

# Lekcija 11

## *Piezo aktuatori*

Prof.dr.sc. Jasmin Velagić

Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Kolegij: Aktuatori

## 11.1. MEMS aktuatori

- **Mikro-elektro-mehanički sistemi (MEMS)** predstavljaju integraciju mehaničkih elemenata, senzora, aktuatora i elektronike na zajedničkom silicijskom supstratu, korištenjem mikrofabričke (mikrostrojne) tehnologije.
- Dok je standardna proizvodnja elektroničkih uređaja temeljena na integriranim krugovima, odnosno sekvencom njihovih procesa (npr. CMOS, bipolarni ili BICMOS procesi), *mikromehaničke komponente se proizvode korištenjem kompatibilnih “mikrostrojnih” procesa koji selektivno ugraviravaju dijelove silicijskih podloga (wafer-a) ili dodaju nove strukturalne slojeve za formiranje mehaničkih i elektromehaničkih uređaja.*

## **MEMS aktuatori**

- **MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)**
- Fenomeni koji omogućuju razvoj mikro aktuatora.
- **Piezoelektrički efekat**
  - Sila se generira piezoelektričkim kristalima koji energiju dobivaju usljed primijenjenog napona.
  - Sile su velike, vrlo mali pomaci.
  - Potrebni su veliki naponi. Relativno su komplicirani za gradnju.
- **Termalni (toplotni) bimorfizam**
  - Primjena fenomena da svaki materijal ima karakteristično širenje pri promjeni temperature.
  - Generiraju veliku silu i mogu imati veliko pomjeranje.
  - Ovi aktuatori imaju veliku vremensku konstantu i njihov rad jako ovisi o temperaturi.
  - Upravljanje ovim aktuatorima je komplicirano.

## MEMS aktuatori

- **Elektrostatički (kapacitivni) efekat**
  - Sila se generira promjenom elektrostatičke energije, tj. promjene napona ili količine naboja.
  - Generiraju se male sile i mali pomaci.
  - Potrebni su veliki naponi.
- **Elektromagnetski efekat**
  - Sila se generira promjenom magnetskog polja koje deluje na magnetski materijal.
  - Pogodni su za male sile.
  - Proizvodnja namota je komplicirana.

# Usporedba MEMS aktuatora

## ■ Elektrostatički aktuator

- mala gustoća sile,
- ograničen broj stupnjeva slobode (DOF),
- jednostavni za proizvesti.

## ■ Piezo aktuator

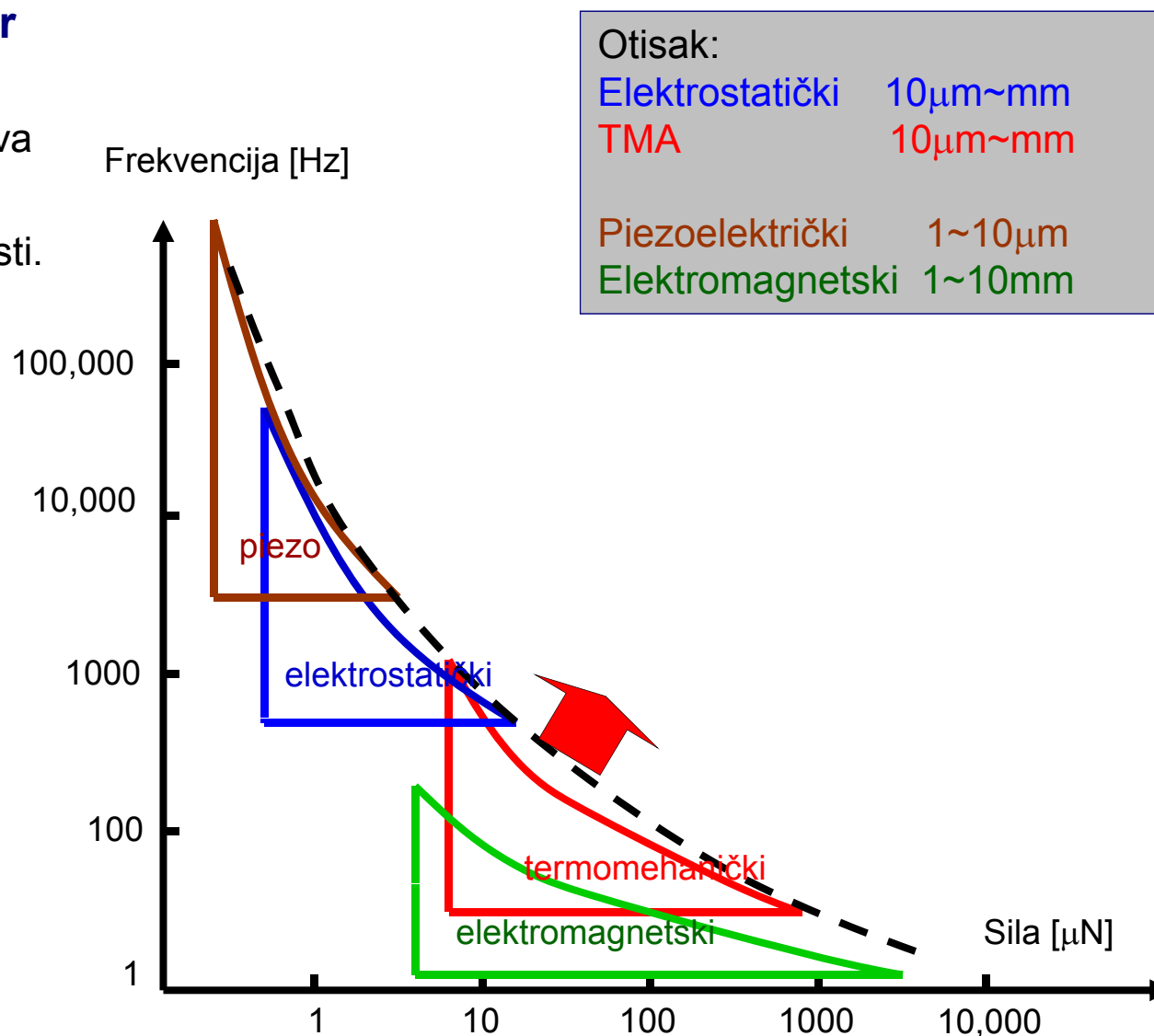
- mali pomaci usljed djelovanja sile,
- obnovljiva proizvodnja.

## ■ Elektromagnetski

- složena proizvodnja.

## ■ Elektrotermalni

- mali propusni pojas,
- visok iznos sile,
- jednostavna proizvodnja.



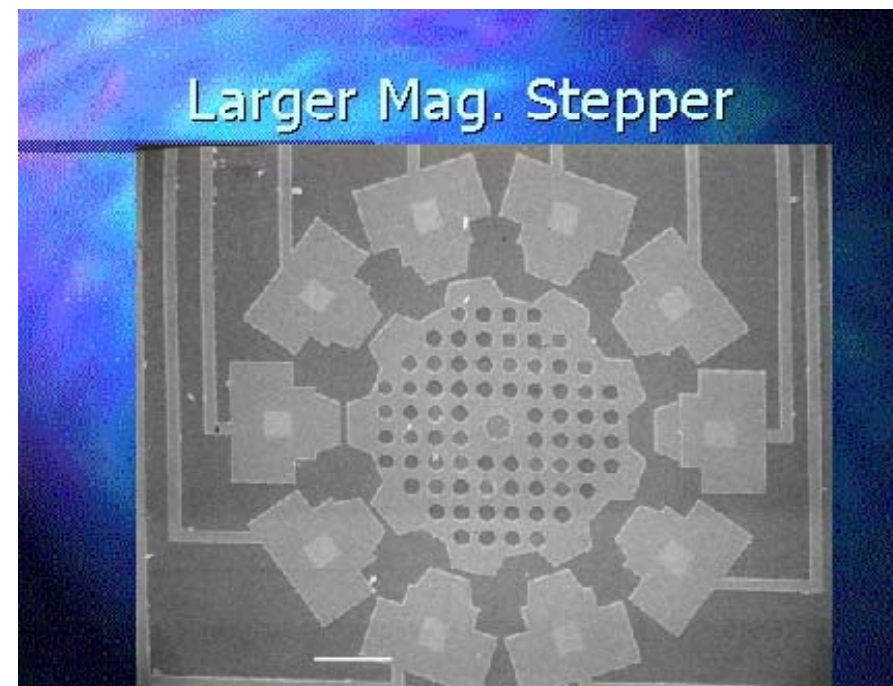
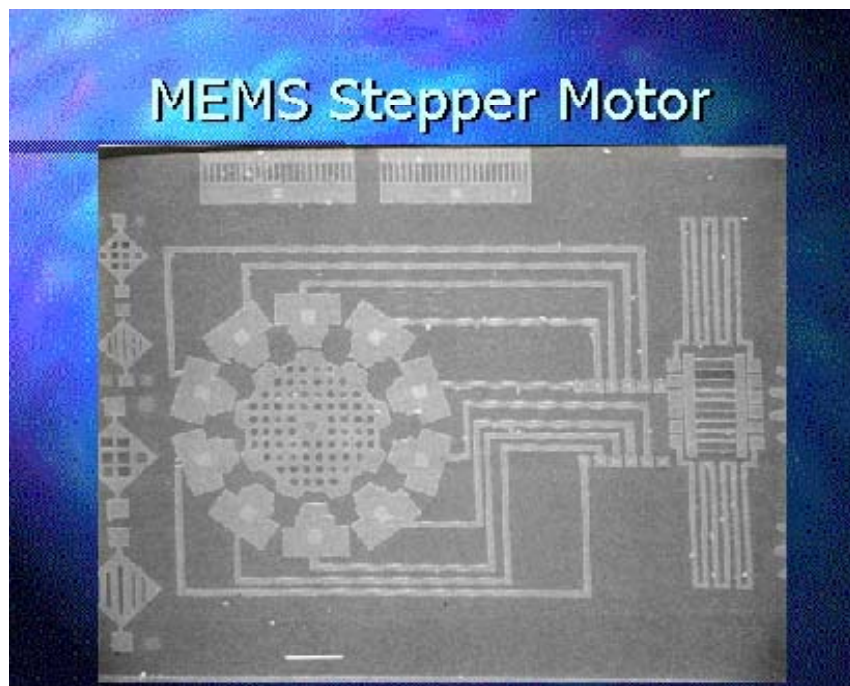
## Gustoća energije/sile

**Table 1: Energy and force density for different micro-actuators**

| Actuation type  | Energy density                            | Force density                                     | Energy density ratios    | Ease of Fabrication |
|-----------------|---|---|--------------------------|---------------------|
| Electrothermal  | $U = V^2 / \rho L^2$                      | $F = E_y \cdot (\alpha \Delta T) / L$             | 1                        | +                   |
| Electrostatic   | $U = \varepsilon_r \varepsilon_0 E^2 / 2$ | $F = n \cdot (\sigma \cdot E)$                    | $\sim 10^{-4}$           | +                   |
| Electromagnetic | $U = B^2 / 2\mu$                          | $F = n \cdot \left( \frac{J}{c} \times B \right)$ | $\sim 10^{-2}$           | --                  |
| Piezoelectric   | $U = \varepsilon_r \varepsilon_0 E^2 / 2$ | $F = n \cdot (\sigma \cdot E)$                    | $\sim 10^{-1} - 10^{-2}$ | ---                 |

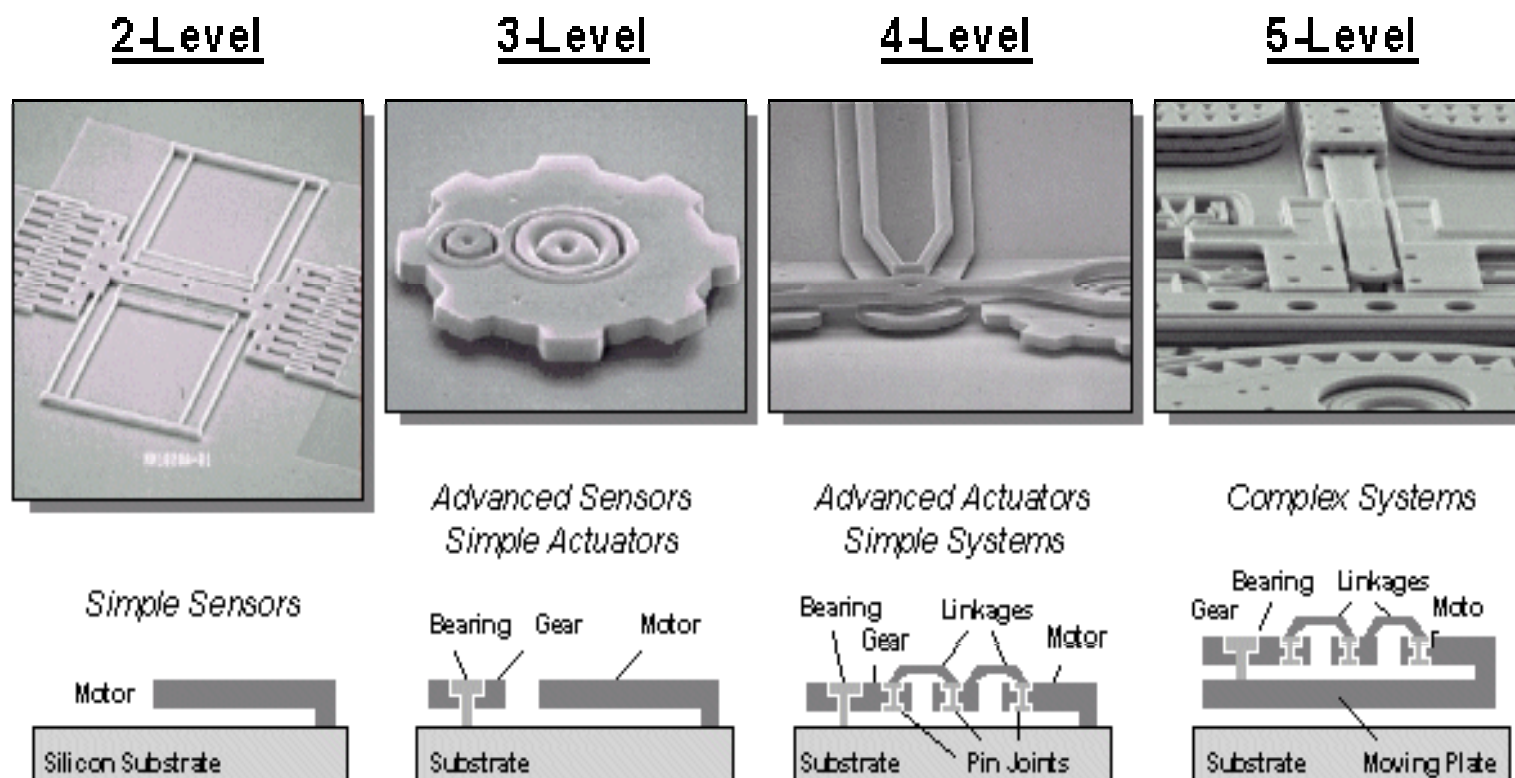
| Vrsta mikroaktuatora | Max. pomak             | Max. sila | Max. brzina | Sila/ područje | FAB     | Napon              |
|----------------------|------------------------|-----------|-------------|----------------|---------|--------------------|
| Termalni             | $\sim 100 \mu\text{m}$ | 1-10mN    | 10s -1kHz   | 1              | dobra   | 1-5V               |
| Elektrostatički      | 1                      | $10^{-2}$ | $10^2$      | $10^{-4}$      | dobra   | $\sim 100\text{V}$ |
| Elektromagnetski     | $10^{-1}$              | $10^{-2}$ | $10^1$      | $10^{-2}$      | složena | 1-5V               |
| Piezo                | $10^{-2}$              | $10^{-3}$ | $10^2$      | $10^{-2}$      | složena | 10-100V            |

## MEMS koračni motor



- Motor je veoma sličan standardnim koračnim motorima, izuzev što je dvodimenzionalan (2D) i veoma mali.

