



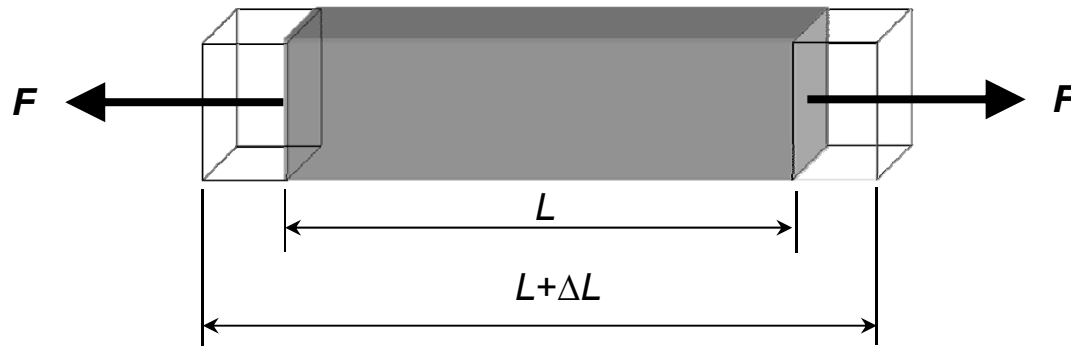
# Lekcija 12

## *Elektrostatički i elektromagnetski aktuatori*

Prof.dr.sc. Jasmin Velagić  
Elektrotehnički fakultet Sarajevo  
Kolegij: Aktuatori

## 12.1. Mehanika MEMS-a

### Aksijalni udar i naprezanje

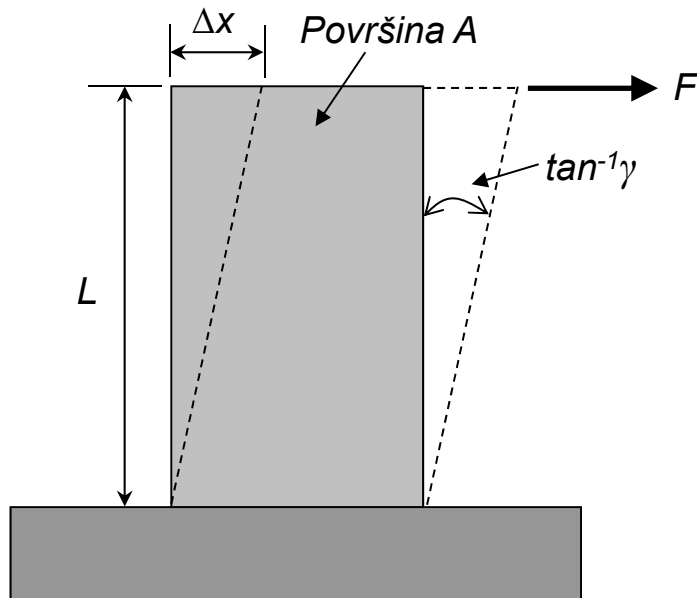


- Naprezanje,  $\varepsilon$ , predstavlja deformaciju krutog tijela ( $\Delta L/L$ ) usljed udara.
- Udar,  $\sigma$ , je sila koja djeluje na jedinicu površine tijela ( $F/A$ ).
- **Young-ov modul elastičnosti**  $E$ , predstavlja omjer udara i naprezanja (opisuje čvrstoću materijala (veći  $E$  tvrdi materijal):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [N/m}^2\text{]}.$$

# Mehanika MEMS-a

## Strižući udar i naprezanje



- Strižući udar je sila primijenjena na objekt u ravnini suprotnoj od smjera djelovanja sile.
- **Strižući modul elastičnosti**,  $G$ , predstavlja pomaka objekta usljed strižujućeg udara.
- Strižuće naprezanje,  $\gamma$ , je povezano sa uglom pod kojim se deformira element u odnosu na svoj originalni oblik.

$$G = \frac{\text{striž. udar}}{\text{pomak ugla uslijed udara [rad]}} = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta x}{L}} \text{ [N/m}^2 \text{]}.$$

# Mehanika MEMS-a

## Strižujući udar i naprezanje

- Za izotropne materijale (imaju identična svojstva u svim smjerovima, što općenito nije slučaj za većinu materijala izgrađenih od jedne vrste kristala) strižujući modul  $G$  je povezan s modulom elastičnosti  $K$  sljedećom relacijom:

$$E = 2G(1 + \mu) = 3K(1 - 2\mu).$$

gdje je  $\mu$  Poisson-ov omjer i  $K$  je volumni koeficijent elastičnosti.

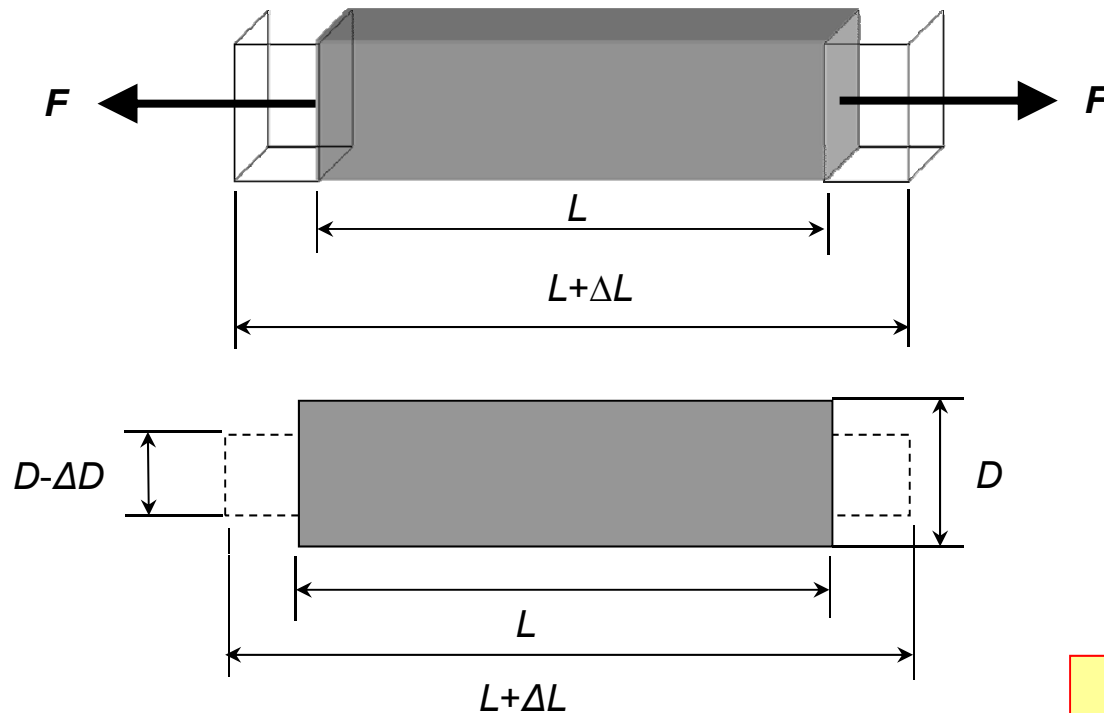
- **Volumni koeficijent elastičnosti** (bulk modulus) je definiran kao:

$$K = \frac{\text{hidrostatički udar}}{\text{volumno sabijanje}} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta V}{V}} \text{ [N/m}^2\text{]}.$$

- Volumni koeficijent elastičnosti materijala predstavlja promjenu njegovog volumena usljed djelovanja pritiska. Općenito tvrdi materijali se manje sabijaju nego tekućine jer imaju čvršću rešetku atoma. Za vodu  $K=2 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ , za aluminij  $K=7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ , za čelik  $K=14 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ .

