vsi ostali elementi zagotavljajo primerne dinamične lastnosti mikrofona. Le-ta mora namreč hitro in pravilno slediti spremembam tlaka [3].

## 5.2 Senzorji sile

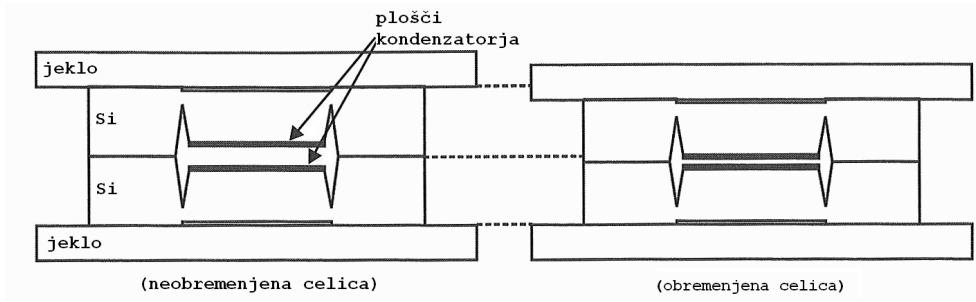
Senzorji morajo silo in navor pretvoriti v merljive količine, pogosto kar v raztezek neke razteznostne strukture. To potem merijo piezoupoporovni, kapacitivni ali resonančni elementi. Primer je t.i. kondenzatorska celica, ki se uporablja v tehtnicah. V siliciju, ki ga obremenimo s silo, je vgrajen kondenzator, s katerim merimo razdaljo med elektrodama in s tem silo, ki deluje na silicij (slika 19). Težava teh senzorjev je potencialno neenakomerna porazdelitev sile, saj ni nujno dobro centrirana. Zato se uporablja več manjših kondenzatorjev, porazdeljenih v ravnini [3].

## 5.3 Senzorji pospeška

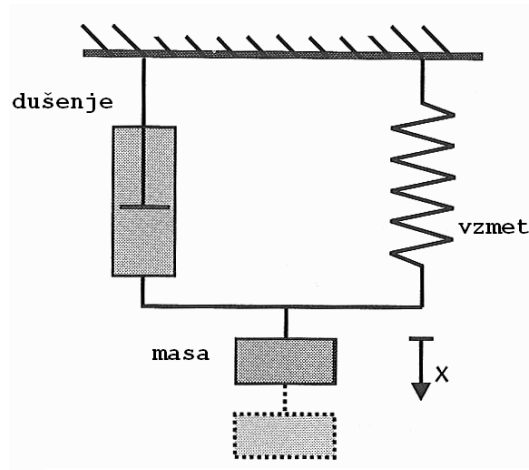
Ločimo običajne senzorje pospeška (premo gibanje) in senzorje kotnega pospeška (giroskop). Vgrajeni so v avtomobile, letala, video kamere, GPS sisteme, računalniške elemente itd [3].

Mehanični senzorični element senzorjev pospeška običajno sestavlja telo z maso, ki je preko vzmetenja in dušenja pritrjena na (referenčni) okvir (slika 19) [3].





Slika 18: Kondzatorska celica kot senzor teže. Levo je neobremenjena in zato z razmaknjenima ploščama, desno pa obremenjena, ko sta si plošči kondenzatorja bližje [3].



Slika 19: Shema senzorja pospeška, ki je sistem drugega reda, katerega časovne rešitve za odmik ( $x$ ) mase so znane eksponentne funkcije. Da sistem dobro deluje, moramo pravilno izbrati dušenje [3].

V Laplacovem prostoru ta sistem drugega reda opišemo z enačbo

$$\frac{x(s)}{a(s)} = \frac{1}{s^2 + b/m + sk/m} \quad (14)$$

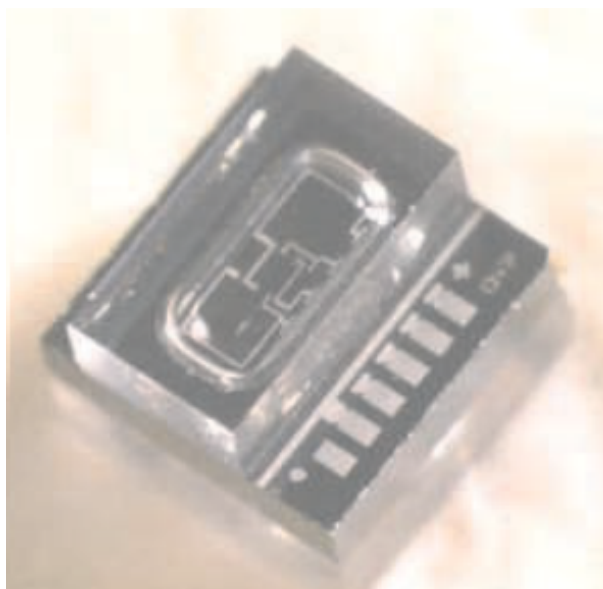
( $a$  je pospešek,  $b$  je dušenje,  $k$  je koeficient vzmeti,  $s$  je spremenljivka Laplacovega prostora (v realnem odvod),  $m$  je masa). Resonančna frekvenca in občutljivost sta

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{in} \quad S = \frac{m}{k}. \quad (15)$$

To je pomembno, ker tak senzor običajno lahko uporabljamo pri frekvencah pod resonančno. Vidimo pa, da večanje resonančne frekvence nujno pomeni zmanjšanje občutljivosti in obratno. To težavo lahko delno rešimo, če tak senzor vežemo v povratno zanko, ki pri vsakem premiku mase le-to vrača nazaj v začetno lego in s tem posredno meri pospešek. Če je kontrola povratne zanke dobra, lahko izboljšamo občutljivost. Primer realnega senzorja je na sliki 20 [3].