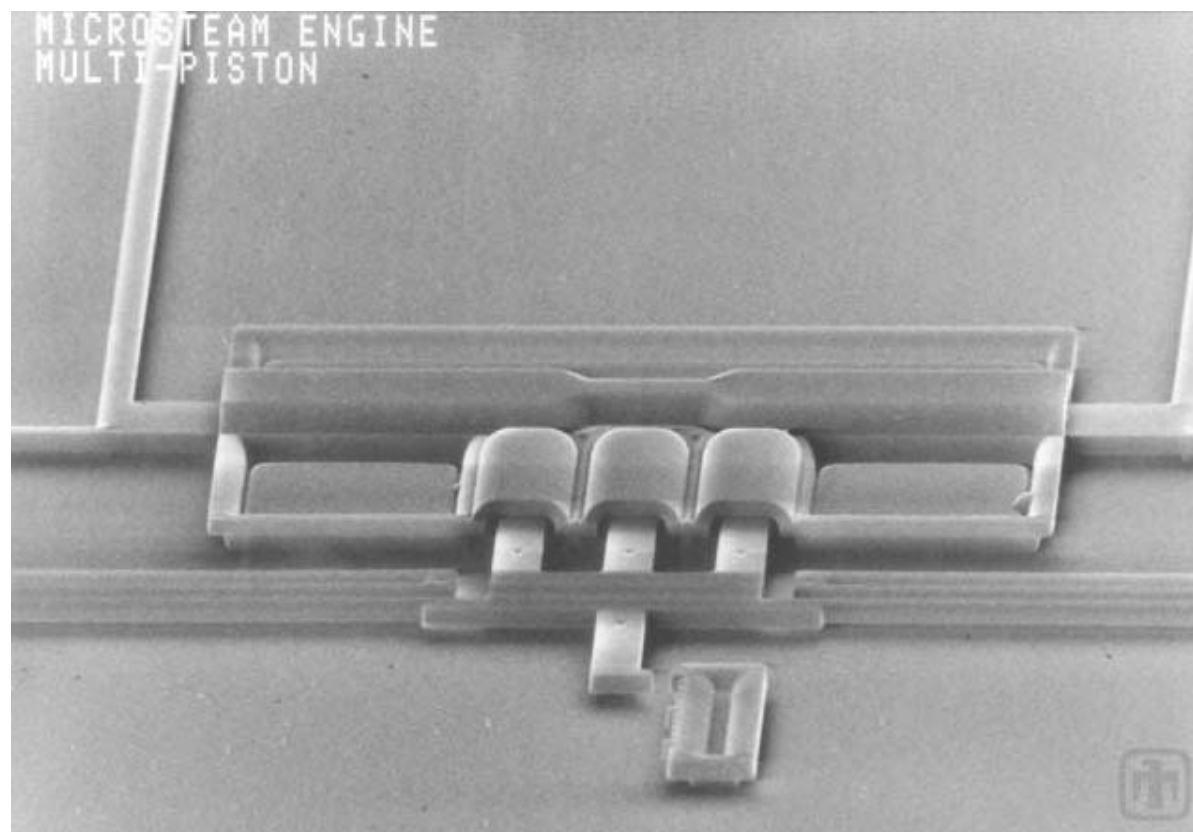
## MEMS slojevi (razine)



- Potencijalna složenost MEMS uređaja povećava se eksponencijalno sa brojem procesnih karakteristika i pojedinačnih strukturalnih slojeva.

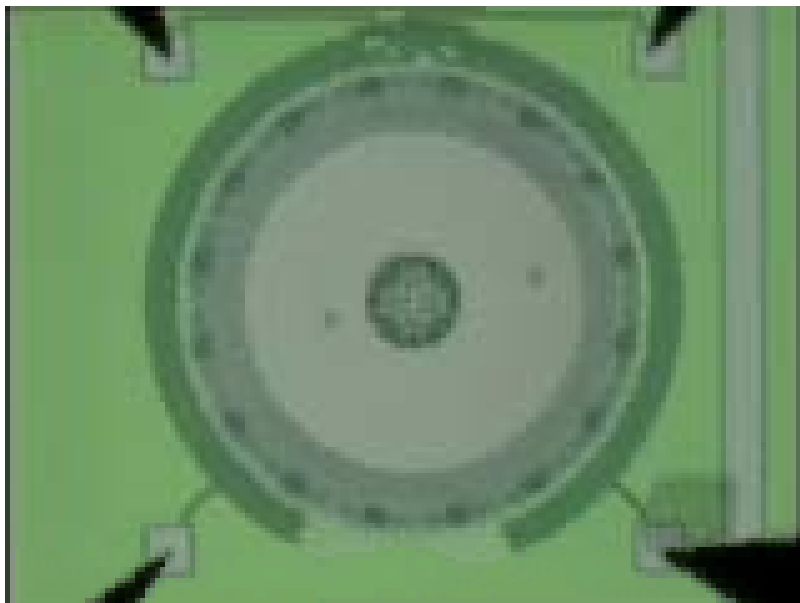


## MEMS parni stroj (višeclipni)

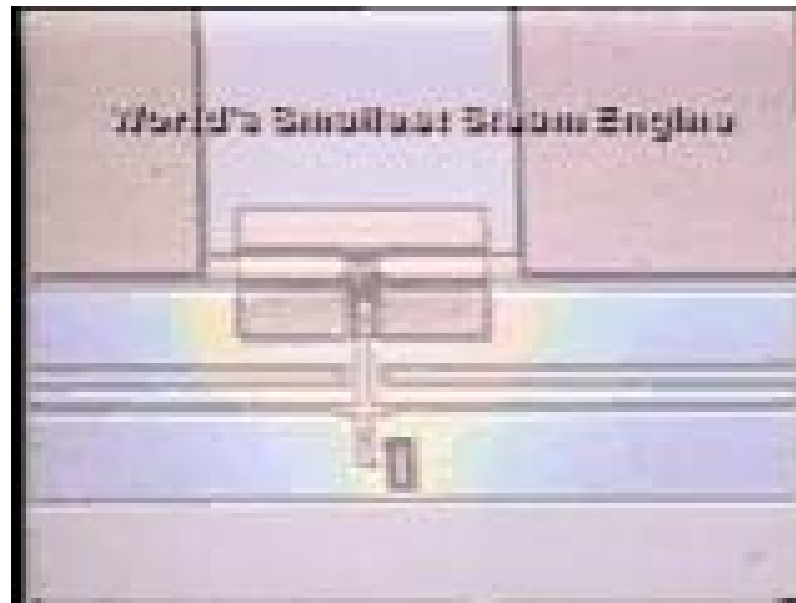


- Voda unutar tri kompresijska cilindra se zagrijava pomoću električne struje i isparava, izbijajući klip.
- Kada se prekine dotok struje, kapilarne sile uvlače klip.

## MEMS rotacijski motor i parni stroj

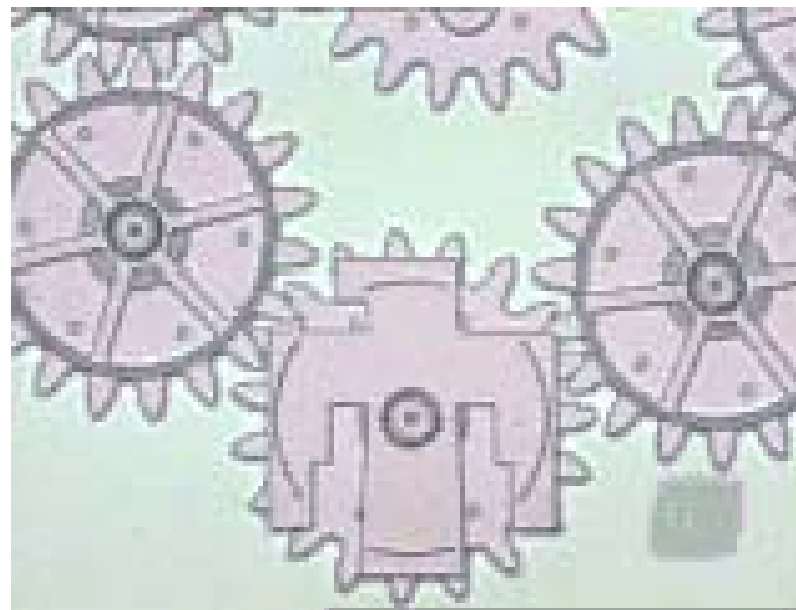
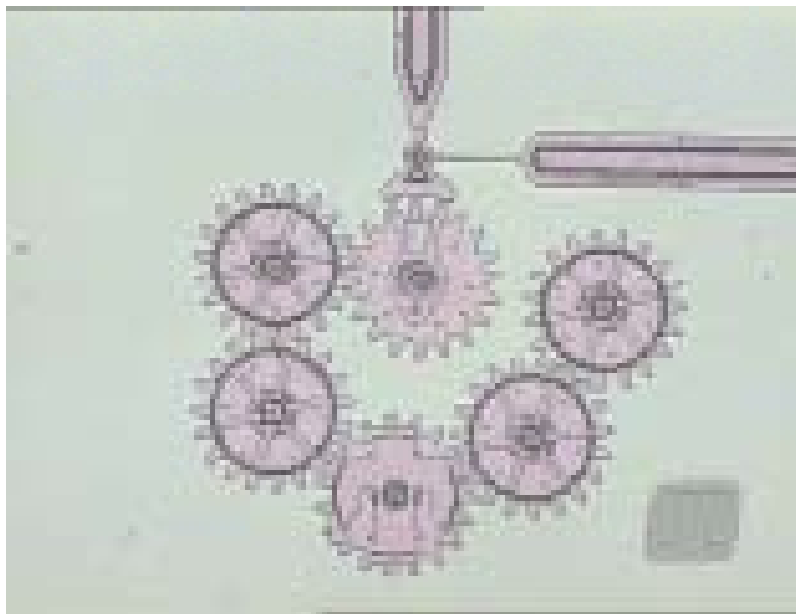


Rotacijski motor

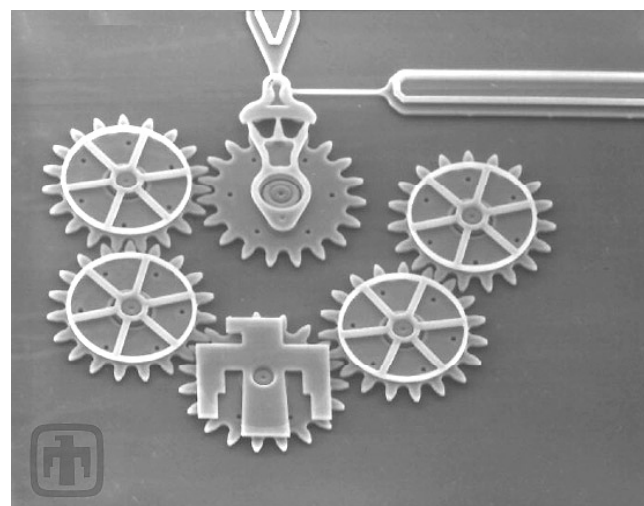


Parni stroj  
(jedan klip)

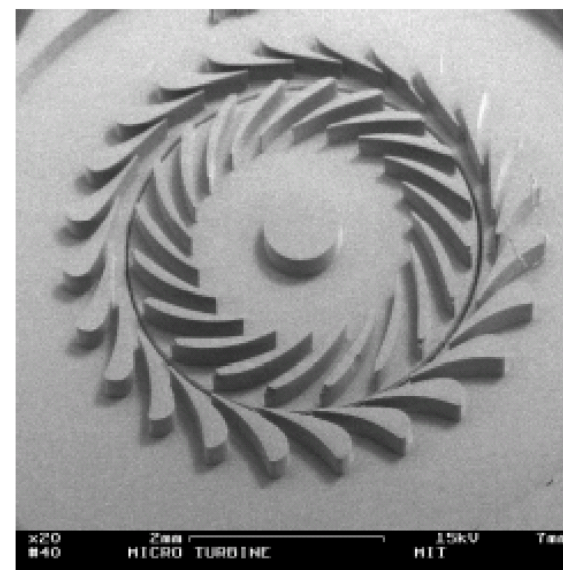
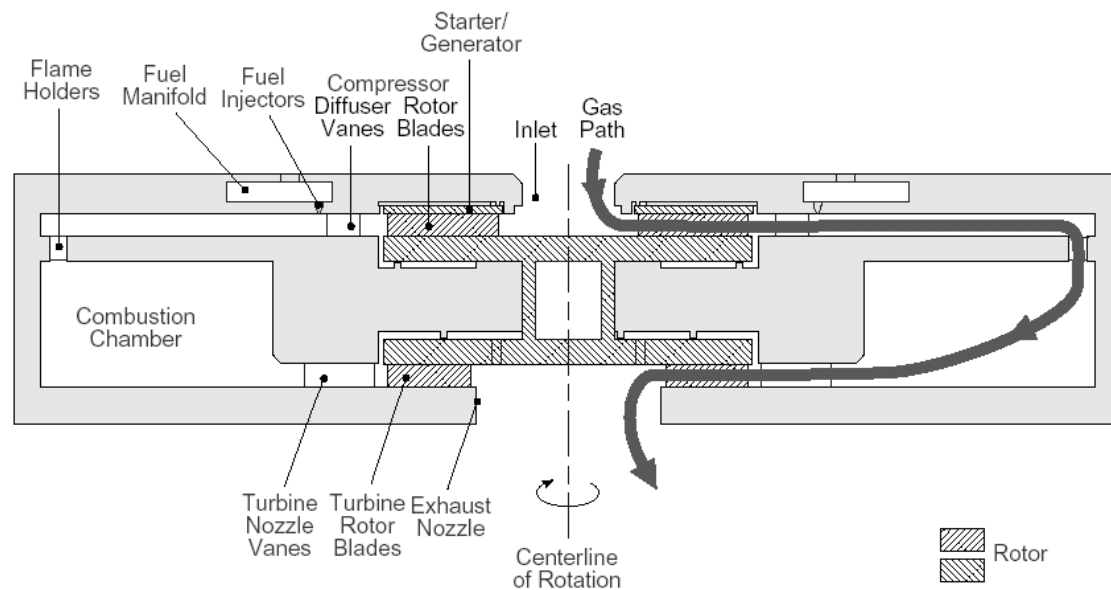
## MEMS prijenosni mehanizam



Planarni prijenosni mehanizam  
sa 6 zupčanika.



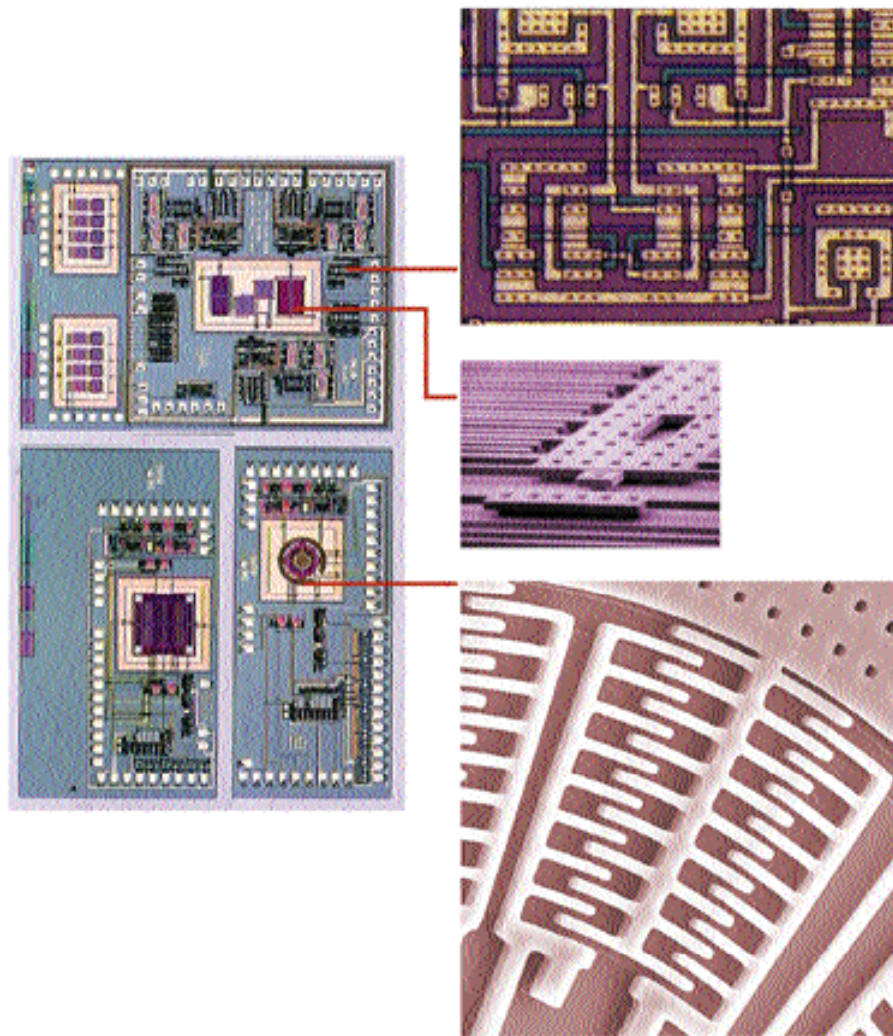
## MEMS mikroturbina



- 80 W gasna turbina dizajnirana i izgrađena na MIT-u za MEMS energetske aplikacije.