# Mehanika MEMS-a

## Poisson-ovo naprezanje



Aksijalno naprezanje:

$$e_a = \frac{\Delta L}{L}$$

Lateralno naprezanje:

$$e_t = \frac{\Delta D}{D}$$

- **Poisson-ov omjer** je definiran kao:

$$K = \frac{\text{lateralno naprezanje}}{\text{longitudinalno naprezanje}} = -\frac{e_t}{e_a} = -\frac{\frac{\Delta D}{D}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

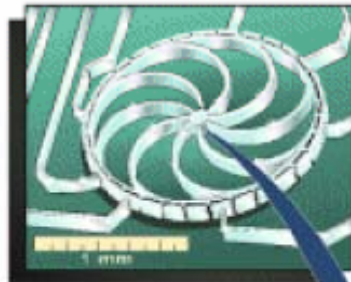
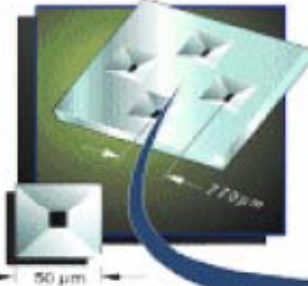
- Poisson-ov omjer uvijek poprima pozitivnu vrijednost i za većinu materijala je između 0.2 i 0.5. Za većinu metala iznosi  $\sim 0.3$ , za gumu  $\sim 0.5$ , dok je za pluto gotovo 0.

# Primjena MEMS-a

Courtesy of D. Thomas,  
Perkin-Elmer Applied  
Biosystems

Inertial Navigation Sensors  
 • Acceleration  
 • Yaw Rate

Silicon Nozzles  
for Fuel Injection



Fuel  
Pressure  
Sensor

## Micromachined Transducer

Applications for Automotive  
Operation & Safety



Micromachined  
Accelerometer  
for Airbag

Microphones  
for Noise  
Cancellation

Airbag  
Side Impact  
Sensor

Fuel Sensors  
 • Level  
 • Vapor Pressure

Air-Conditioning  
Compressor  
Sensor

Manifold  
Air  
Pressure  
Sensor

Mass  
Air Flow  
Sensor

Force Sensors  
 • Brakes  
 • Throttle Pedals

Accelerometer  
for Suspension  
Control

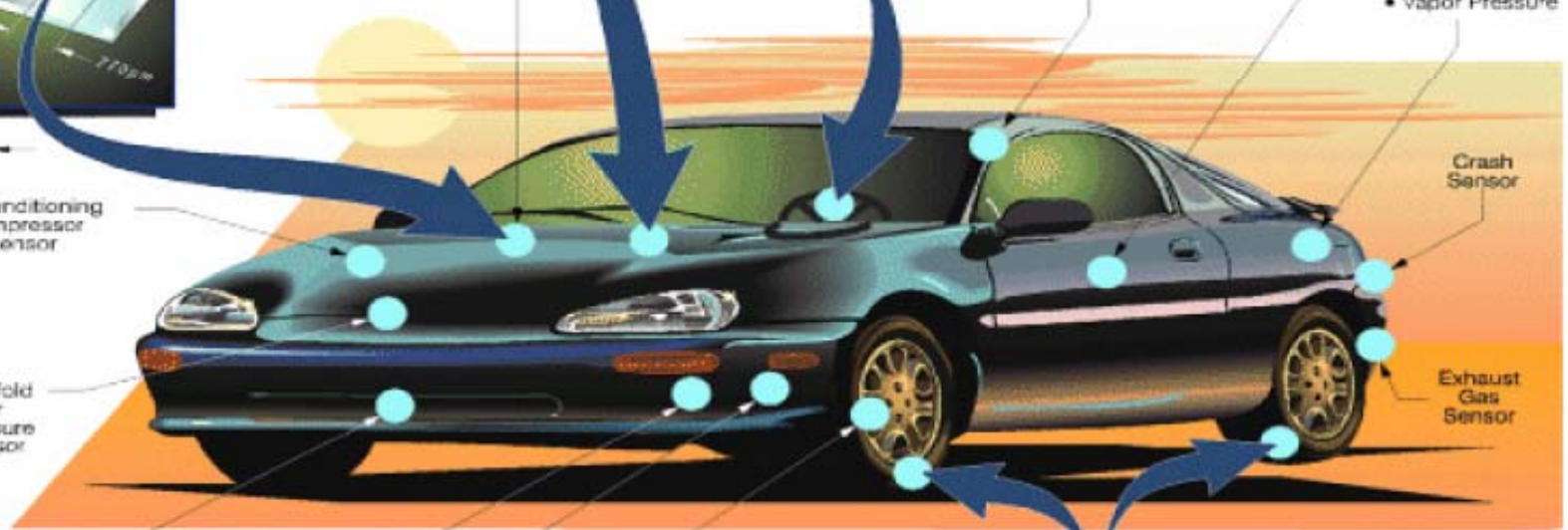
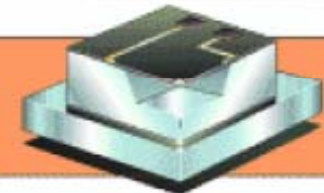
Pressure and Inertial  
Sensors for  
Braking Control

Crash  
Sensor

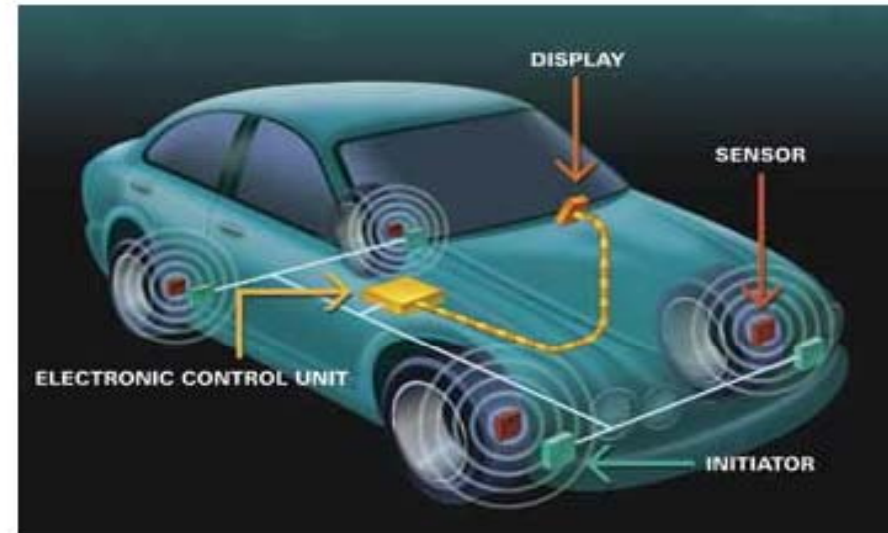
Exhaust  
Gas  
Sensor



Tire  
Pressure  
Sensors



## Primjena MEMS-a



- MEMS senzor pritiska sa bežičnim (wireless) prijenosom podataka.
- Smješten je na obodu felge.

# Primjena MEMS-a

**MicroStrain**  
**Sensors for Biomechanics**  
Wireless sensors measuring strain, position and motion

- eye tremor
- depth orient impro
- shoulder ligament strains
- spinal ligament strains
- elbow ligament strains
- wireless emg and ekg
- wrist ligament strains
- knee ligament strains
- ankle ligament strains
- wireless smart insoles measure force
- wireless bone
- 3DM-G measures orientation and motion
- hip replacement - sensors for measuring micromotion
- smart wireless sensor measures implant subsidence
- smart total knee replacement
- achilles tendon strains
- arch support strains