## 5.4 Senzorji pretoka

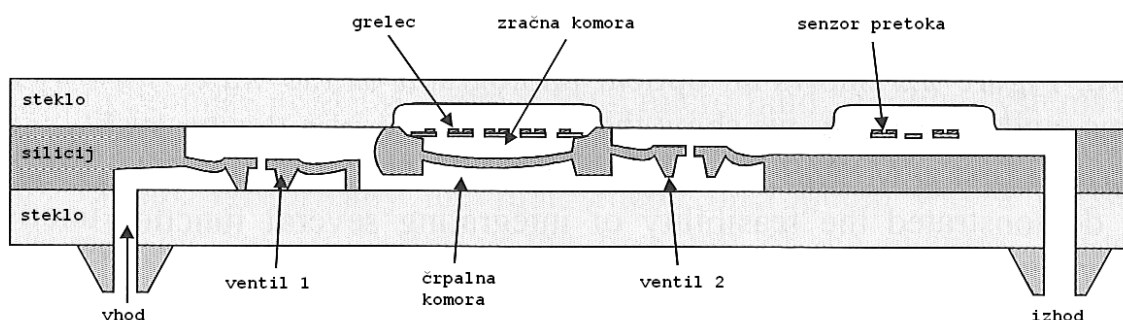
Tipični predstavnik je anemometer, kjer vročo žico ali film hladi tekočina, ki teče mimo. Moč, ki jo moramo dovajati za ohranjanje temperature, pove, kolikšen je pretok. Odvisnost ni linearna, odziv pa je zaradi majhne mase (MEMS) hiter. Druge vrste senzorji



Slika 20: Senzor pospeška (model SP15), ki je pokrit s plastjo stekla (metoda vezanja rezin) [2].

izkoriščajo za merjenje pretoka razliko tlakov na dveh različnih mestih v cevi z znanimi hidrodinamičnimi lastnostmi [3].

Senzorji pretoka se veliko uporabljajo v avtomobilski industriji in kontroli industrijskih procesov. Poleg tega so sestavni del mikročrpalk (primer na sliki 21) [4].



Slika 21: Shema mikročrpalke s senzorjem pretoka. Sestavljena je iz treh plasti steklo — silicij — steklo, kjer je obdelan samo silicij kot srednja plast. S segrevanjem in ohlajanjem zraka v zračni komori spreminjamo prostornino, kar je skupaj z ventili osnova črpalnega mehanizma. Senzor pretoka s pripadajočo elektroniko omogoča delovanje črpalke kot dozirnega sistema [4].

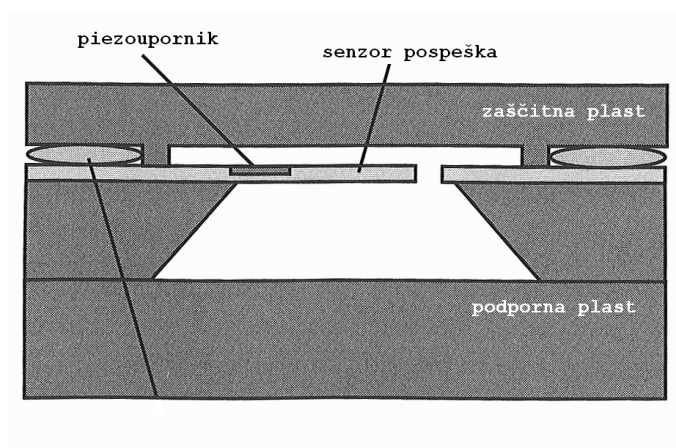
Mikro črpalke so pomembne pri doziranju v industriji, znanosti, predvsem pa v medicini, kjer obstajajo tudi dozirni sistemi kot vsadki; ker morajo biti zelo majhni, so izvedljivi le z MEMS tehnologijo [4].