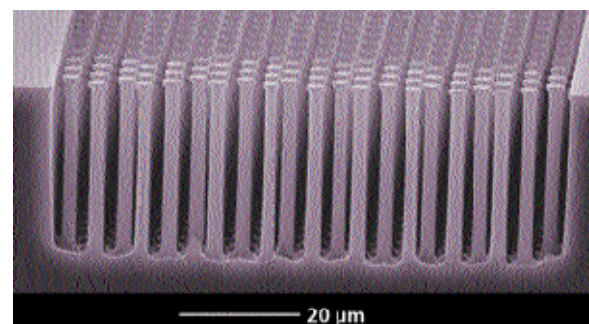
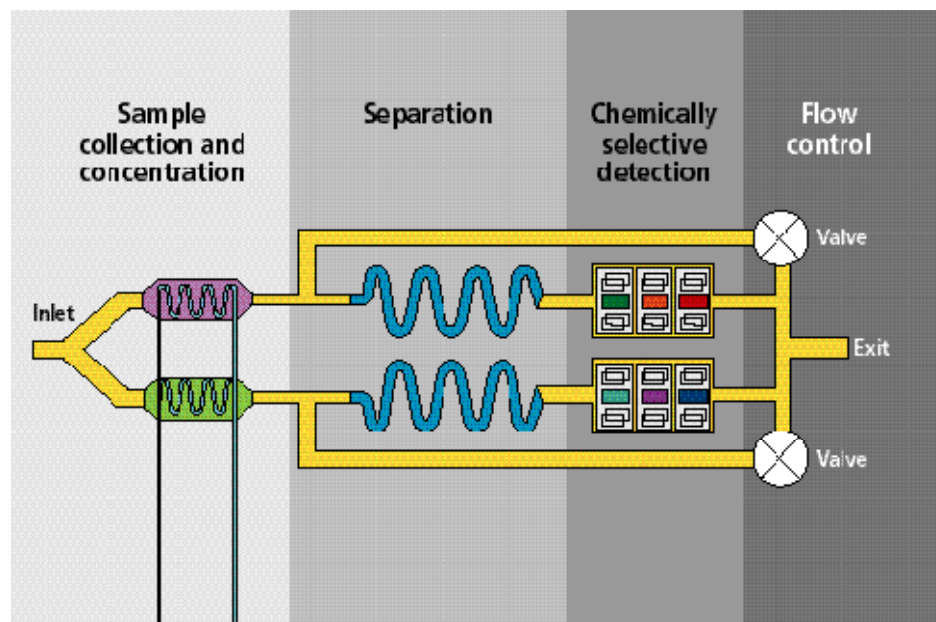
## Integrirani MEMS

- Mikro-inercijalni mjerni sistem sa šest stupnjeva slobode koji kombinira mikroelektroničke krugove (gornja desna slika) sa parom mikromehaničkih elemenata: akcelerometar (slika u sredini desno) i žiroskop (donja desna slika).

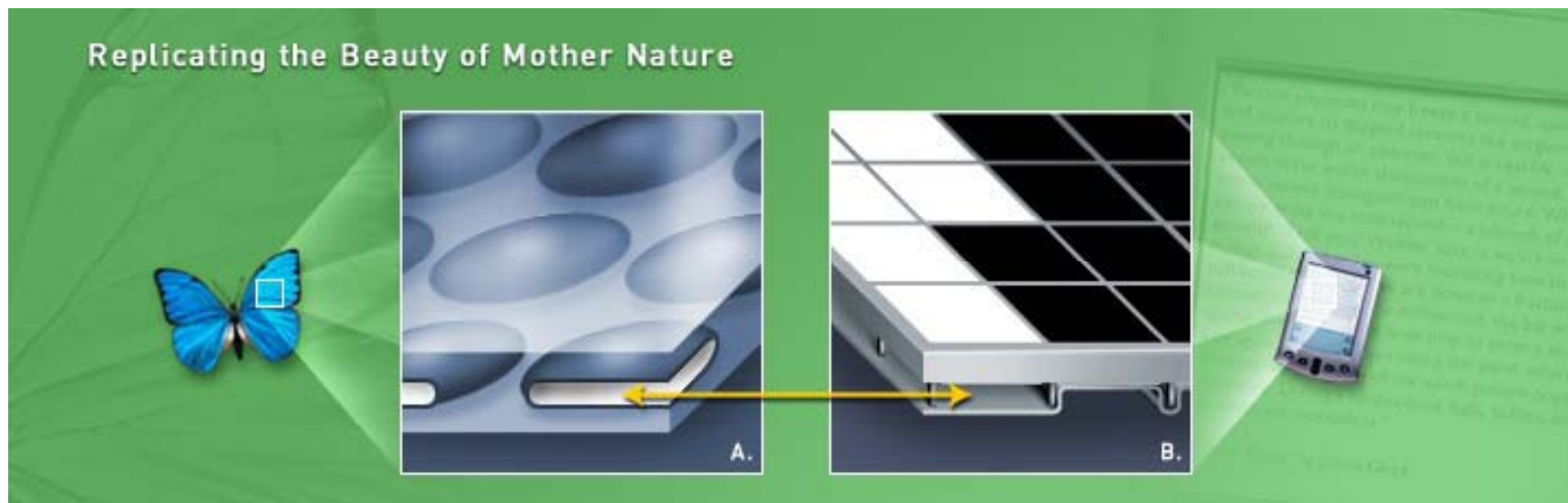


## Integrirani MEMS

- Uzorak kolekcijskih regiona za koncentriranje, mikroseparatoranje kanala, senzorski niz za detekciju i izlazni region su prikazani shematski za hemijsku analizu (**micro-chemlab**). Kemikalije se detektiraju mjerenjem odziva površinskog zvučnog vala na prisustvo kemikalija.
- Fotograf** je polje mikrostrojno obrađenih 3- $\mu\text{m}$  silicijskih "listova" u mikrokanalu i služi kao alat za povećanje elektrokinetički pogonjene separacije tečnosti.

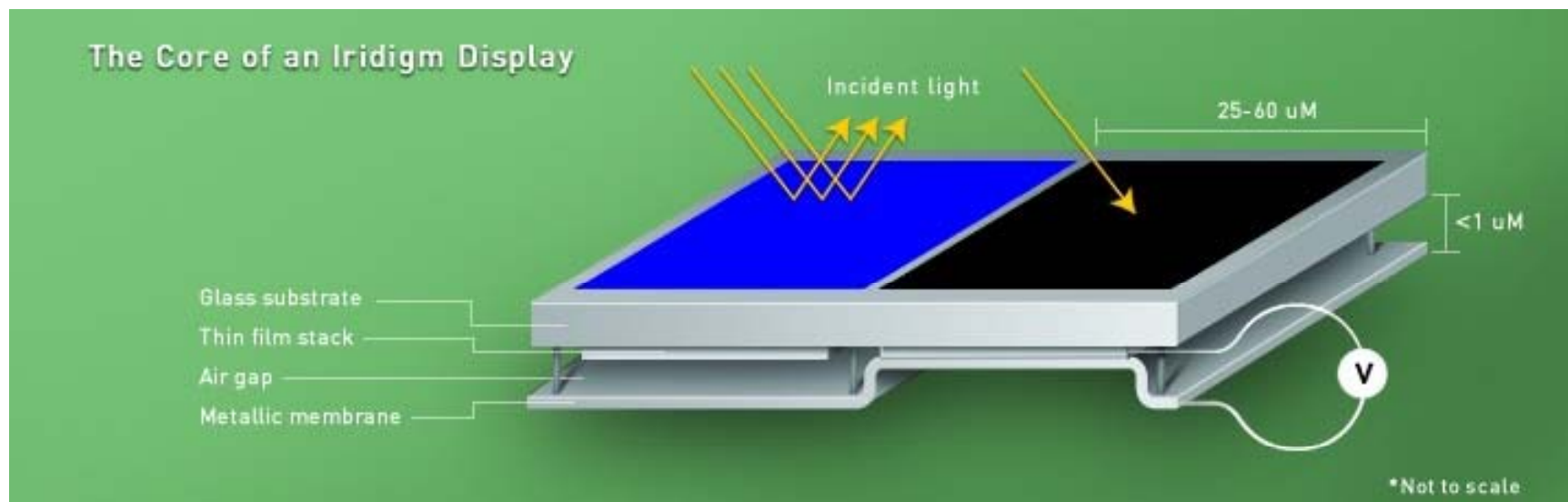


## MEMS zasloni (prikaz)



- Iridigm Display -- iMoD element koristi interferenciju svjetlosti za formiranje boje na potpuno isti način kako se to događa u prirodi.
- Mikroskopske strukture prikazane na krilu leptira i perje pauna uzrokuju interferenciju svjetlosti sa samom sobom, uzrokujući prelijevanje svjetlosti (boja), tako da vidimo boje na ovim stvorenjima.
- Ovaj princip se koristi i u PDA-ovima.

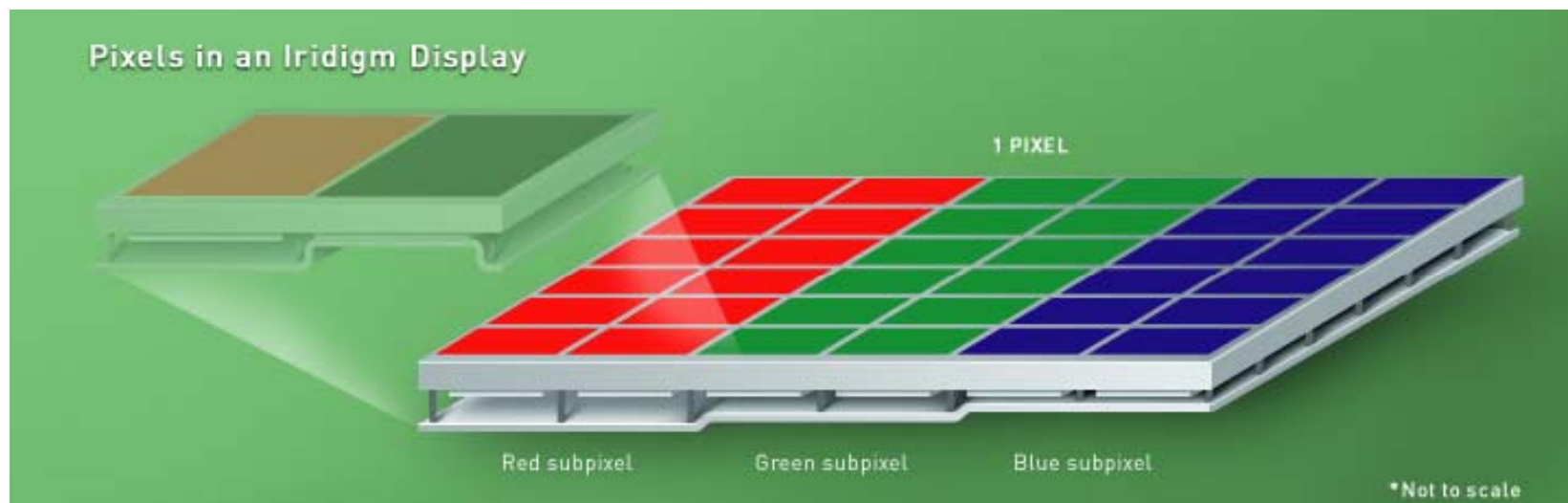
## MEMS zasloni (prikaz)



- iMoD element je jednostavan MEMS uređaj koji se sastoji od dvije vodljive ploče (elektrode).
- Jedna ploča je tanka vrpca smještena na supstratu stakla, dok je druga metalna membrana odvojena od prve ploče zračnim rasporom manjim od 1  $\mu\text{m}$ .
- iMoD element ima **dva stabilna stanja**. **Kada nema napona**, ploče su odvojene i svjetlost udara na supstrat i reflektira se. **Kada se dovede (prikluči) mali napon**, ploče se istovremeno šire djelovanjem elektrostatičke privlačne sile. Na ovaj način se svjetlost apsorbira i element postaje crn.



## MEMS zasloni (prikaz)



- iMoD elementi su minijturni, tipično 25-60 mikrona po stranici (400-1,000 dpi).
  - Stoga se mnogi iMoD elementi udružuju i zajedno formiraju piksele, ili dijelove piksela u boji zaslona.
  - Boja iMoD elementa je određena sa razmakom (rasporom) između ploča. Najmanji razmak daje plavu boju, a najveći crvenu boju.
  - Da bi se kreirao ravni ekran, veliko polje iMoD elemenata se mikrostrojno obrađuje u željenom formatu (npr. 5" full color VGA) i pakira. Na kraju se čipovi učvršćuju jedan za drugi i na taj način formira ekran (zaslon).
- MEMS komponente su omogućile gradnju ravnih ekrana.**

## 11.2. Piezoelektrički materijali

- Piezoelektricitet opisuje fenomen generiranja električkog naboja u materijalu kada se on podvrgne mehaničkom pritisku (direktni efekat) i obratno, generira mehanički pritisak kao odziv na primijenjeno električko polje (napon).
- Piezoelektrički efekat su otkrili Pierre i Jacques Curie 1880 godine. Oni su pokazali da se električki potencijal može generirati mehaničkim pritiskom na kvarc (ovo je poznato pod imenom **piezo efekat**).
- Kasnije je otkriven i **inverzni piezo efekat**, tj. da se dovođenjem napona na kristal mijenja njegov oblik.
- Prva komercijalna primjena inverznog piezo efekta je bila u sonarnim sistemima korištenim u prvom svjetskom ratu.
- Prodor u ovoj oblasti je načinjen 1940-tih godina kada su znanstvenici pronašli **barium titan** koji poprima piezoelektrička svojstva kada se izloži djelovanju električkog polja.

## Piezoelektrični materijali

- Piezoelektrični materijali se koriste za pretvorbu električne u mehaničku energiju, i obratno.
- Vrste piezoelektričnih materijala
  - prirodni i sintetički kristali:
    - kvarc, tourmaline, Rochelle salt (prirodni)
    - litijum sulfat, amonijum dihidrogen fosfat (sintetički)
  - piezokeramički elementi
    - Lead Zirconate Titanate (PZT)
    - barium titanat, kadmium sulfat
  - piezoelektrički polimer
    - poliviniliden fluorid (PVDF)

## Piezoelektrički materijali

- Piezoelektrički materijali pripadaju klasi materijala poznatoj pod imenom **feroelektrici**. Piezoelektrički kristali prirodno iskazuju piezoelektrički efekat, bez bilo kakve obrade.
- **Piezoelektrička keramika** (PZT keramika) je najviše korištena vrsta materijala za primjene aktuatora.
- Prije polarizacije, PZT kristali imaju **simetrične kubične jedinične ćelije**. Na temperaturama nižim od Curie-jeve laticna struktura se deformira i postaje **nesimetrična**. Jedinične ćelije pokazuju spontane polarizacije, tj. pojedinačni PZT kristali su piezoelektrički.
- Piezoelektrička keramika se mora polarizirati **primjenom jakog električkog polja na materijal uz njegovo istovremeno zagrijavanje**. Ovi kristali su izotropi prije obrade i nakon obrade iskazuju tetragonalnu simetriju /neizotropičnu strukturu) ispod Curie-jeve temperature.