800.449.3878  
www.microstrain.com

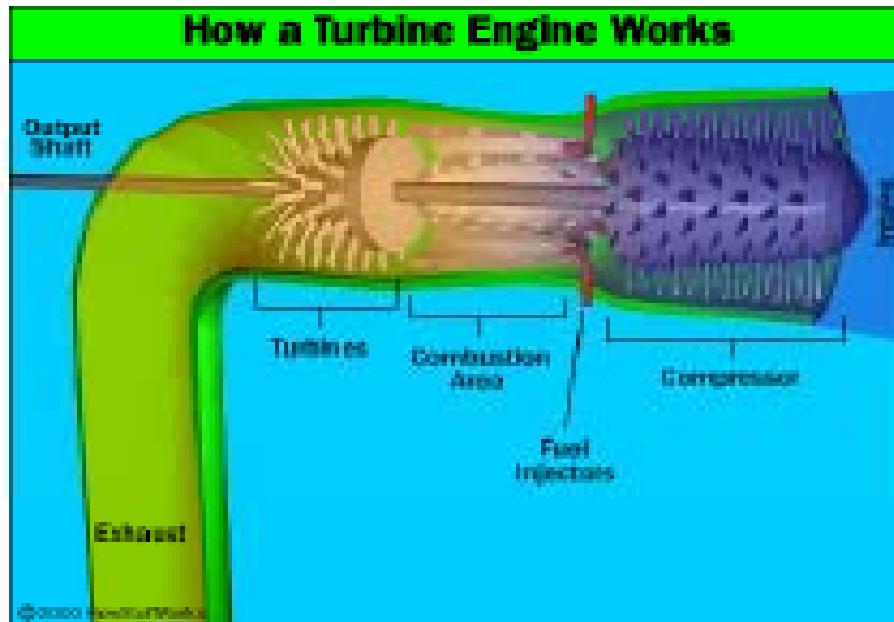
**MicroStrain**

MEMS wireless strain sensors for human monitoring



# Primjena MEMS-a

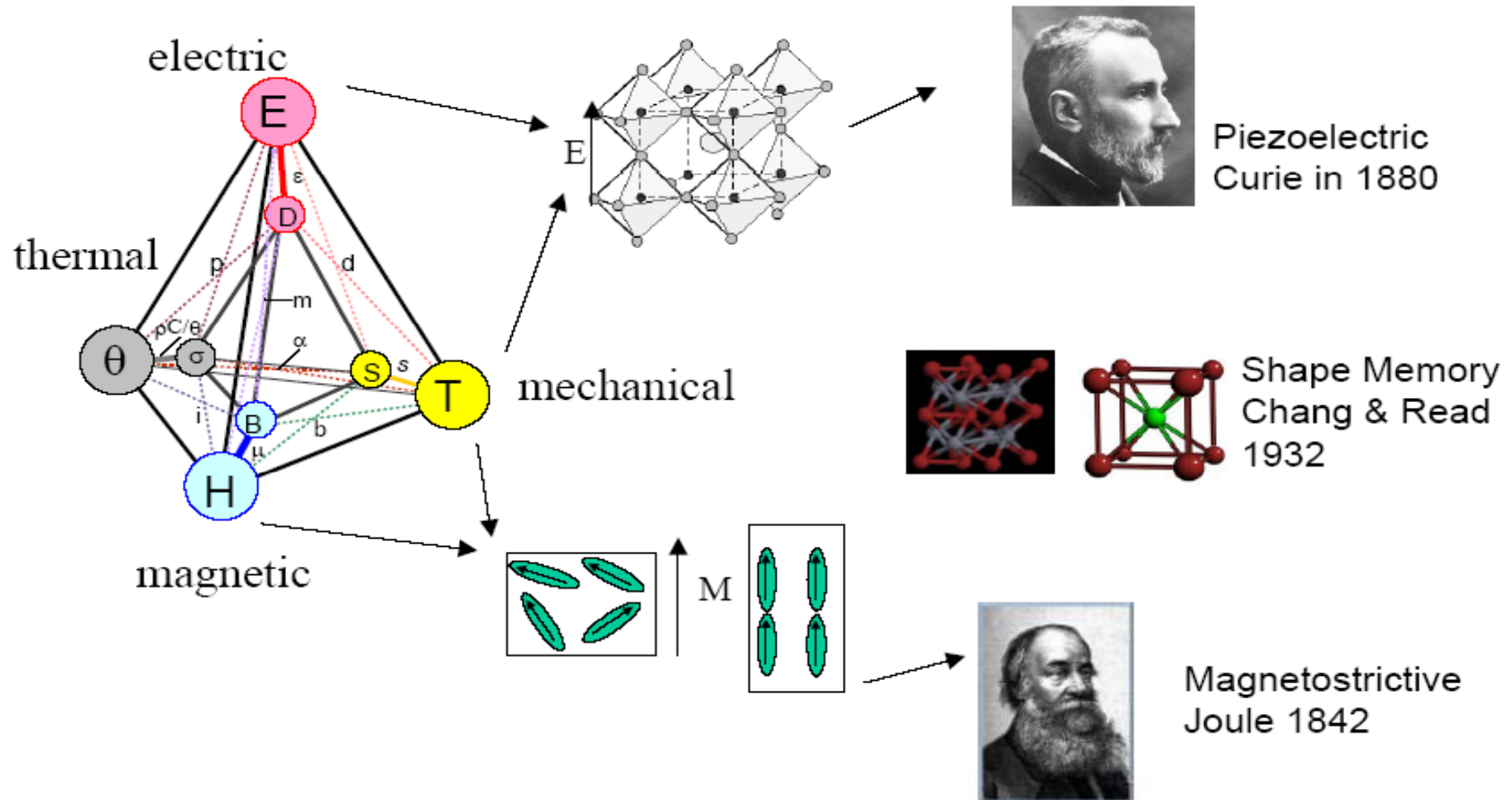
## Real Gas Turbine Engine



<http://travel.howstuffworks.com/turbine.htm>

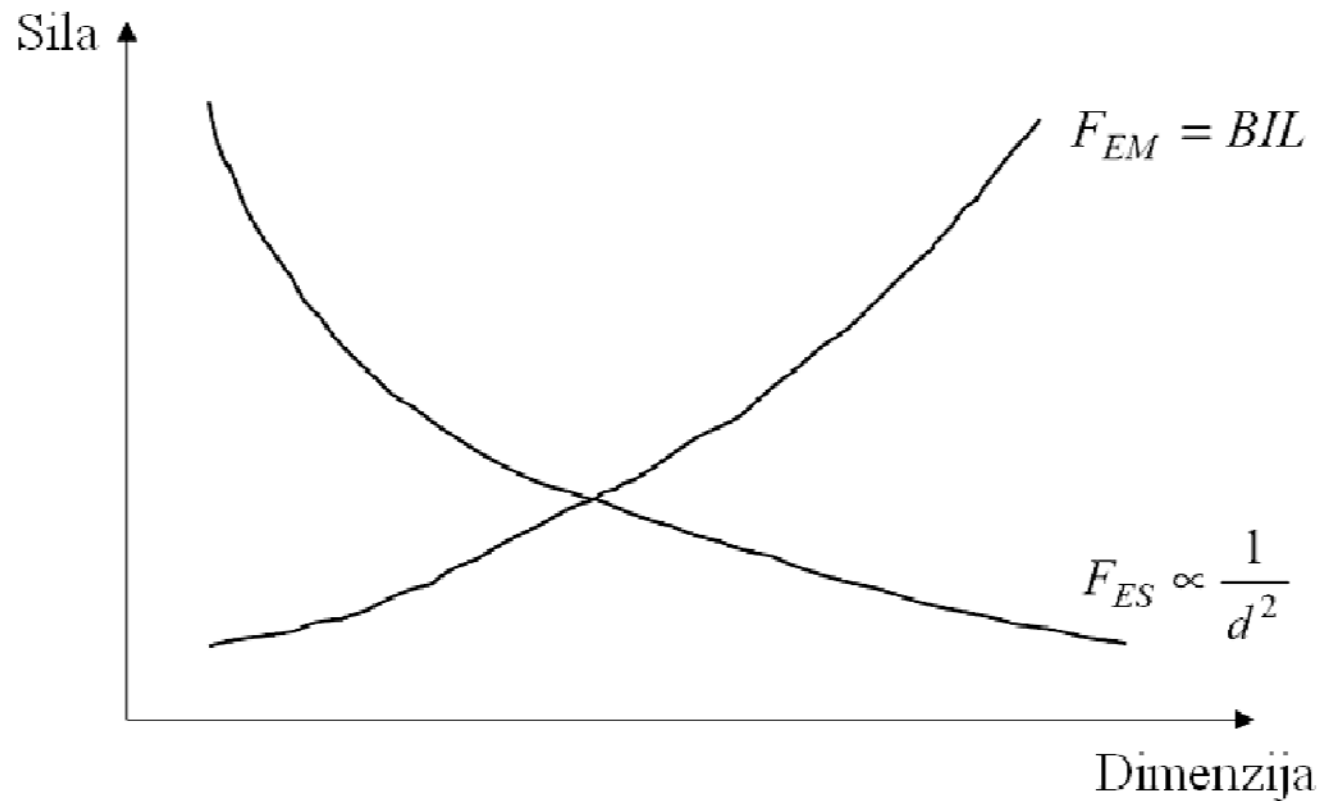
**Great power-to-weight ratio**  
**Generates power or thrust**