## 6 Pakiranje

Pakiranje je končni proces, ko mikroelektromehanično napravo, da jo zaščitimo, zapakiramo v neko ohišje. Vendar so tehnične zahteve pakiranja zelo visoke, saj lahko ohišje močno vpliva na delovanje naprave, še posebej to velja za senzorje. Mikro naprave so pogosto krhke, ohišje pa jih mora zaščititi. Največji problem se pojavi pri senzorjih, ki

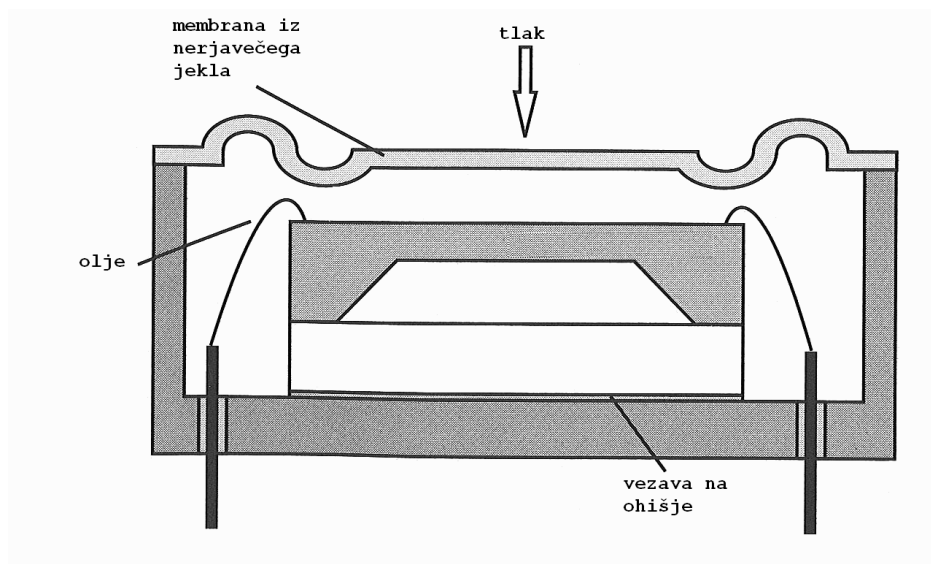
morajo pri svojem delovanju interagirati z okolico. Seveda pa je treba tudi med pakiranjem paziti na mikronaprave. Tako je pakiranje tehnološko in načrtovalsko zelo zahteven proces in posledično tudi zelo drag: pogosto preko 50% cene naprave, pri nekaterih tudi 90% [3].

Ohišje mora MEMS zaščititi pred kemikalijami, mehničnimi vplivi (udarci), ekstremnimi temperaturami, korozijo. Kot cenejšo obliko zaščite uporabljamo dodatno plast stekla ali silicija, s katero obdamo MEMS (slika 22). Uporabljajo se tudi t.i. sekundarna ohišja,



Slika 22: Primer zaščite senzorja pospeška z zaščitno plastjo (vezanje rezin). Zaščitna plast ščiti ranljive dele sistema, vendar mora pri tem omogočiti nemoteno delovanje. Senzorje pospeška je dokaj lahko zaščititi, ker ne potrebujejo direktne povezave z zunanjim okoljem in so lahko hermetično zaprti [3].

ki napravo varujejo samo pred določenimi vplivi. Tak primer je membrana iz nerjavečega jekla, ki zaščiti senzor tlaka pred kemičnimi vplivi, a vseeno omogoča, da je tlak znotraj ohišja enak zunanjemu (slika 23) [3].



Slika 23: Shema zaščite s sekundarnim ohišjem katerega sestavni del je membrana iz nerjavečega jekla. Ta ščiti notranjo membrano pred zunanjimi vplivi, preko nestisljivega olja pa vseeno omogoča sinhrono izenačevanje tlaka znotraj na membrani z zunanjim tlakom [3].

Ker mora ohišje tudi okolico (ljudi, hrano...) zaščititi pred vplivi senzorja, je zelo

pomembna izbira materiala ohišja. V ta namen so primerne polimerne membrane, keramike, stekla in nekatere kovine. Ohišja morajo biti biološko kompatibilna, netoksična in sposobna sterilizacije [3].

## 7 Zaključek

Čeprav so mikrosenzorji tlaka na trgu že 30 let, je industrija mikroelektromehaničnih sistemov še vedno dokaj mlada in nerazvita. Precej k temu prispevata razdrobljenost trga in raznolikost proizvodnih procesov. Prav velikih možnosti za res množično proizvodnjo še ni. Zaenkrat niti proizvodni procesi niso standardizirani in so med različnimi proizvajalci težko primerljivi. Sam razvoj MEMS je kompleksen in s tem relativno počasen. Preskok v tem pogledu bi lahko omogočila računalniška verifikacija na vseh nivojih, od komponent do proizvodnje. Uporaba MEMS se povečuje in tak trend se pričakuje tudi v prihodnosti. Bodočo konkurenco predstavljajo NEMS, vendar trenutne tehnologije še niso primerne za množično proizvodnjo. Kot kaže, je prihodnost MEMS svetla [2].

## Literatura

- [1] S. E. Lyshevski, *MEMS and NEMS: systems, devices and structures* (CRC Press, Boca Raton, 2002)
- [2] F. Chollet in HB. Liu, *A (not so) short Introduction to Micro Electromechanical Systems* (<http://memscyclopedia.org/introMEMS.html>, 2007)
- [3] S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft in N. White, *MEMS Mechanical Sensors* (Artech House, Norwood, 2004)
- [4] M. Elwenspoek in R. Wiegerink, *Mechanical Microsensors* (Springer, Berlin, 2001)