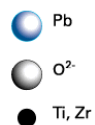
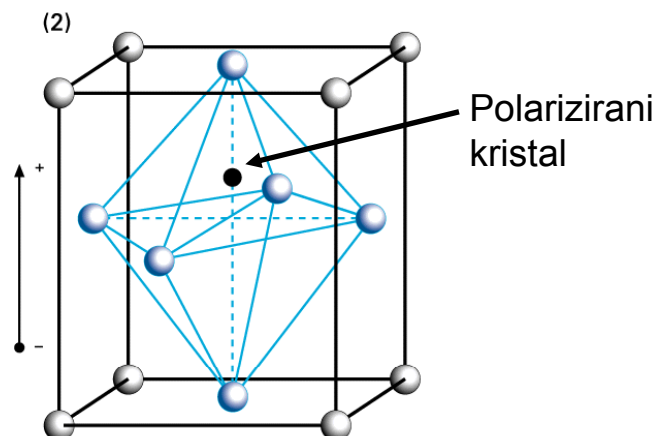
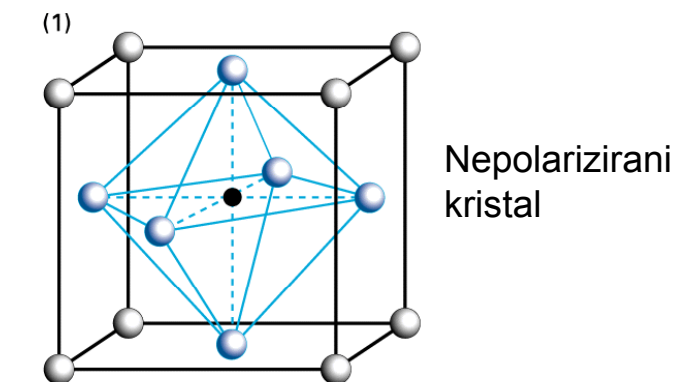
## Piezoelektrički materijali

- Na mikroskopskoj razini materijala, oni su ionski spojevi, zbog čega iskazuju ponašanje električkog dipola. Grupe dipola sa paralelnom orijentacijom se nazivaju **Weiss-ovim domenama**.
- Weiss-ove domene se slučajno orijentiraju u sirovom (neobrađenom) keramičkom materijalu, prije nego što se tretman polarizacije završi. Za ovu svrhu se primjenjuje električko polje ( $> 2000 \text{ V/mm}$ ) na zagrijanu piezo keramiku.
- Zbog feroelektričkih svojstava materijala, moguće je primijeniti permanentnu silu na različite domene korištenjem jakog električkog polja. Ovaj proces se naziva **poling**.

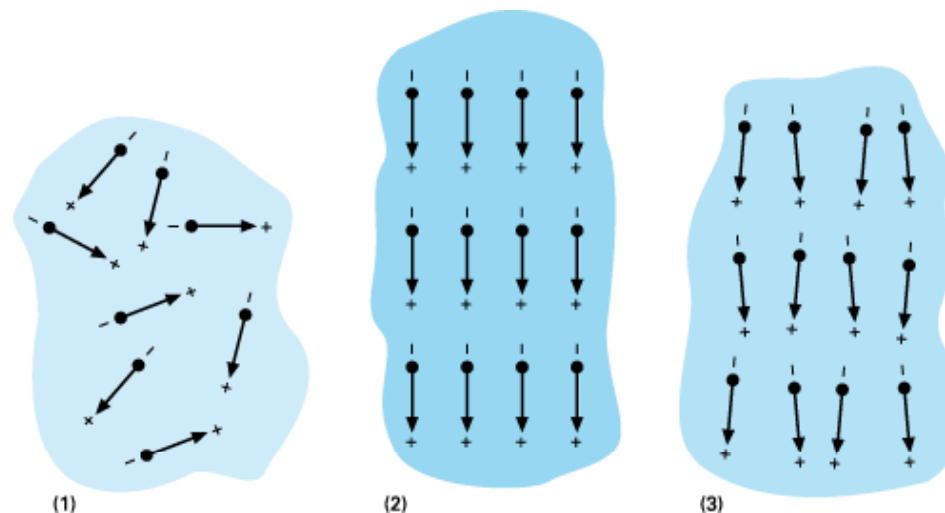
## Piezoelektrički materijali

- Neke PZT keramike se moraju polarizirati na većim temperaturama. Tada će materijal imati zaostalu polarizaciju (koja može biti degradirana premašivanjem mehaničkih, električkih i termalnih ograničenja materijala).
- Kada se primijeni električko polje na polarizirane piezoelektričke materijale, Weiss-ove domene povećavaju njihove dimenzije proporcionalno naponu. **Rezultat je promjena dimenzija** (ekspanzija, kontrakcija) PZT materijala.

# Piezelektrički materijali

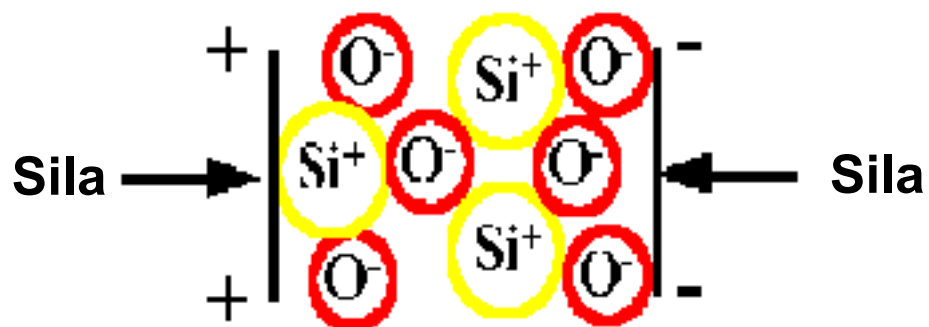


Nakon polarizacije atomi cirkonat titanata su izvan centra. Molekule postaju produžene i polarizirane.



- (1) Nepolarizirane slučajne Weiss-ove domene.
- (2) Proces polarizacije.
- (3) Nakon polarizacije, postoji zaostala polarizacija.

## 11.3. Piezoelektricitet

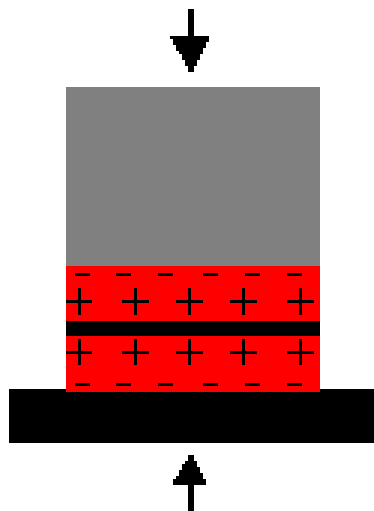


- Pomak električkog naboja usljed defleksije (skretanja) rešetke u piezoelektričkom kvarcnom kristalu.
- Veći krugovi predstavljaju atome silicija, dok manji predstavljaju oksigen.
- Kvarcni kristali su jedni od najstabilniji piezoelektričkih materijala.

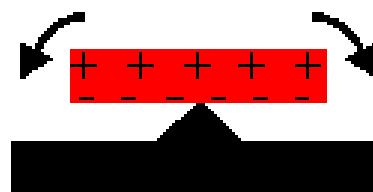


## Piezelektrične konfiguracije

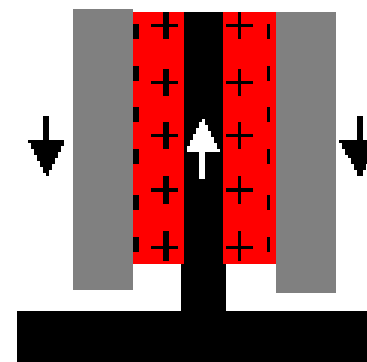
- Crvena boja predstavlja kristal.
- Strelice prikazuju smjer djelovanja sile.
- Karakteristike sabijanja piezelektričnog materijala odlikuju se visokom krutošću, što ih čini korisnim za implementaciju u visokofrekvencijskim senzorima tlaka i sile.



Sabijajuća



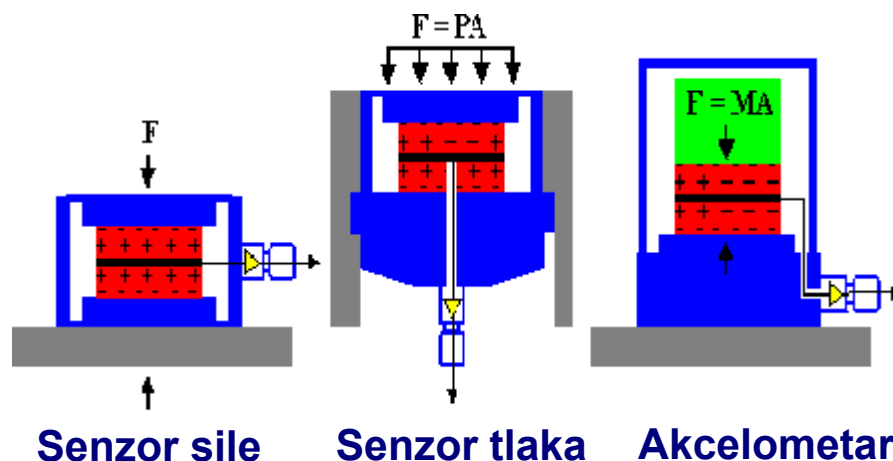
Savijajuća



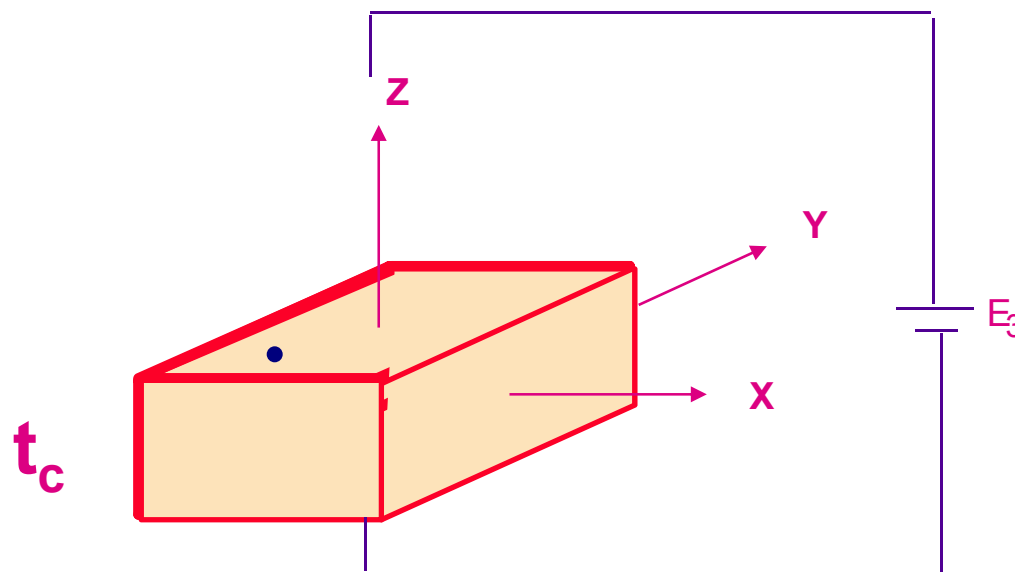
Ostrižajuća

## Piezelektrične konfiguracije - senzori

- Zelena boja - testna struktura.
- Crvena boja – piezoelektrički kristali.
- Plava boja – kućište senzora.
- Crna elektroda se nalazi na mjestu gdje se naboj iz kristala akumulira prije nego je uvjetovan žutim, mikro krugom.
- Senzori tlaka iskorištavaju dijafragmu za zbrajanje tlaka, koji predstavlja silu narinutu na površinu.



## Piezoelektrički element



- **Pozitivan napon u z smjeru (smjer polarizacije) uzrokuje:**

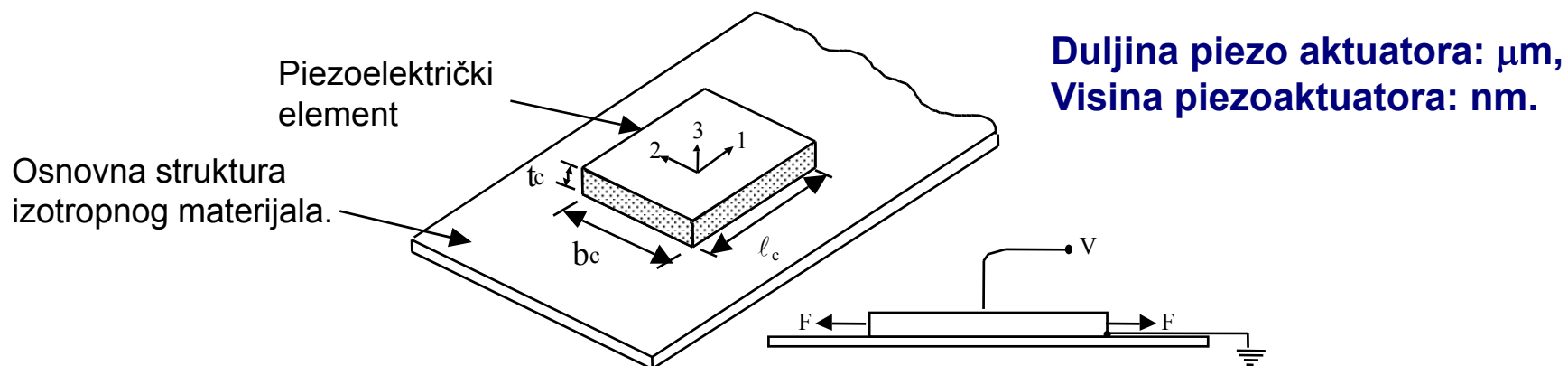
$$\varepsilon_x = d_{31} V / t_c \quad (\text{kontrakcija})$$

$$\varepsilon_y = d_{31} V / t_c \quad (\text{kontrakcija}) \quad \text{Ostrižajuće naprezanje} = 0$$

$$\varepsilon_z = d_{33} V / t_c \quad (\text{proširenje})$$

$$d_{31} \text{ i } d_{33} \text{ su piezoelektrički koeficijenti naprezanja, in/volt}$$
- **Potencijal (napon) u x i y smjerovima će rezultirati samo u ostrižajućim naprezanjima.**

## Piezo aktuator montiran na površinu



**Maksimalno slobodno naprezanje piezo elementa:**

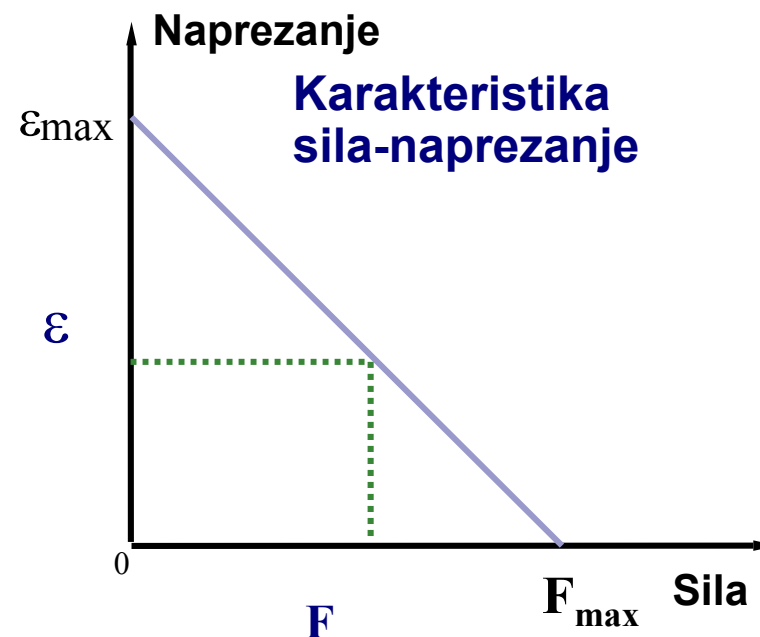
$$\varepsilon_{\max} = d_{31} V/t_c$$

**Maksimalna sila blokiranja (bez naprezanja):**

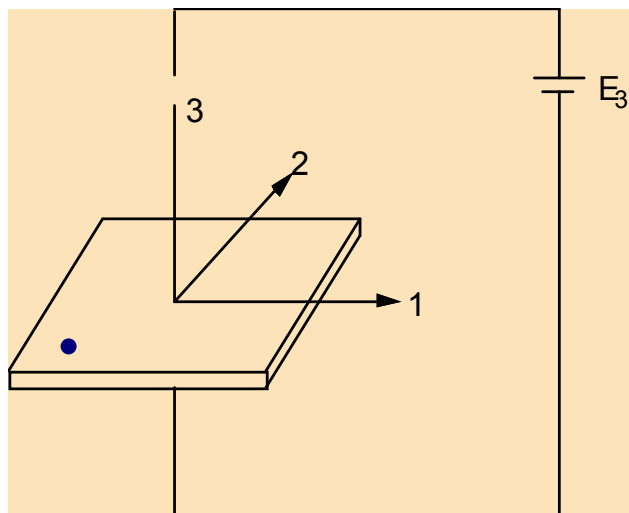
$$F_{\max} = d_{31} E_c b_c V$$

Piezo element duljina 2", širine 1/2"  
i debljine 12.5 mm će proizvesti maksimalnu  
napetost od 86 microstrains i blok silu od 5.6  
lb.