## 12.2. Elektrostatički i elektromagnetski aktuatori



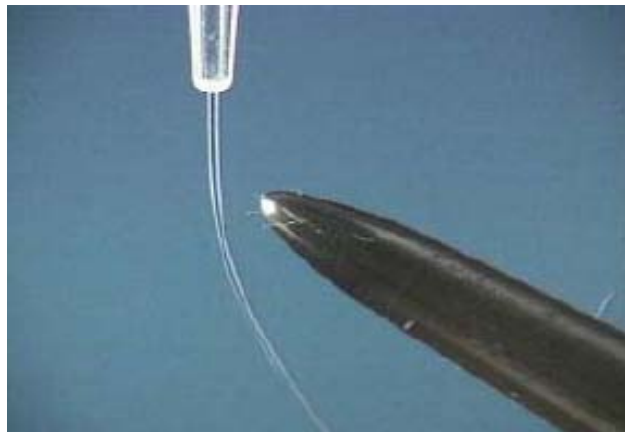
# Elektrostatički i elektromagnetski aktuatori

## Elektrostatički vs. elektromagnetski



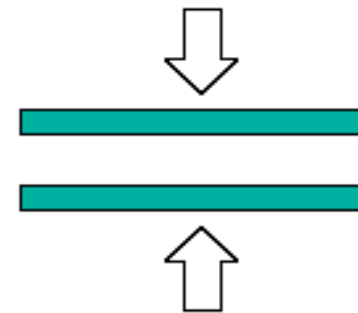
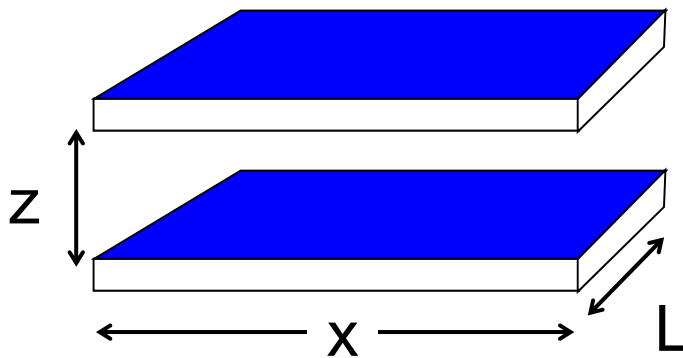
## 12.3. Elektrostatički (kapacitivni) aktuatori

- **Elektrostatički efekat**
  - Sila se generira promjenom elektrostatičke energije, tj. promjenom napona ili količine naboja.
  - Generiraju se male sile i mali pomaci.
  - Potrebni su veliki naponi.
- **Elektrostatička aktuacija**
  - Električki nabijeni materijali privlače jedan drugog.



## Paralelne ploče

- Naelektrizirane paralelne ploče mogu generirati aktuacijsku silu duž z-osi (srednja sila):



**Pohranjena energija:**

$$\begin{aligned}
 U(z) &= \frac{C \cdot V^2}{2} \\
 &= \frac{\epsilon_0 \cdot A \cdot V^2}{2 \cdot z} \\
 &= \frac{\epsilon_0 \cdot L \cdot x \cdot V^2}{2 \cdot z}
 \end{aligned}$$

**Sila:**

Promjena energije sa razmakom. Povećanjem razmaka između ploča sila se smanjuje.

$$\begin{aligned}
 F_z &= -\frac{\partial U}{\partial z} \\
 &= -\frac{\epsilon_0 \cdot L \cdot x \cdot V^2}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (z^{-1}) \\
 &= -\left(\frac{1}{2} \epsilon_0 V^2\right) \cdot \frac{L \cdot x}{z^2}
 \end{aligned}$$

## Paralelne ploče

- Sila duž x-osi (slaba sila):



Između elektroda se koristi zrak ili prirodni gas.

Sila:

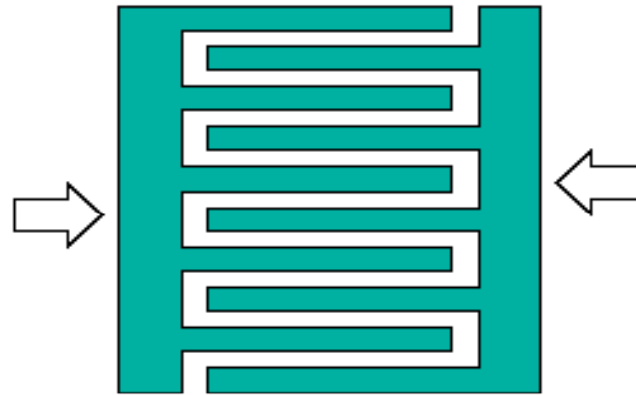
$$\begin{aligned}
 F_x &= -\frac{\partial U}{\partial x} \\
 &= -\frac{\epsilon_0 \cdot L \cdot V^2}{2 \cdot z} \cdot \frac{\partial}{\partial x}(x) \\
 &= -\left(\frac{1}{2} \epsilon_0 V^2\right) \frac{2 \cdot L}{z}
 \end{aligned}$$

## Izvedbe elektrostatičkog akuatora

- Osnove izvedbe elektrostatičkog akuatora su:
  - **Aktuator u obliku češlja (comb drive)**
    - koristi kombinaciju paralelnih (kapacitivnih) ploča,
    - lateralna translacija pokretnih dijelova,
    - povećanje kapacitivnosti je proporcionalno broju zubi akuatora,
    - veća kapacitivnost znači veću silu.
  - **Rotacijski elektrostatički akuator**
    - elektrostatička sila djeluje između ivica rotora i elektroda statora, a koji su izgrađeni od tzv. polisilikata.
  - **Mikroprekidač**
    - koristi princip neposredne (direktne) akcije,
    - neposredna akcija – akcija između dvije elektrode (ploče) u kojoj se pokretni dijelovi kreću duž staze djelovanja električkog polja.

## 12.3.1. Aktuator u obliku češlja

- Da bi se dobila velika sila mora se osigurati velika promjena kapacitivnosti sa promjenom razmaka između ploča.
- Ovo vodi ka aktuatoru u obliku češlja (comb drive) - mnogo paralelnih ploča (zubiju) može povećati slabu silu.



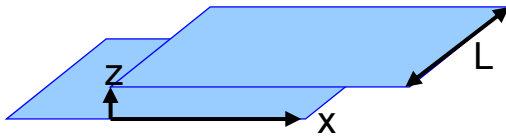
Sila:

$$F_x = -N_{praz} \left( \frac{1}{2} \epsilon_o V^2 \right) \frac{2 \cdot L}{z}$$



## Aktuator u obliku češlja

- Kolika je sila po jednom zubu potrebna?



Uzmimo da je:  $L=200\mu\text{m}$ ,  $z=3\mu\text{m}$ ,  $x\sim 50\mu\text{m}$   
 Za zrak  $\varepsilon_0=8.854\cdot 10^{-12}$  F/m

$$F_x = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \cdot V^2 \cdot \left( \frac{2 \cdot t}{z} \right) = K_x V^2,$$