Za najveći broj aplikacija, naprezanje je  
pre malo.



## Konstitutivne relacije piezo aktuatora



### Konverzacijski efekt

$d_{31}$  = naprezanje u smjeru 1 ili 2  
usljed djelovanja električnog  
polja  $E_3$ .

$$\begin{array}{c}
 \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{array} \right\} = \begin{array}{c} \left[ \begin{array}{ccccccc} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} & 0 \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{array} \right\} + \begin{array}{c} \left[ \begin{array}{ccc} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} \Delta T
 \end{array}
 \end{array}$$

naprezanje

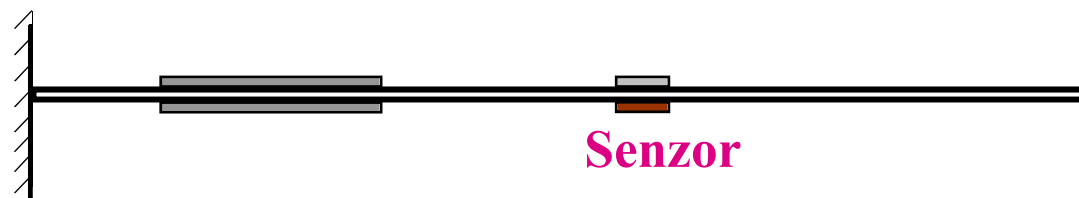
mehanički dio

piezo

termalni

## Konstitutivne relacije piezo aktuatora

Direktni efekt



$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{25} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11}^\sigma & 0 & 0 \\ 0 & e_{22}^\sigma & 0 \\ 0 & 0 & e_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \Delta T$$

Pomak naboja                      mehanički dio                      polje                      termalni

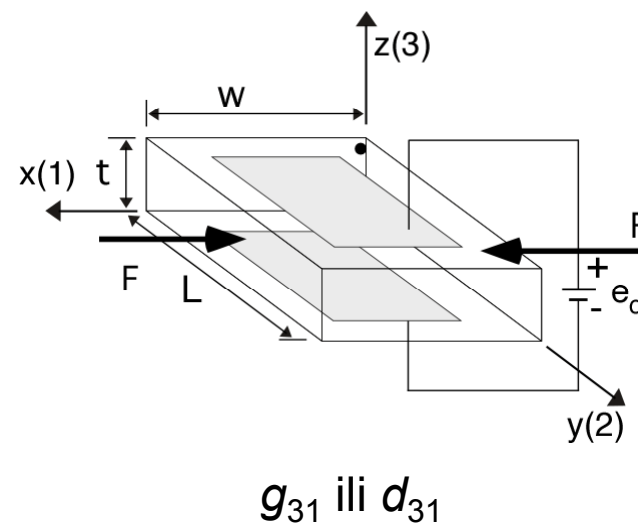
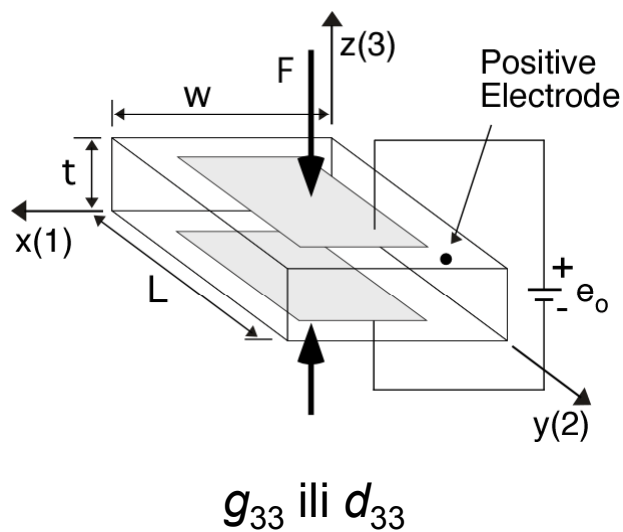
Napomena: za piezo film  $d_{31} \neq d_{32}$

## 11.4. Piezoelektrički koordinatni sistem

- Zbog neizotropnih svojstava PZT keramike, piezoelektrički efekti ovise o smjeru polarizacije.
- Za identifikaciju smjera uvode se osi 1, 2 i 3 (odgovaraju osima X, Y i Z standardnog desnoorijentiranog koordinatnog sistema).
- Smjer polarizacije (os 3) se uspostavlja tokom procesa polarizacije sa primijenjenim jakim električkim poljem između dviju elektroda.
- Za linearne aktuatorne (translator), piezo svojstva duž osi polarizacije su najvažnija (najveća deflekcija (skretanje)).

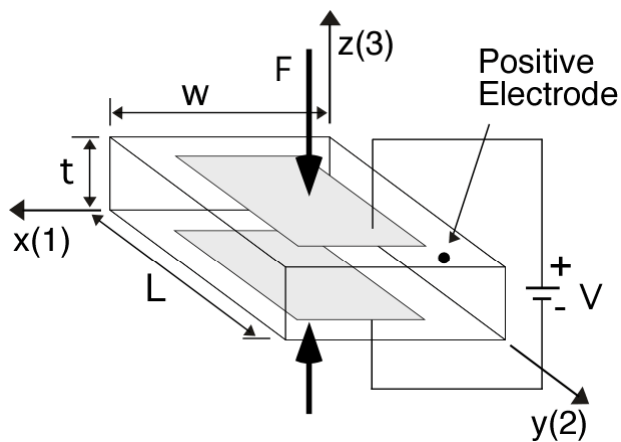
## Piezelektrički koordinatni sistem

- Ponašanje materijala je definirano konstantama  $g$  i  $d$ .
- Za **piezelektričke konstante**  $g_{ij}$  i  $d_{ij}$ , prva vrijednost ( $i$ ) u indeksu predstavlja os inicijalne polarizacije. Ovo je obično os sa kojom su elektrode (ploče) paralelne.
- Druga vrijednost ( $j$ ) odnosi se na mehaničku os ili os narinutog opterećenja ili os naprezanja.





## Piezelektrički koeficijenti $g_{ij}$ (naponski koeficijenti)



$$g = \frac{\text{Razvijeno polje [V/m]}}{\text{Primije. pritisak [N/m}^2\text{]}} = \frac{\text{Razvijeno naprezanje [m/m]}}{\text{Primijenjena gustoća naboja [C/m}^2\text{]}}$$

$$g_{33} = \frac{e_0/t}{F/wL}$$

$$g_{33} = \frac{\Delta t/t}{\varepsilon_0 C/Lw}$$

$$Q = Ce_0$$

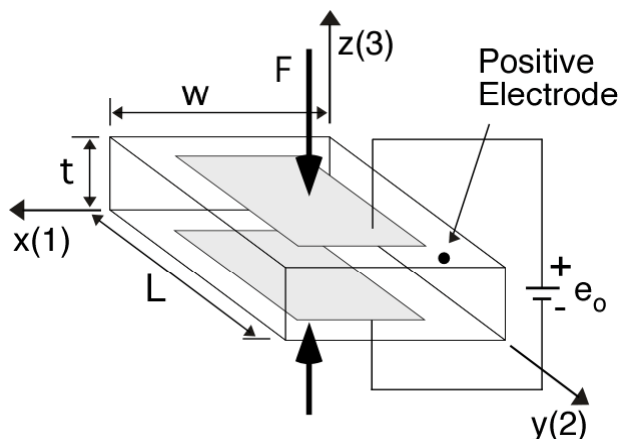
$$C = K\varepsilon_0 \frac{lw}{t} = \varepsilon \frac{lw}{t}$$

$\varepsilon$  = dielektrička konstanta materijala,  
 $K$  = relativna dielektrička konstanta,  
 $\varepsilon_0$  = dielektrična konstanta slobodnog prostora.

$$\varepsilon = K\varepsilon_0$$

- Važno je napomenuti da je lakše računati konstantu  $g$  iz polje/pritisak relacije.
- Zbog toga se  $g$  koristi za opažanje.

## Piezoelektrički koeficijent $d_{ij}$ (koeficijenti naprezanja)



$$d = \frac{\text{Razvijeno naprezanje [m/m]}}{\text{Primijenjeno polje [V/m]}} = \frac{\text{Gustoća naboja [C/m}^2\text{]}}{\text{Primijenjeni pritisak [N/m}^2\text{]}}$$

$$d_{33} = \frac{\Delta t/t}{e_0/t}$$

$$d_{33} = \frac{Ce_0/Lw}{F/wL} = \frac{Ce_0}{F} = \frac{Q}{F}$$

$$Q = Ce_0$$

$$C = \varepsilon \frac{Lw}{t}$$

$$\Delta t = d_{33} \frac{e_0}{t} t = d_{33} e_0$$

- Napomena: lakše je računati konstantu  $d$  iz naprezanje/polje relacije, tako da se  $d$  koristi za deflekciju.

## Veza između $g$ i $d$

- Iz prethodne stranice slijedi:

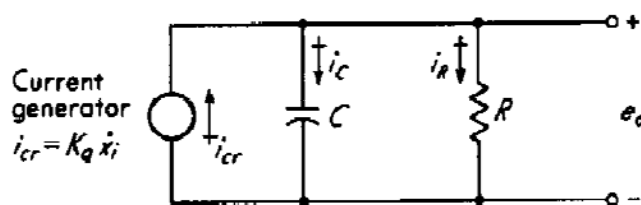
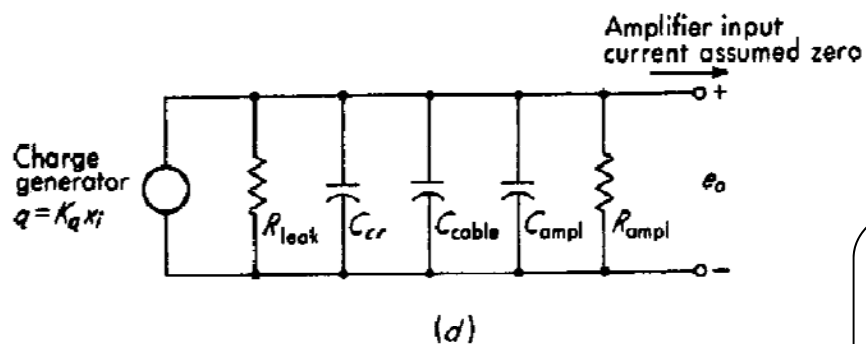
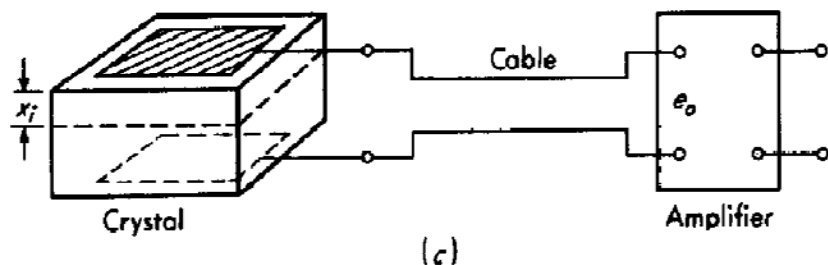
$$g_{33} = \frac{e_o/t}{F/Lw} = \frac{e_o Lw}{Ft} \quad \text{ali} \quad \frac{C}{\varepsilon} = \frac{Lw}{t} \quad g_{33} = \frac{e_o C}{F\varepsilon} = \frac{Q}{\varepsilon F} = \frac{d_{33}}{\varepsilon}$$

Za kvarc:  $\varepsilon = 4.06 \times 10^{-11}$

Za Barium Titanat:  $\varepsilon = 1250 \times 10^{-11}$

$$d_{33} = \varepsilon g_{33}$$

# 11.5. Statičko i dinamičko ponašanje piezo aktuatora – pomak usljed djelovanja napona



$$R \triangleq \frac{R_{\text{ampl}} R_{\text{leak}}}{R_{\text{ampl}} + R_{\text{leak}}} \approx R_{\text{ampl}}$$

$$C \triangleq C_{\text{cr}} + C_{\text{cable}} + C_{\text{ampl}}$$

Napajanje generirano sa deformacijom kristala

$$q = K_q x_i$$

$K_q$  = konstanta, C/m

$x_i$  = skretanje, cm

$$i_{cr} = \frac{dq}{dt} = K_q \left( \frac{dx_i}{dt} \right)$$

$$i_{cr} = i_c + i_R$$

$$e_o = \frac{\int i_c dt}{C} = \frac{\int (i_{cr} - i_R) dt}{C}$$

## Pomak usljed djelovanja napona – dinamički odziv

- Uzimajući u obzir prethodne jednadžbe dobiva se, nakon kratkih manipulacija, sljedeća jednadžba:

$$\tau \left( \frac{de_o}{dt} \right) + e_o = K \tau \left( \frac{dx_i}{dt} \right)$$

(ili u “D” notaciji)

$$\frac{e}{x_i}(D) = \frac{K \tau D}{\tau D + 1}$$

$$K \equiv \frac{K_q}{C} [V / cm] \quad \text{- osjetljivost} \quad \tau \equiv RC [s]$$

## Osjetljivost – propusni opseg

- Prethodno je naglašeno da povećanje propusnog opsega (frekvencijsko područje) aktuatora često zahtijeva smanjenje osjetljivosti.
- Promatrajmo amplitudu frekvencijske karakteristike:

$$\left| \frac{e_o}{x_i}(\omega) \right| = \frac{K\tau\omega}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

gdje je  $\tau = RC$

$$\phi = 90 - \tan^{-1}(\omega\tau)$$

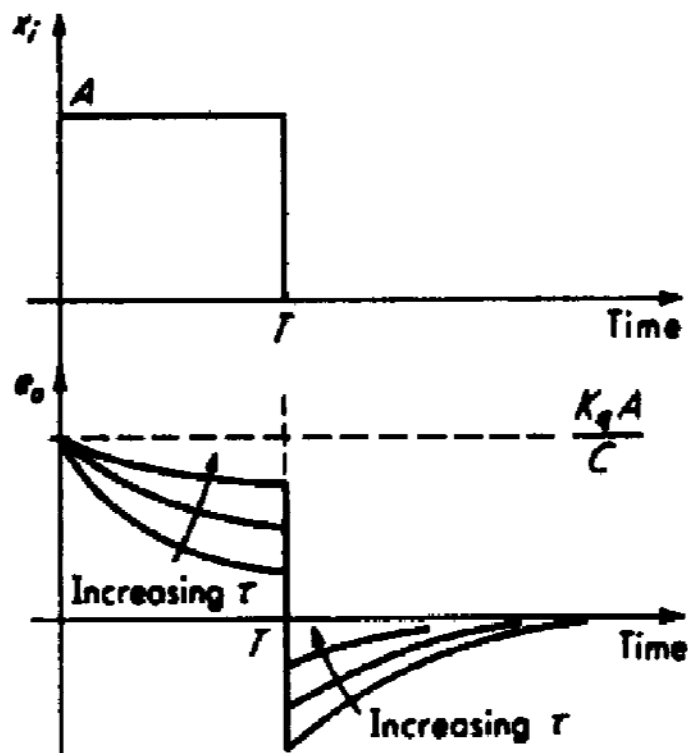
- Za povećanje propusnog opsega potrebno je povećati  $\tau$ , što općenito znači da je potrebno smanjiti  $C$ . (Zašto ne povećati  $R$ ?)

Jer  $K \equiv \frac{K_q}{C} [V/cm]$

Povećanjem  $C$  smanjuje se  $K$ !!

## Pomak usljed djelovanja napona – odziv

- Odziv u stacionarnom stanju na skokoviti ulaz  $x_i$  je nula.