$$F_{x10} = 100 \cdot K_x, V = 10V,$$

$$F_{x50} = 25F_{x10}, V = 50V,$$

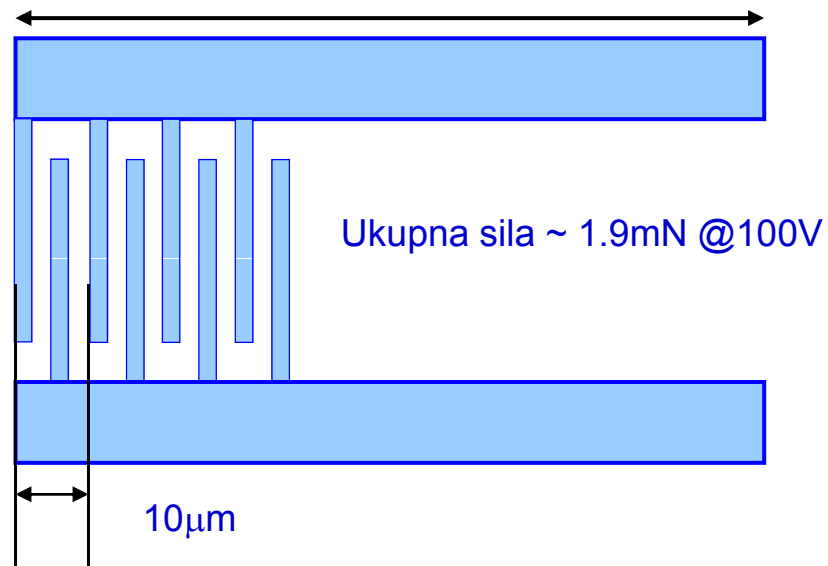
$$F_{x100} = 100F_{x10}, V = 100V,$$

$$F_{x100} \approx 6\mu\text{N}.$$

## Aktuator u obliku češlja

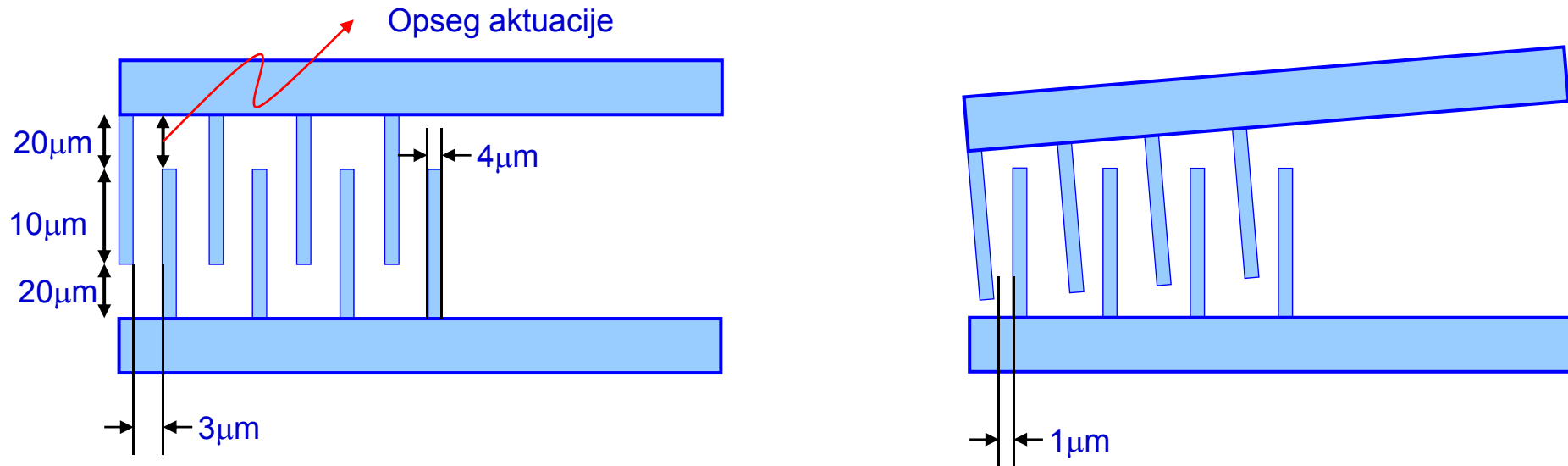
- Kada se priključi napon generira se privlačna sila između zubiju koja uzrokuje njihovo zajedničko kretanje.
- Povećanje kapacitivnosti je proporcionalno broju zubi.
- Ako se želi velika sila koristi se mnogo zubi.

Ukupna sila = broj zubi \* sila po zubu.



## Aktuator u obliku češlja

- Kada dolazi do deformacije kretanja razmak između zubi se smanjuje na  $1 \mu\text{m}$ .



- Na  $100\text{V}$ , elektrostatička sila paralelnih ploča će zakriviti zube, tako da najmanji razmak između njih postane  $0.1 \mu\text{m}$ .

$$F_z = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \cdot V^2 \cdot \left( \frac{x \cdot t}{z^2} \right)$$

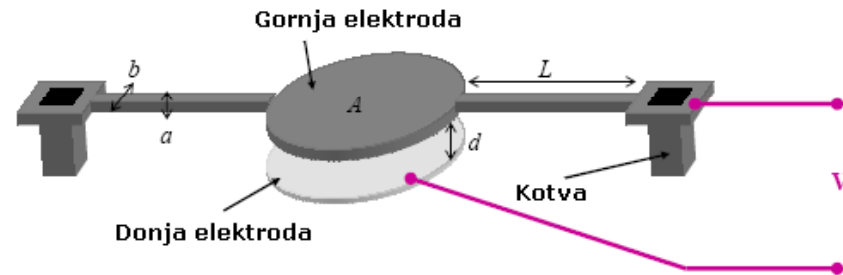
$$K = \frac{3EI}{L^3} \approx 3354 \text{ N/m}$$

$$\text{Defleksija} \approx F_z / K \approx 0.1 \mu\text{m}$$

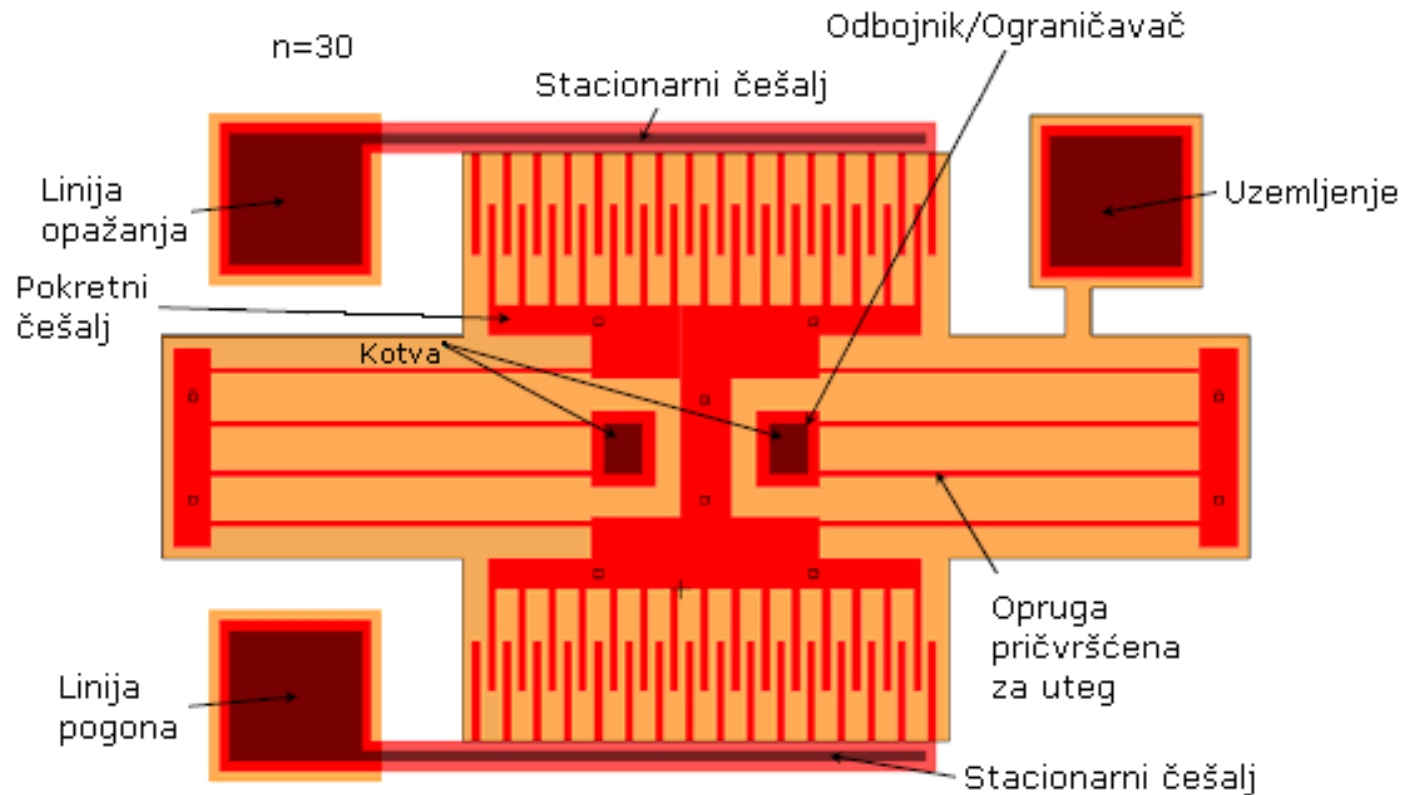
- Kvalitet uređaja ovisi o kvalitetu dizajna uvijanja (savijanja) zubi.