### Računanje odziva:

$$(\tau D + 1)e_o = K \tau D x_i$$

$$\text{Za: } x_i = A, \quad 0 < t < T$$

$$(\tau D + 1)e_o = 0$$

$$t = 0$$

$$q = K_q x_i \longrightarrow e_o = \frac{K_q A}{C}$$

$$e_o = C_1 e^{-t/\tau} \longrightarrow C_1 = \frac{K_q A}{C}$$

$$\text{Za: } T < t < \infty \text{ novi I.C.}$$

## Statička/dinamička osjetljivost

- Budući da rad piezo aktuatora ovisi o primijenjenom naponu, odnosno promjeni tog napona, **kapacitivnost samog piezo aktuatora je od fundamentalne važnost.**
- Uzima se da je  $C \sim 10^{-9}$  F. (ovo je prilično velik kapacitet, ali ne toliko velik da bismo mogli ignorirati kapacitivnost ostalih komponenti sistema).
- Unutarnja otpornost piezo aktuatora je veoma visoka ( $R \sim 10^{11}$   $\Omega$ ). Zbog toga je **otpornost drugih komponenti sistema** (kablovi, pojačala, mjerni uređaji, itd.) **od fundamentalne važnosti.**

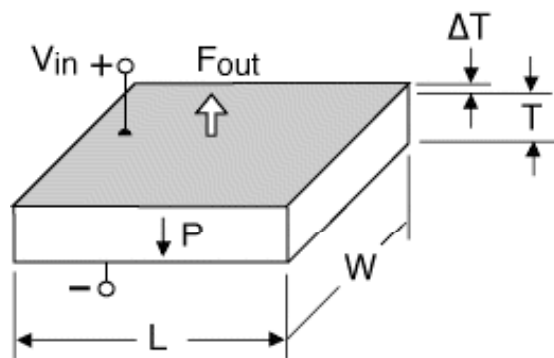


## Primjer: Statička/dinamička osjetljivost

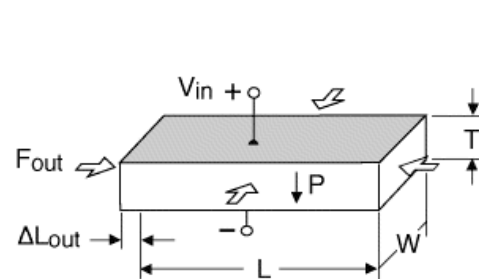
Piezoelektrički pretvornik ima kapacitet 1,000 pF i  $K_q$  od  $10^{-5}$  C/in. Kabel koji povezuje pretvornik ima kapacitivnost od 300 pF, dok osciloskop ima ulaznu impedanciju sastavljenu od paralelnog spoja radnog otpor  $1\text{ M}\Omega$  i kapaciteta 50 pF.

- a. Kolika je osjetljivost (V/in) samog pretvornika?
- b. Kolika je visokofrekvencijska osjetljivost ukupnog sistema?
- c. Kolika je najmanja frekvencija koja se može izmjeriti sa 5 % pogreške amplitude?
- d. Kolika mora biti vrijednost paralelno vezanog C-a da bi se proširilo područje od 5 % pogreške 10 Hz?
- e. Ako se koristi C dobiven u tački d) kolika će biti visokofrekvencijska osjetljivost sistema?

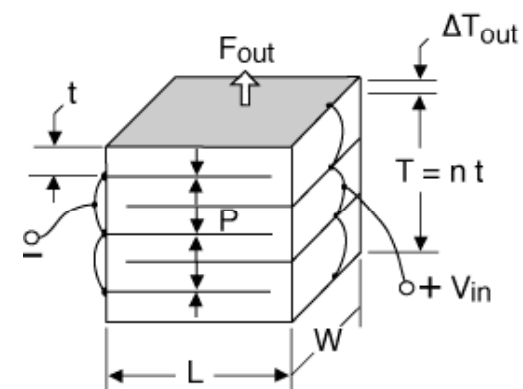
## 11.6. Tipovi piezo akuatora



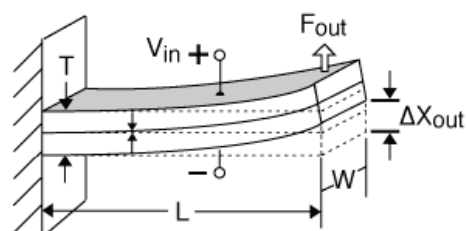
Uzdužna ploča



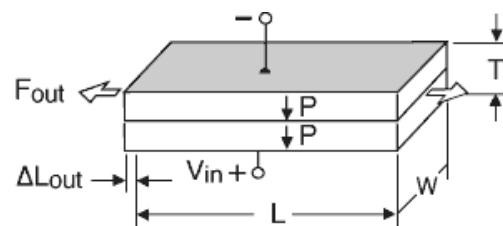
Poprečna ploča



Slog (Stack) akuator



Bimorfni akuator  
(zakrivljeni)



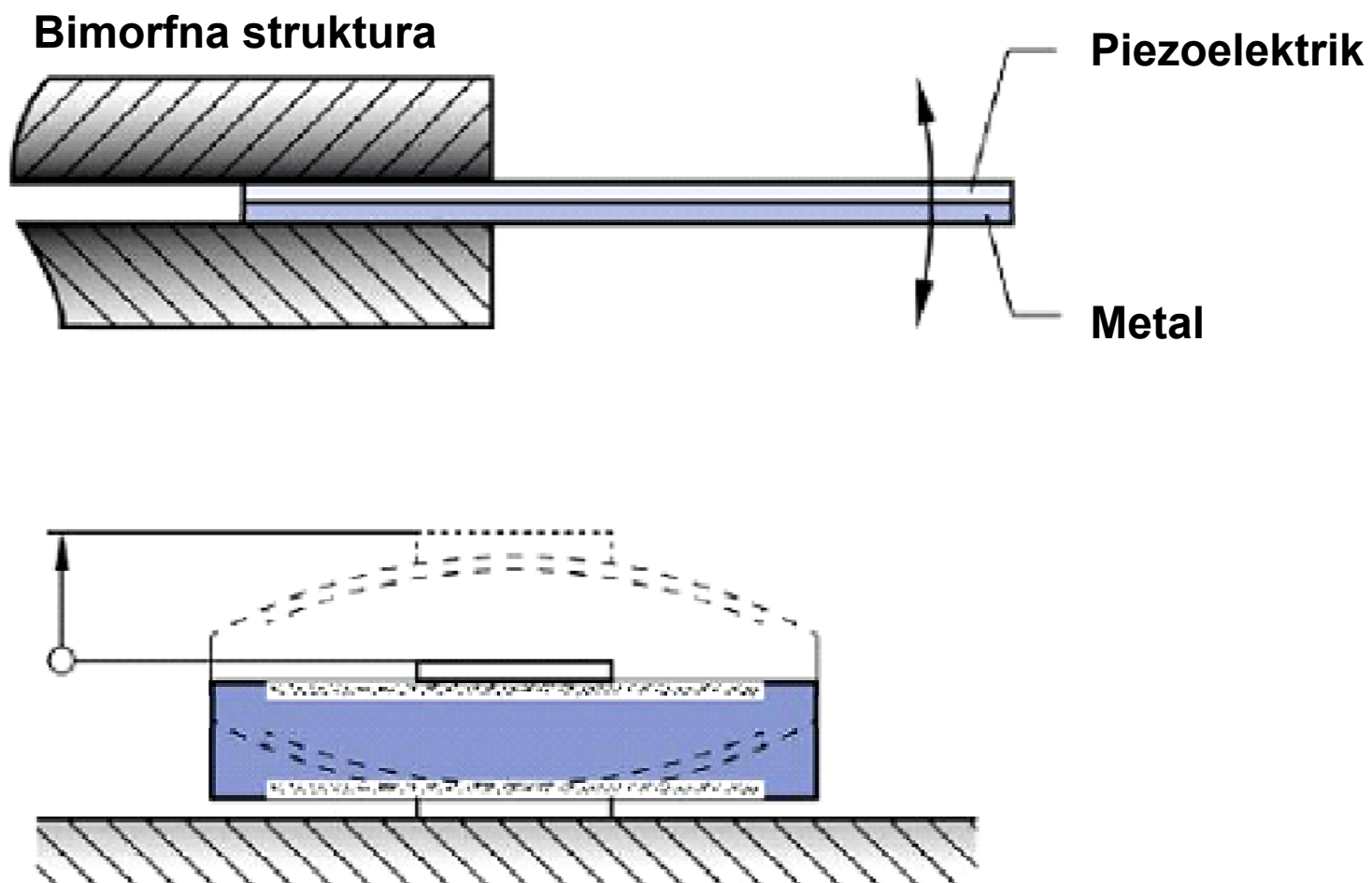
Bimorfni akuator  
(prošireni)

## Tipovi piezo aktuatora

- **Longitudinalni i transferzalni wafer-i (oblatne):** Kada električko polje ima isti polaritet i orijentaciju kao originalno polje polarizacije postavljeno uzduž pojedinačne ploče piezokeramike, tada se piezokeramika širi u longitudinalnom smjeru (tj. duž osi polarizacije) i skuplja se u transferzalnom smjeru (okomito na os polarizacije). Kada se promijeni smjer djelovanja polja tada se događa suprotni efekat.
- **Unimorfni:** predstavlja jednoslojni piezoelektrički element postavljen na podlogu. Mogu se proizvesti da se izdužuju, iskrivljuju ili uvijaju ovisno o polarizaciji, obliku elektrode i konfiguraciji ožičenja slojeva. Podmetač laminiran između dva piezo sloja povećava mehaničku snagu i čvrstoću i pojačava iskrivljenje.
- **Bimorfni:** dvoslojni elementi koji se mogu izdužiti, iskriviti ili uvijati ovisno o polarizaciji i konfiguraciji ožičenja slojeva. Centar lameliranog podmetača između dva piezo sloja povećava mehaničku snagu (silu) i čvrstoću, ali reduciraju kretanje.
- **Slog aktuatori:** formiraju se od velikog broja piezo slojeva (wafer-a) kombiniranih u monolitnu strukturu. Sićušni pomaci svakog pojedinačnog sloja sudjeluju u ukupnom pomaku.

## Tipovi piezo aktuatora

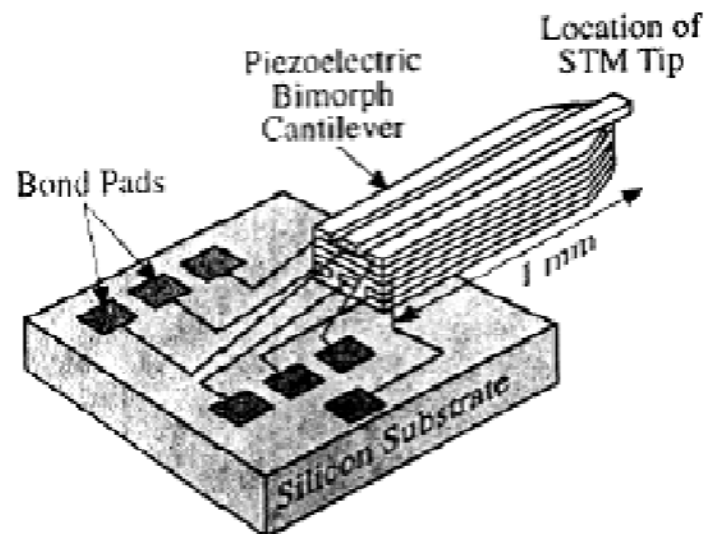
### Piezo aktuator kao mikro zvučnik



## Tipovi piezo aktuatora

### Višeslojni piezoelektrički aktuator

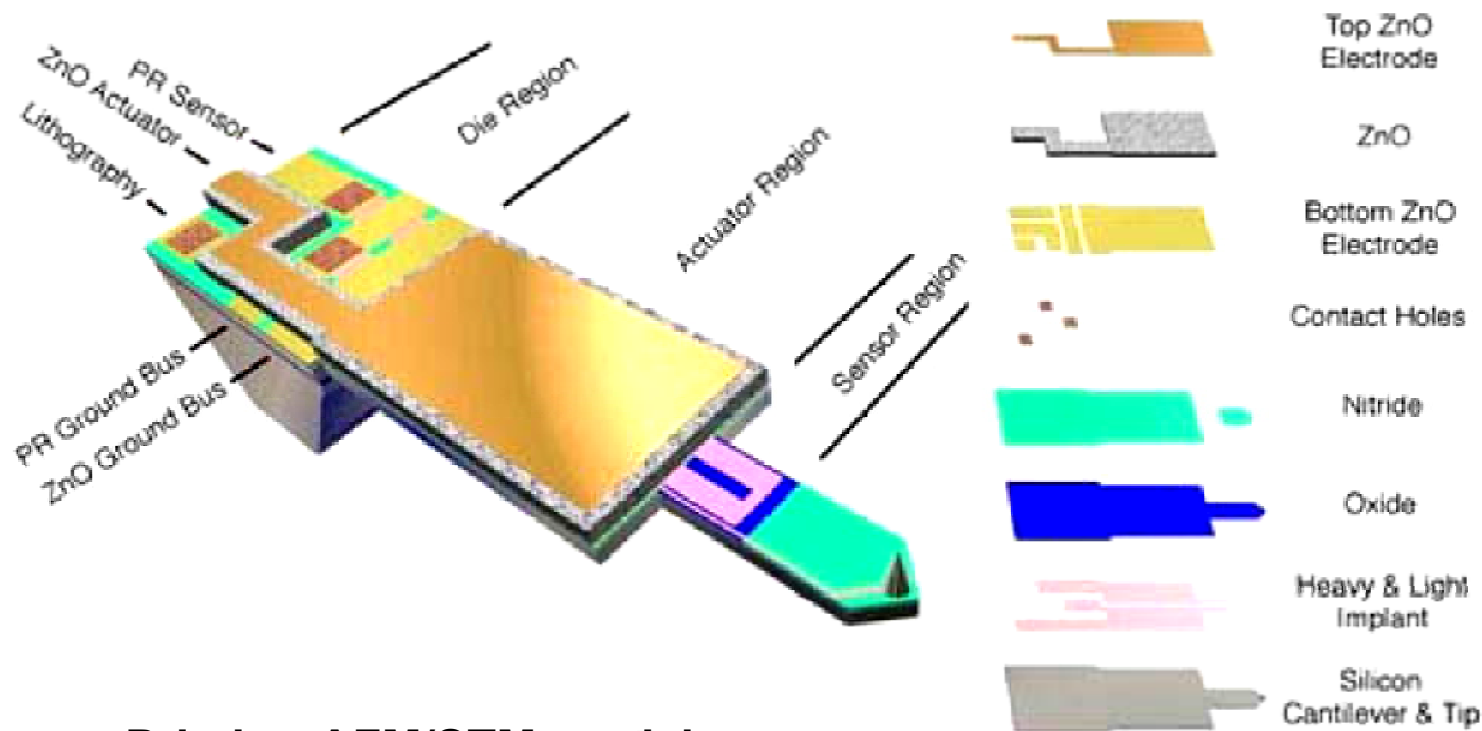
- Nekoliko slojeva piezoelektričkog materijala se nanosi na podlogu.
- Svaki sloj doprinosi minimalnim pomjeranju. Ukupni pomak predstavlja algebarsku sumu pojedinačnih pomaka, pa zbog toga oni trebaju biti u fazi.
- Standardno se primijenjuju naponi od 10 do 50 V.
- Ovaj aktuator karakterizira histereza.



## Tipovi piezo aktuatora

### Piezoelektrički nanopozicioner

- Piezo filmovi na MEMS uređajima omogućuju nanometarsko pozicioniranje.