# Aktuator u obliku češlja

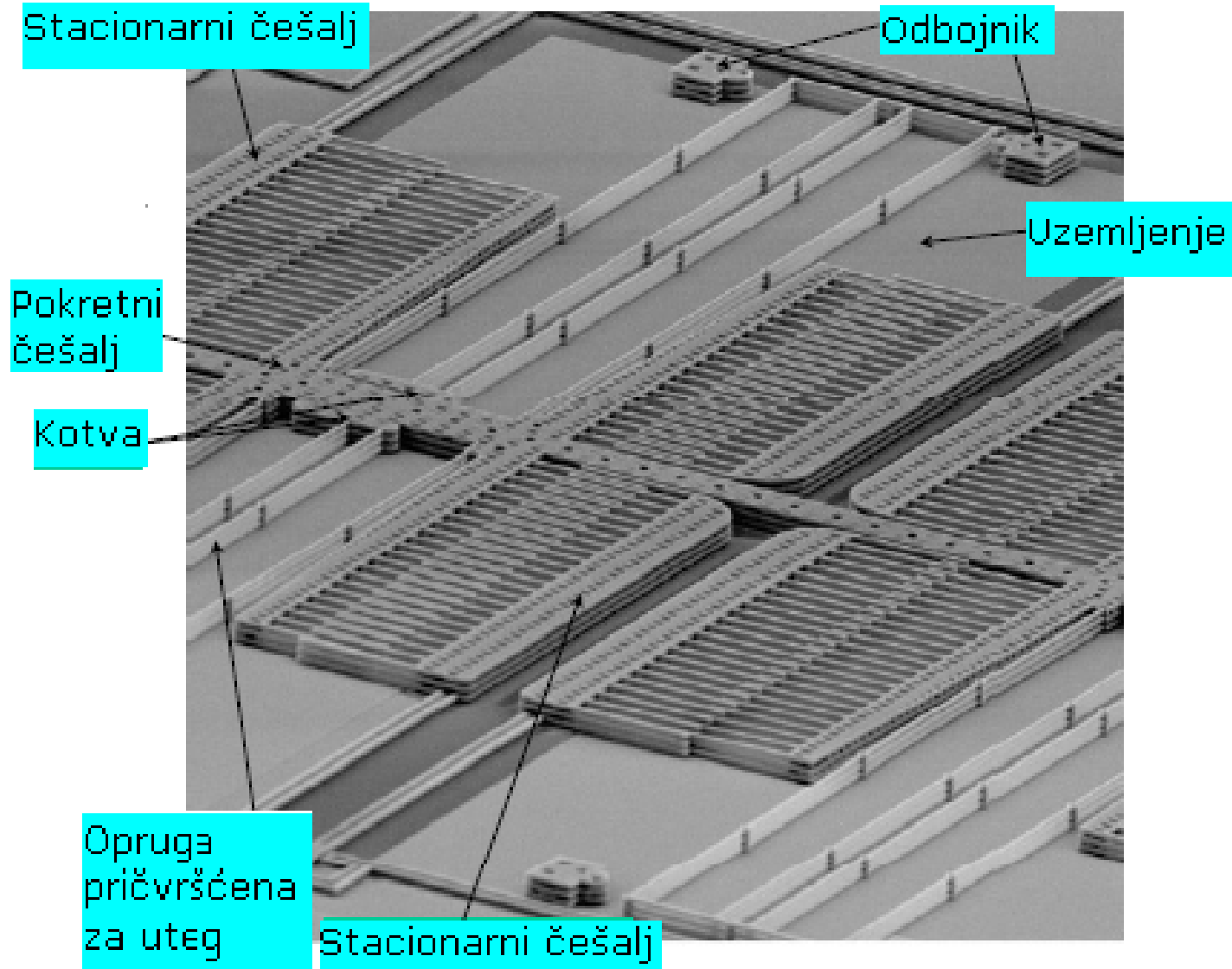
Paralelne ploče:



Aktuator u obliku češlja:

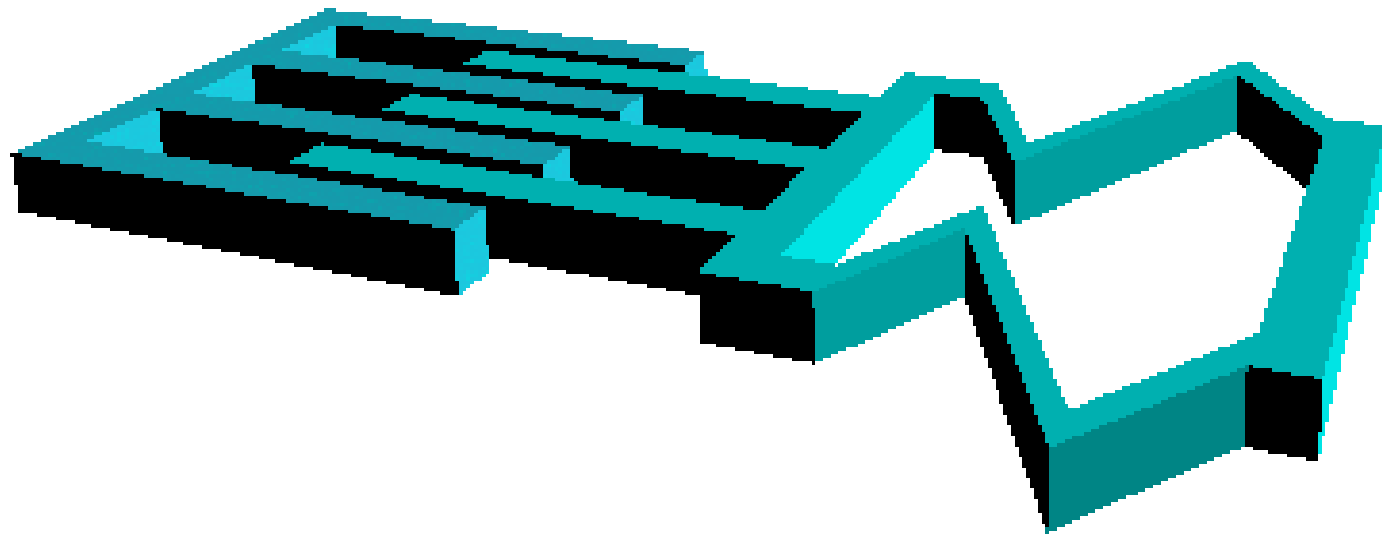


## Aktuator u obliku češlja



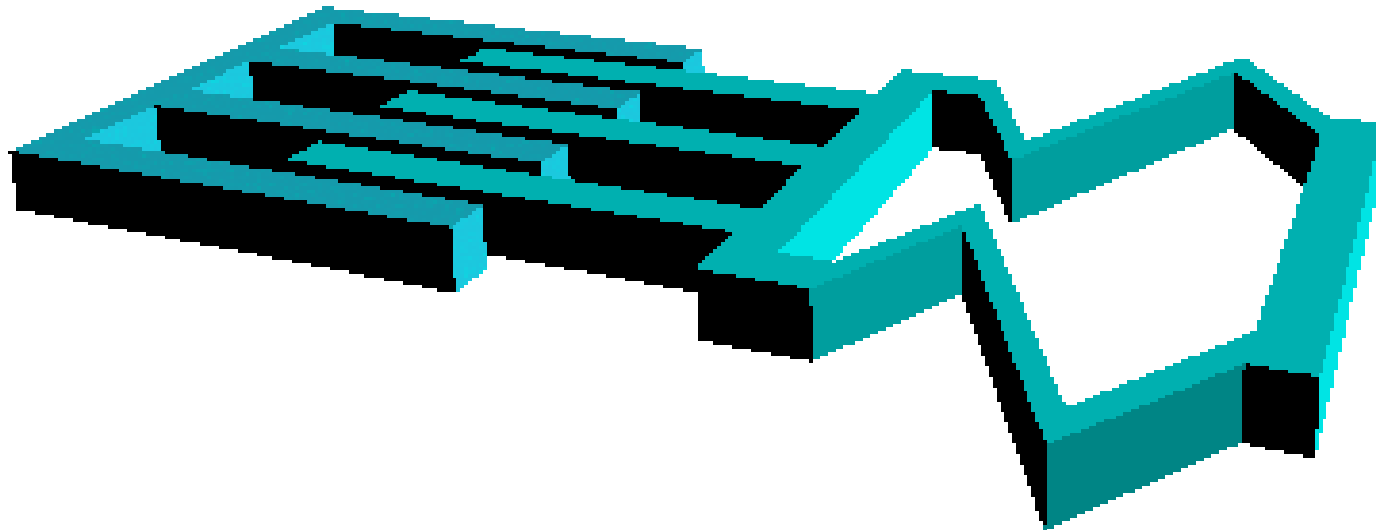
## Aktuator u obliku češlja

- Stacionarni češalj (nepokretni zubi) je pričvršćen na supstrat.
- Pokretni zubi se kreću i uvlače između nepokretnih.
- Pokretni zubi su također na jednoj strani pričvršćeni za supstrat, tako da se, zbog djelovanja sile opruge, mogu vratiti u početni položaj.
- Priklučivanjem napona javlja se elektrostatička sila između pokretnih i nepokretnih zubi koja teži da poveća njihovo preklapanje.



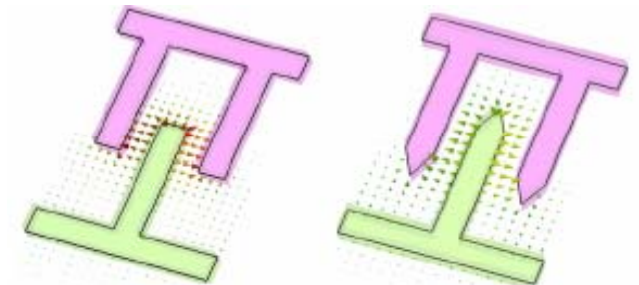
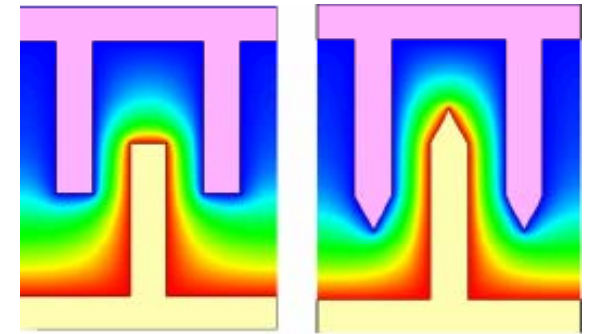
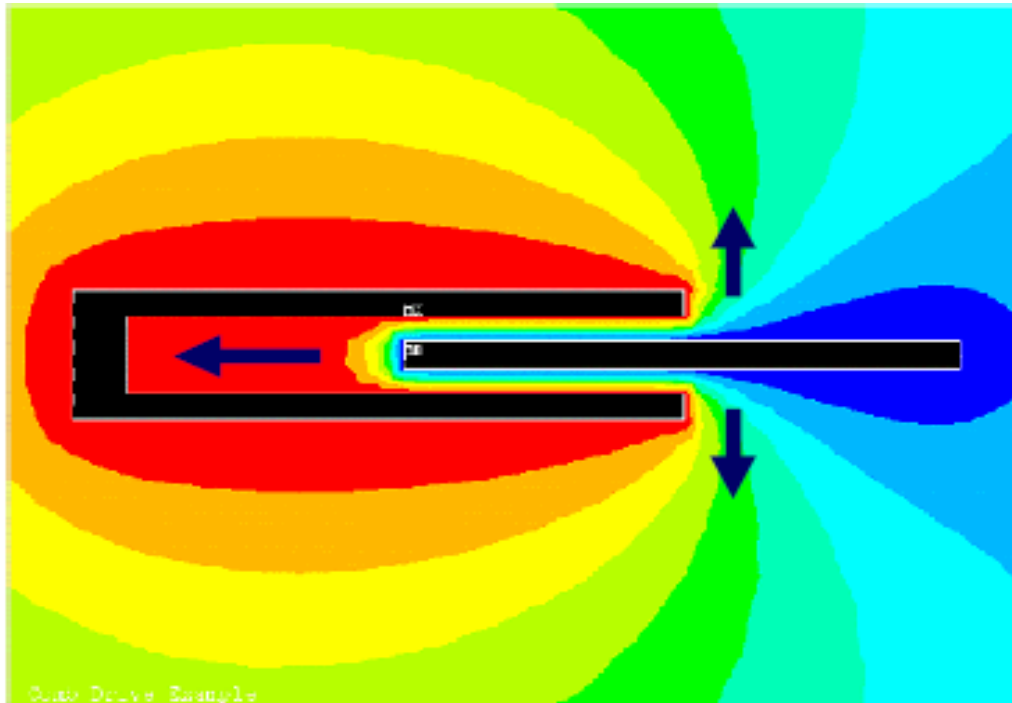
## Aktuator u obliku češlja

- Sila je konstantna i ukupni pomak je manji od pomaka koji bi se dobio neposrednom aktuacijom.
- Pokretni dio je elastično oslonjen na supstrat tako da nema nikakvog trenja.
- Tipična vrijednost duljine zubi ovih aktuatora, dobivenih površinskom obradom, iznosi  $10\ \mu\text{m}$ , a ostvarena sila  $10\ \mu\text{N}$ .



## Aktuator u obliku češlja

- Nabijene paralelne ploče mogu generirati aktuacijsku silu.