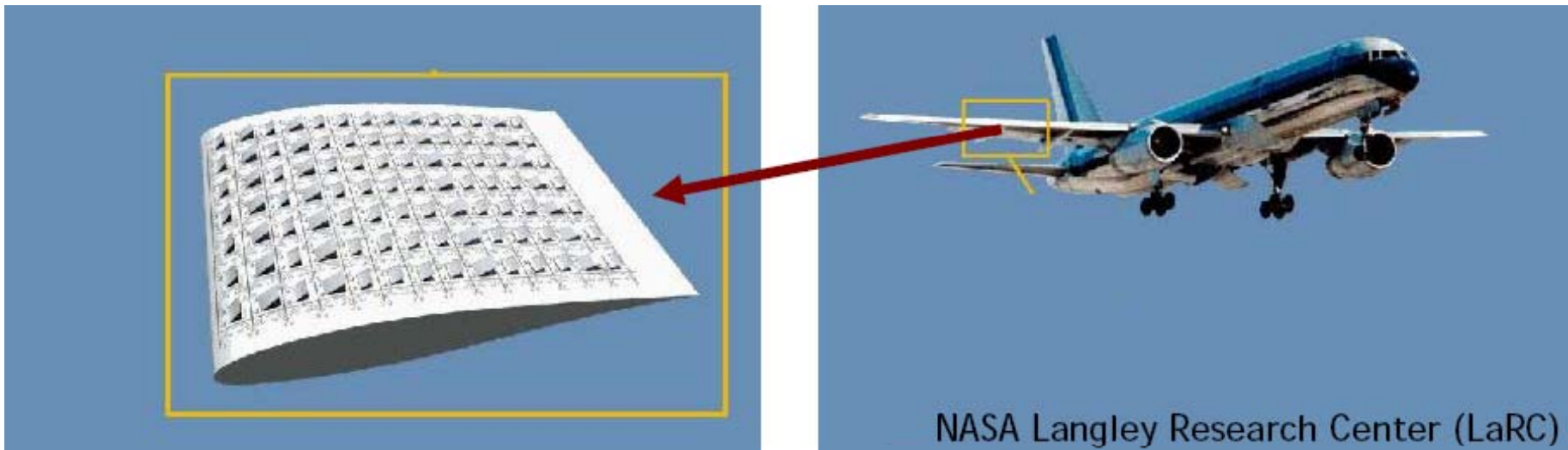


Primjer: AFM/STM uređaj

## Tipovi piezo aktuatora

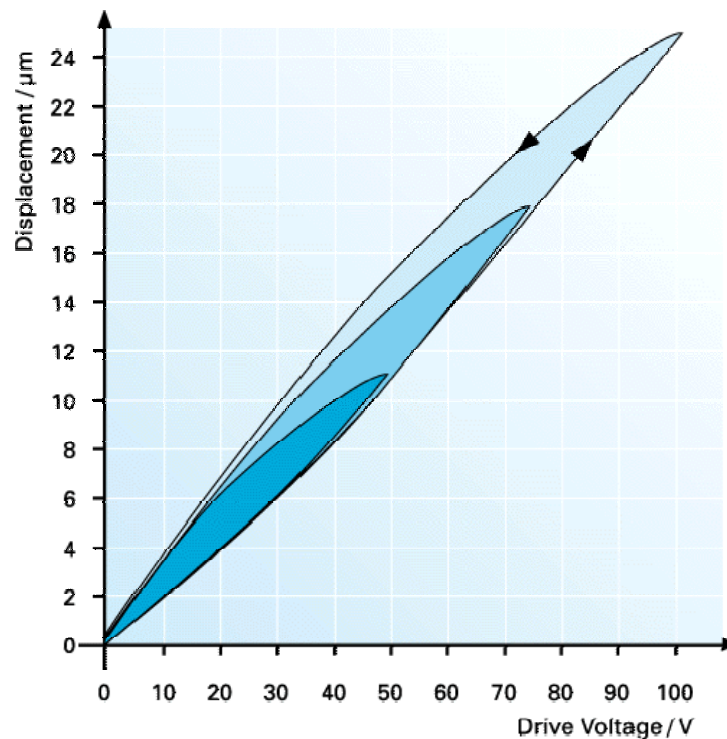
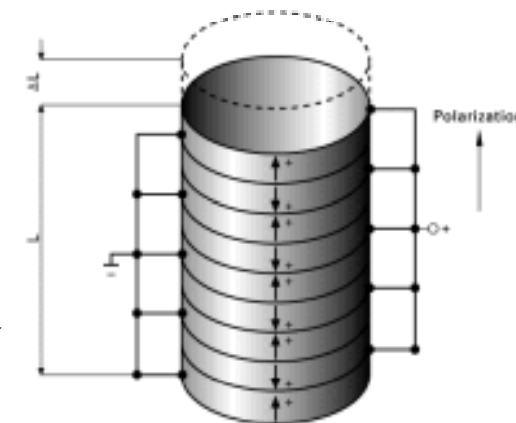
### Mikro aktuator za makro sisteme

- Jaka sila omogućuje piezoelektričkim mikro aktuatorima da se koriste za pogonjenje makro objekata (npr. avion).



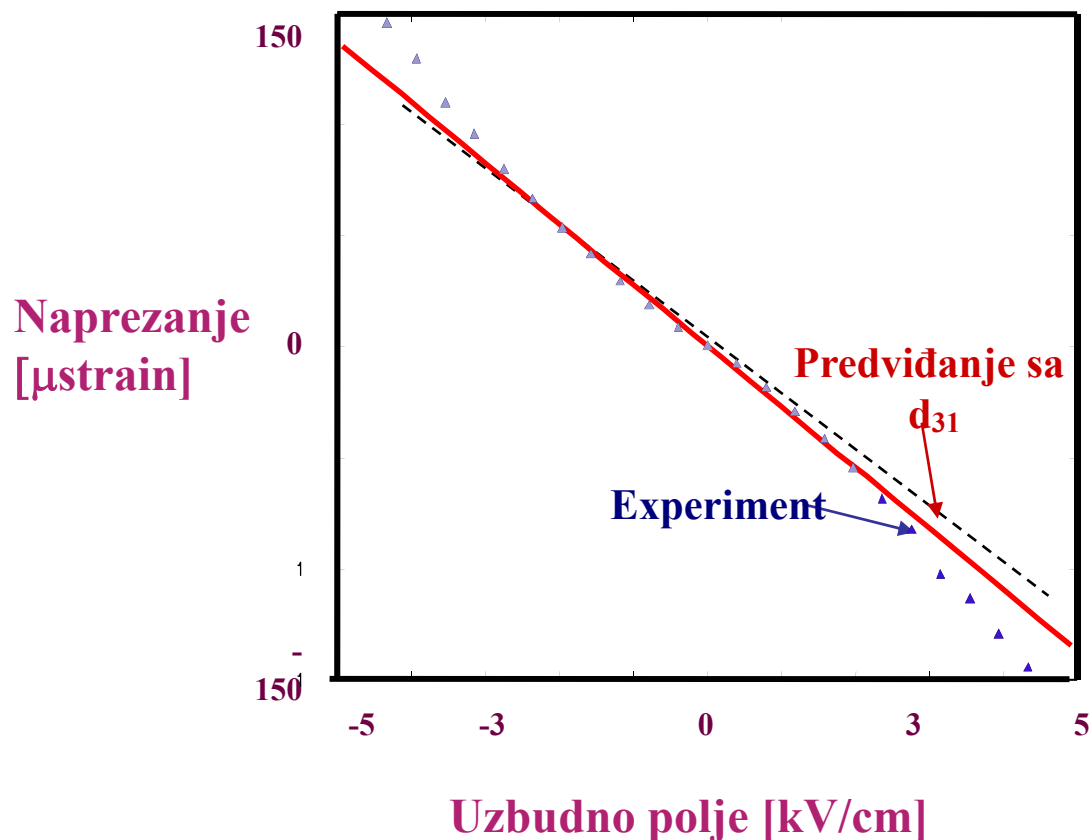
## 11.7. Parametri piezo aktuatora

- PZT (lead zirconate titanate) postaje dulji ili kraći kada se primijeni napon  $V$ .
- Slog (niz) PZT keramičkih diskova sa integralnim elektrodama.
- Tipično 150 Volti,  
 $\Rightarrow \Delta x \sim 10$  mikrona.
- 10-20% histereza.





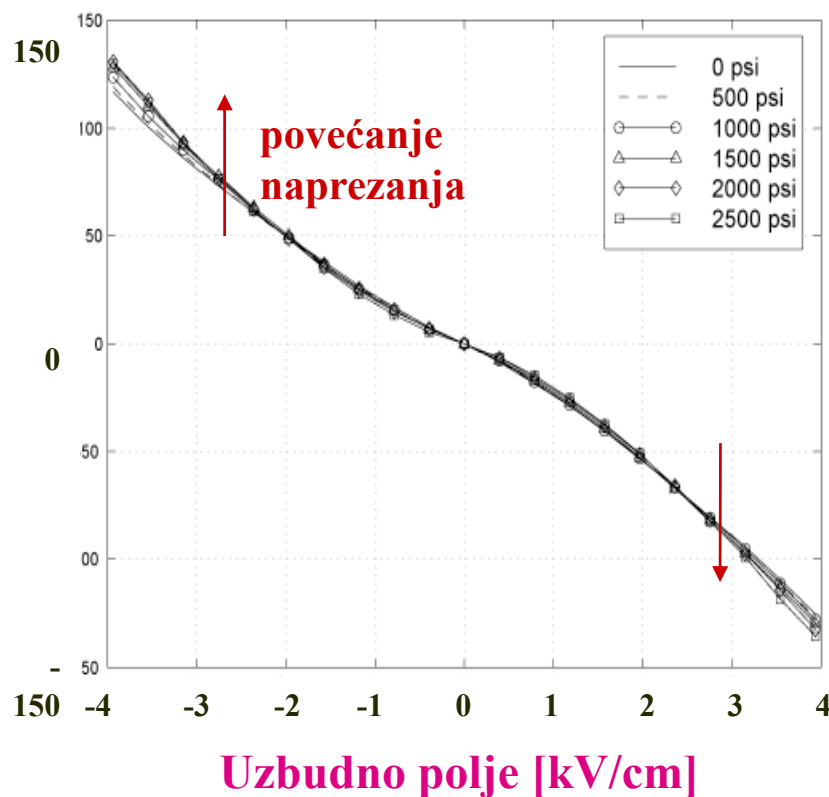
## Statičko ponašanje PZT – 5H



### Testovi statičkog naprezanja

- Uzorci ravnomjerno primijenjeni.
- Mjerač se resetira nakon svakog očitavanja.
- Prosječno se koristi 10 uzoraka.
- Naprezanje je linearno za male iznose polja i nelinearno pri velikim iznosima polja.
- Pozitivni i negativni dijelovi su nesimetrični.
- DC polje ugađanja  $\sim 5.5$  kV/cm

## Tenzorsko naprežanje (Tensile Stress)



Naprežanje  
[μstrain]

Prosječno 10% povećanje slobodnog tenzorskog naprežanja od 2500 psi usljed djelovanja uzbudnog polja iznosa 4 kV/cm.

Krivulja ugađanja:

$$\varepsilon = a + bE + cE^2 + dE^3$$

gdje su :

$$a = -1.9637 - 7.039 \times 10^{-4} P$$

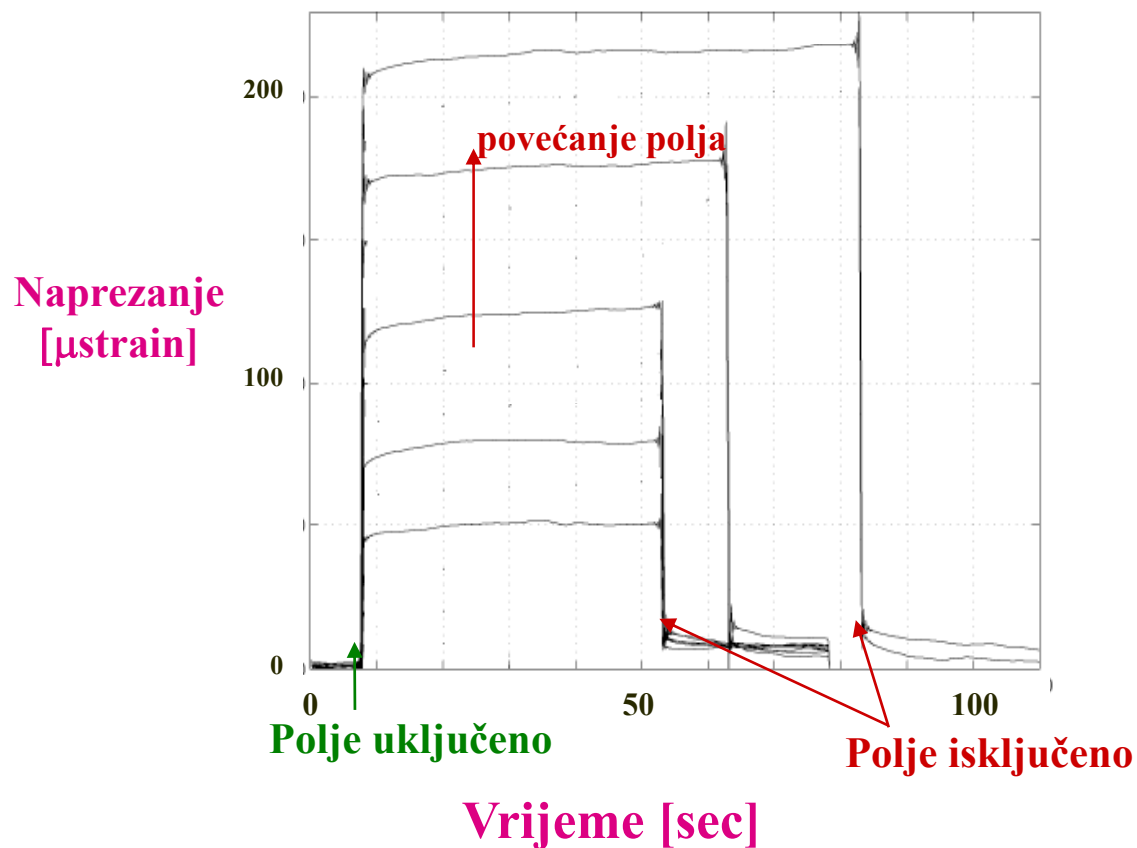
$$b = -25.82 - 7.54 \times 10^{-4} P$$

$$c = -0.1535 + 3.86 \times 10^{-4} P$$

$$d = -0.298 - 1.244 \times 10^{-4} P$$

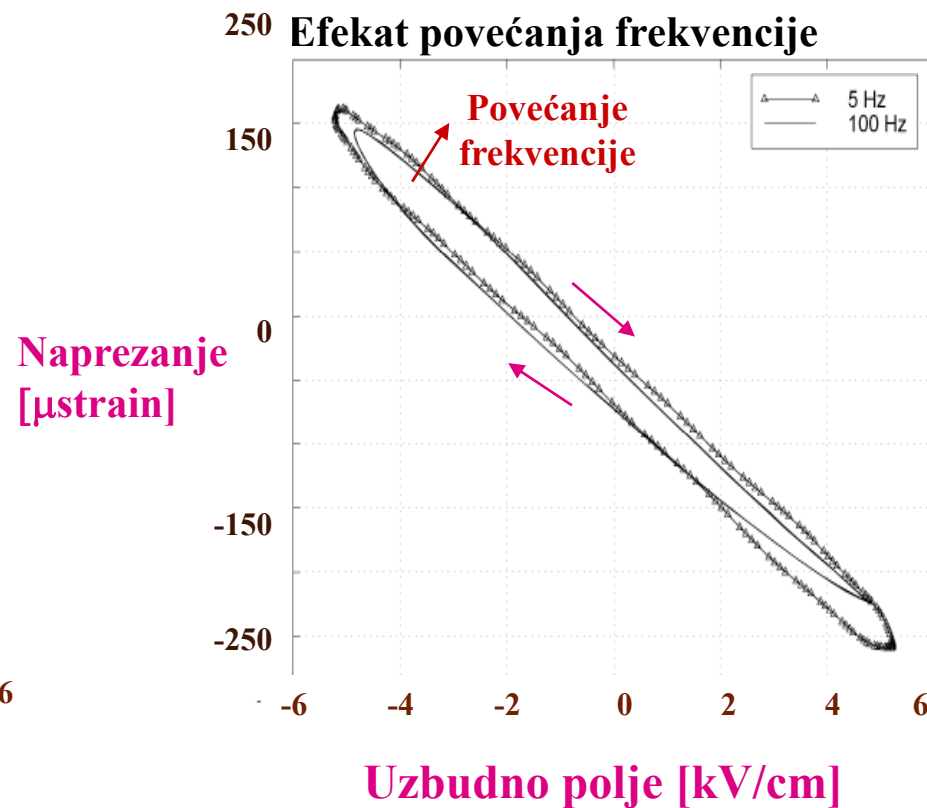
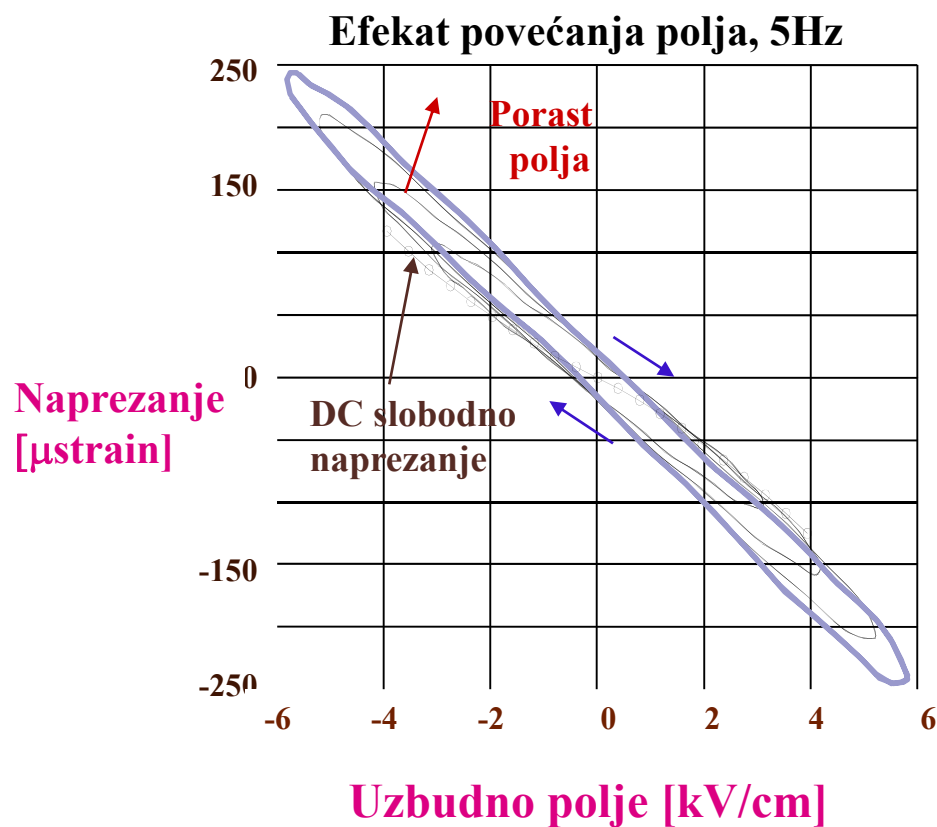
**E** u kV/cm, **P** u psi, **ε** u μstrain.

# Drift



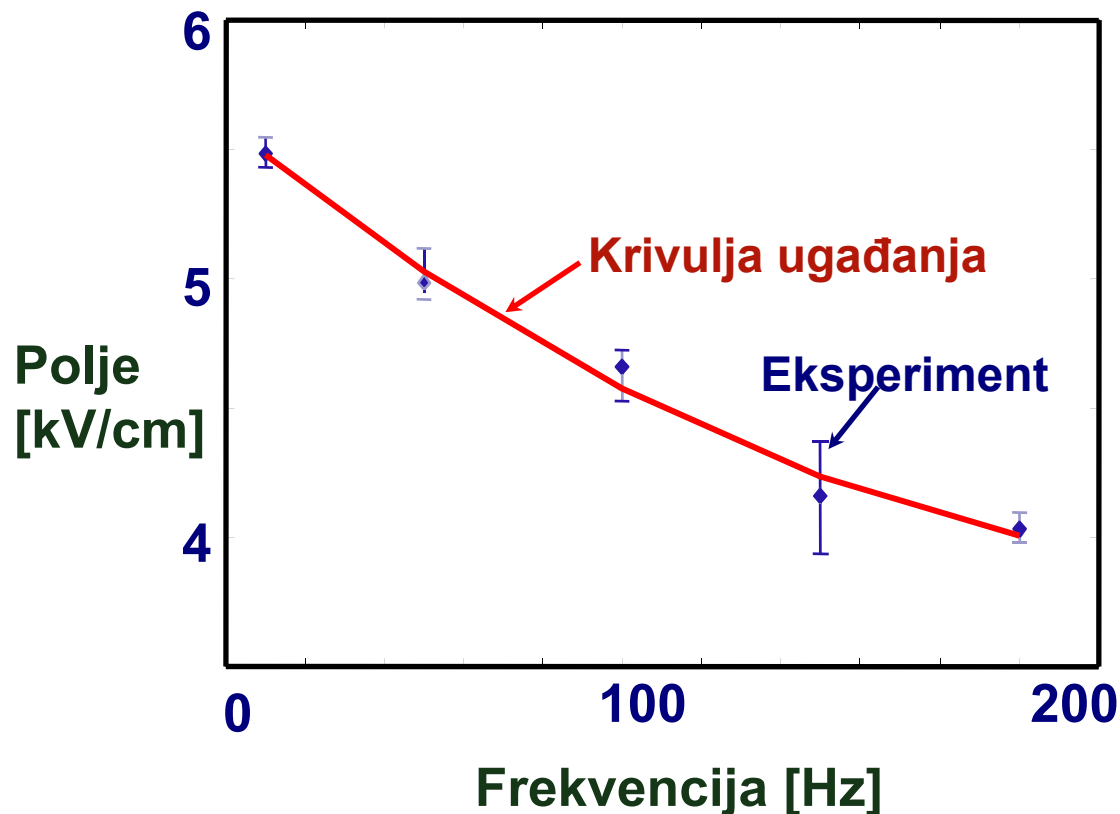
- Sporo povećanje slobodnog naprezanja za konstantnu vrijednost DC polja (približno logaritamski sa vremenom).
- 5-10% povećanje naprezanja.
- Drift je neovisan o uzbudnom polju.

# AC histereza naprezanja



- Srednji nagib se povećava sa porastom uzbudnog polja.
- Frekvencijski efekat je mali.

## Ponašanje usljed ponovnog ugađanja

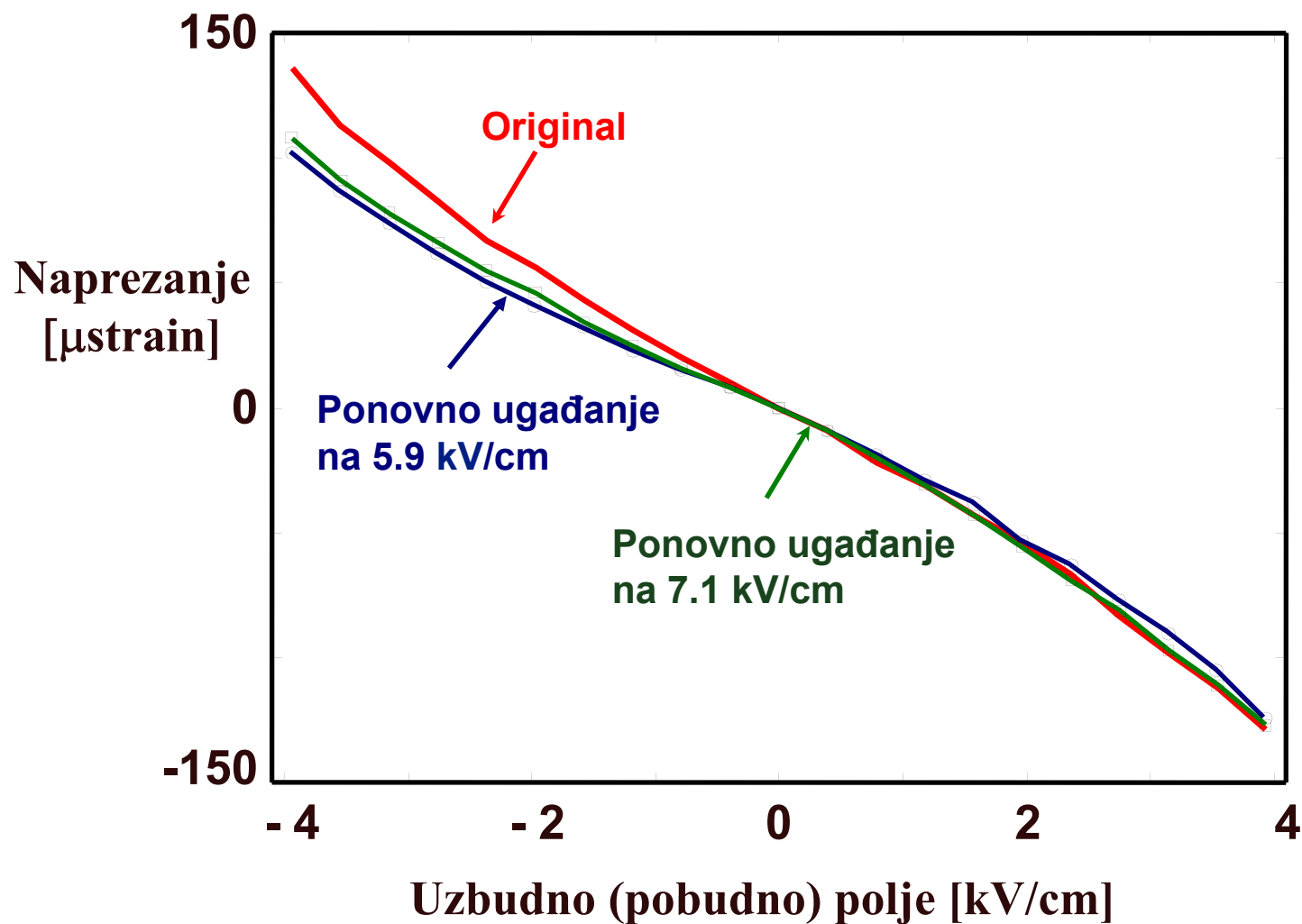


- Polje ponovnog ugađanja se smanjuje sa porastom frekvencije.
- Ova promjena je dana sa:

$$E_{dep} = 2.292 \cdot 10^{-5} f^2 - 1.255 \cdot 10^{-2} f + 5.6$$

gdje je polje E izraženo u kV/cm.

## Efikasnost ponovnog ugađanja



Aktuatori se mogu ugađati sa poljem koje je manje od polja polarizacije kristala. Polje može biti AC ili DC.

## Usporedba mikroaktuatora

| Aktuatori   | PZT-5H                   | PVDF                     | PMN                | Terferno I DZ      | Nitinol            | MSMA                        |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|
| Aktuacijski mehanizam                                       | Piezo-keramika           | Piezofil m               | Elektro-striktivni | Magneto-striktivni | Shape Memory Alloy | Magnetic Shape Memory Alloy |
| Slobodno naprezanje $\mu$ strain                            | 1000                     | 700                      | 1000               | 2000               | 60000              | 40000                       |
| Modulus E<br>$10^6$ psi                                     | 10                       | .3                       | 17                 | 7                  | 4 i 13             | 4                           |
| $\epsilon_{\max}$ za $\frac{t_b}{t_c} = 10$<br>(aluminijum) | 350                      | 10                       | 500                | 600                | 8500               |                             |
| Propusni opseg  | Visok                    | Visok                    | Visok              | Srednji            | Nizak              | Srednji                     |
| Naprezanje-<br>napon<br>linearnost                          | Linearan<br>(prvog reda) | Linearan<br>(prvog reda) | Nelinearan         | Nelinearan         | Nelinearan         | Nelinearan                  |

←  
 Određuje  
 krutost,  
 alternativna  
 jedinica je  
 $N/\mu m$ .

## 11.8. Karakteristike piezo aktuatora

- Piezo aktuatori mogu obaviti nanometarske kretanje na visokim frekvencijama jer svoje kretanje izvode iz “solid-state crystalline” efekata. Oni nemaju rotirajućih ili kliznih dijelova koji bi mogli prouzročiti trenje.
- Piezo aktuatori mogu pomjerati velike terete, čak i do nekoliko tona.
- Piezo aktuatori predstavljaju kapacitivne terete i ne disipiraju energiju u statičkim operacijama.
- Piezo aktuatori ne zahtijevaju održavanje i nisu predmet habanja (trošenja), budući da nemaju pokretnih dijelova u klasičnom smislu riječi.
- Radni naponi: do 100 V za niskonaponske aktuatore (keramički slojevi od 20 do 100 mikrona) i do 1000 V za visokonaponske aktuatore (keramički slojevi od 0.5 do 1 mm).

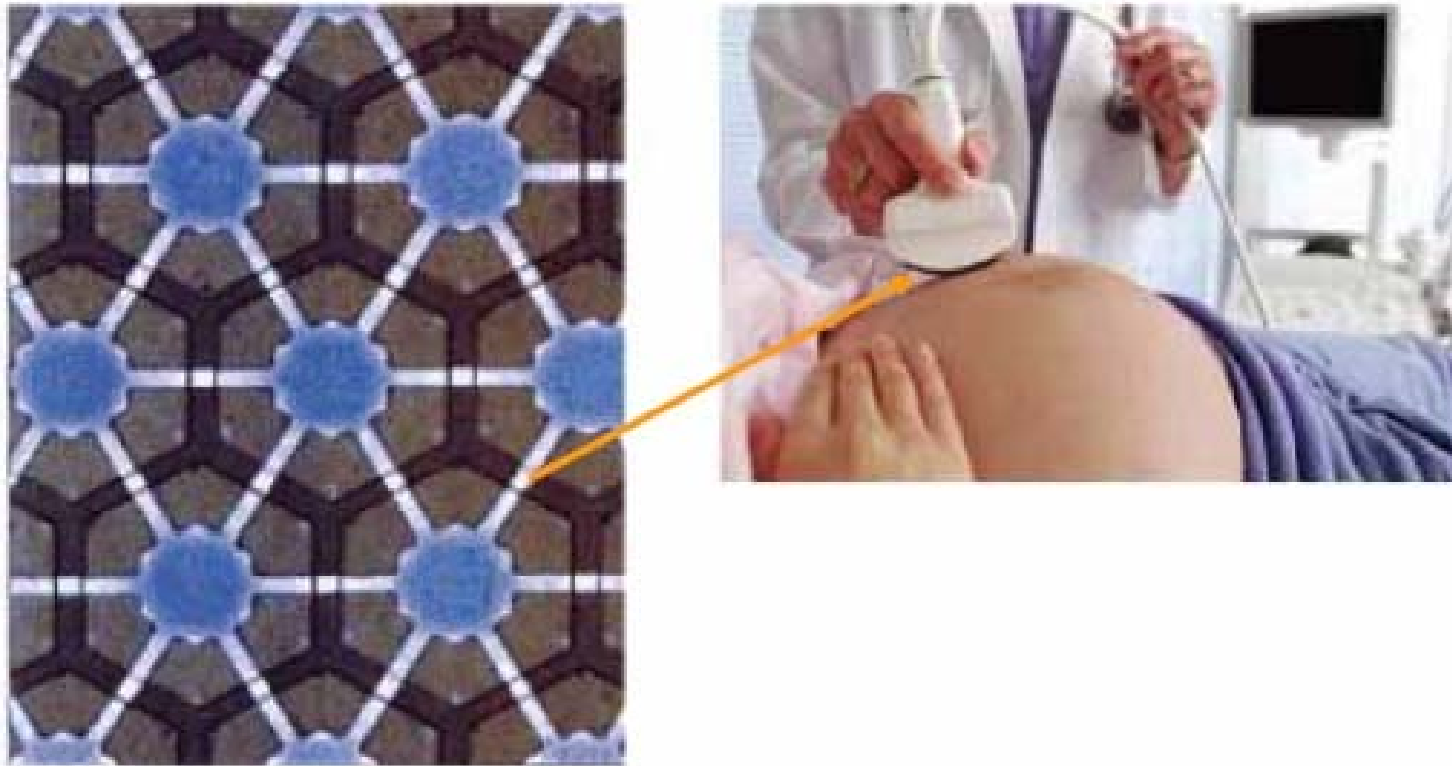


## 11.9. Primjena piezoelektričkih materijala

### ▪ Primjene:

- pretvorba mehaničke u električku energiju
  - senzori sile, pritiska i akceleracije,
  - pametni (smart) senzori za dijagnostiku,
  - visokonaponski-niskostrujni generatori: mali strojevi, paljenje varnicom za plinske uređaje,...
  - senzori ugaone brzine,
  - senzori stabilizirajućih platformi,...
- pretvorba električke u mehaničku energiju:
  - ultrazvučni motori,
  - mali vibracijski mikseri (shakers),
  - mikroaktuatori (High Precision Macro actuators),
  - krug sonarnih senzora za izbjegavanje prepreka,
  - pumpe za Inkjet printere,...

## Primjeri upotrebe piezoelektričkih aktuatora



Ultrazvučna sonda – piezoelektrički efekat.

## Primjeri upotrebe piezoelektričkih aktuatora



**Mikrokirurški aktuatori kao dijelovi mikrokirurških instrumenata.**

## Primjeri upotrebe piezoelektričkih aktuatora



**Piezoelektrički aktuatori u teleoperacijskim i telehirurgijskim sistemima.**