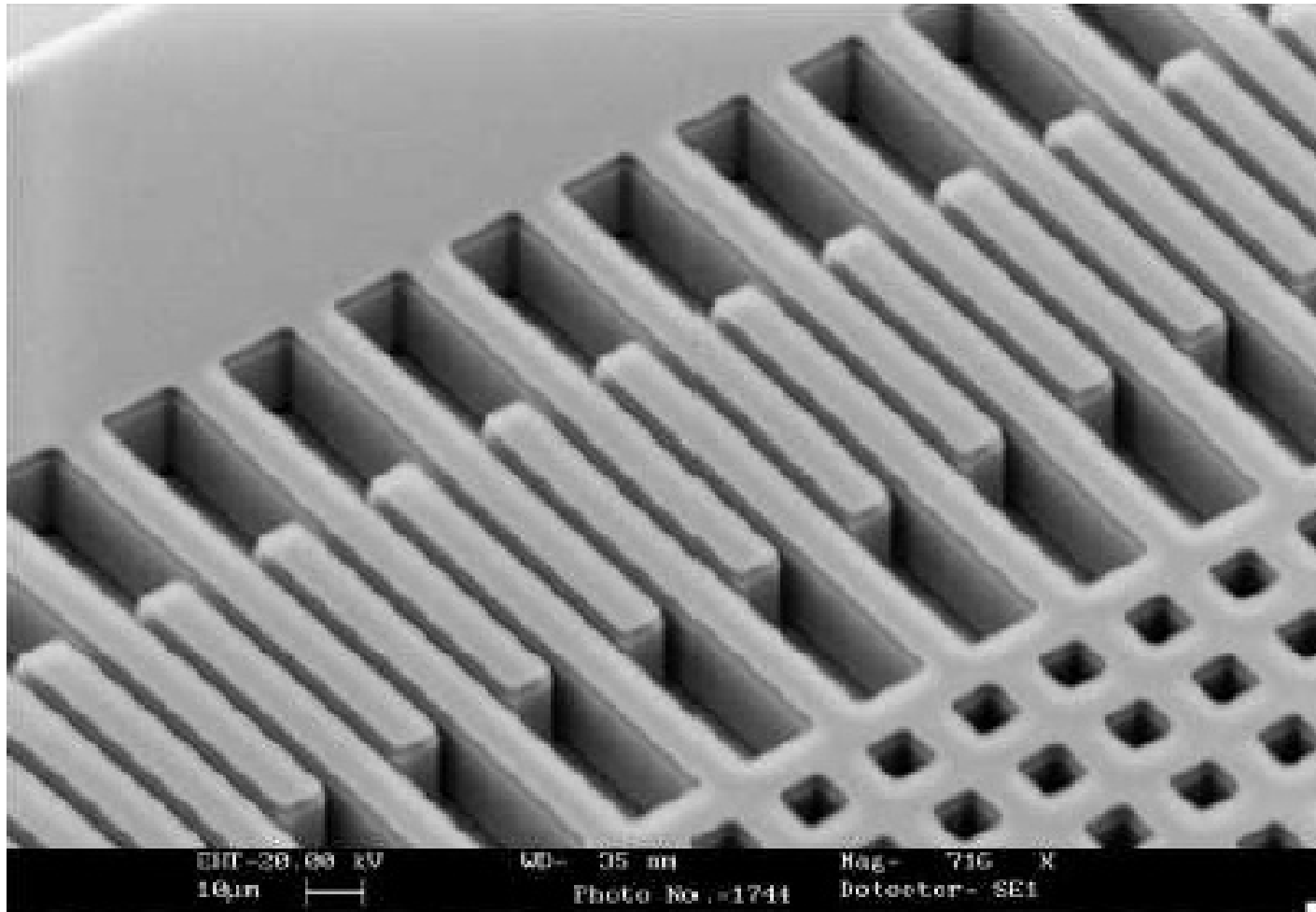


Smjer djelovanja sile slijedi smjer gradijenta polja.



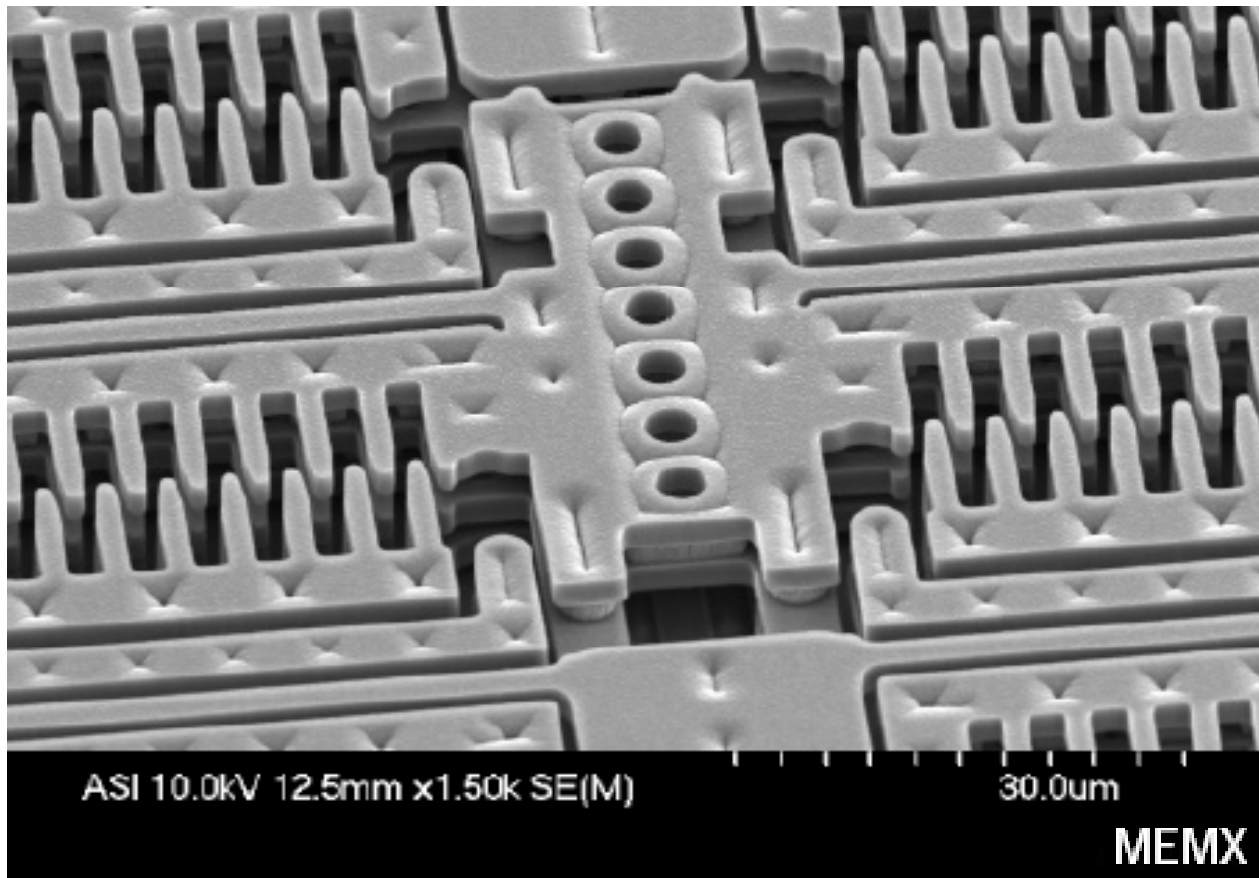
## Aktuator u obliku češlja

- Primjer MEMS aktuatora u obliku češlja.



## Aktuator u obliku češlja

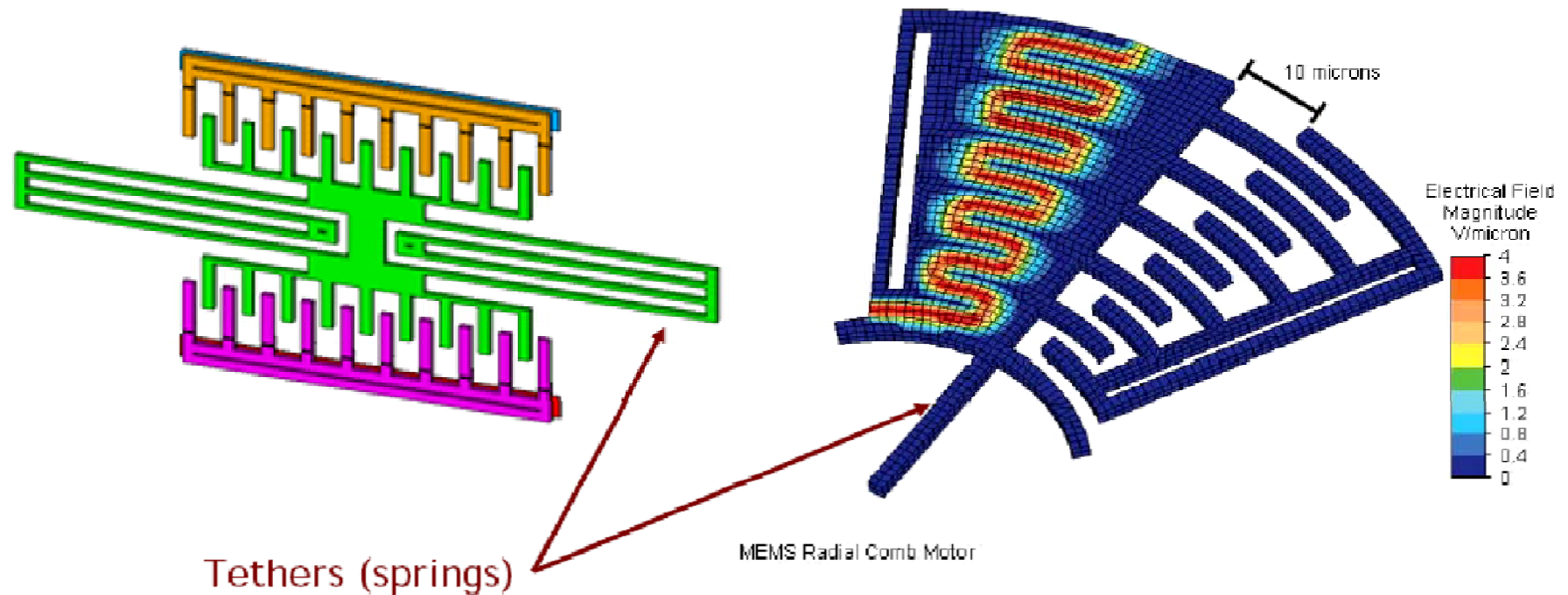
- Primjer MEMS aktuatora u obliku češlja.



Primjer ovih  
aktuatora –  
akcelerometar.

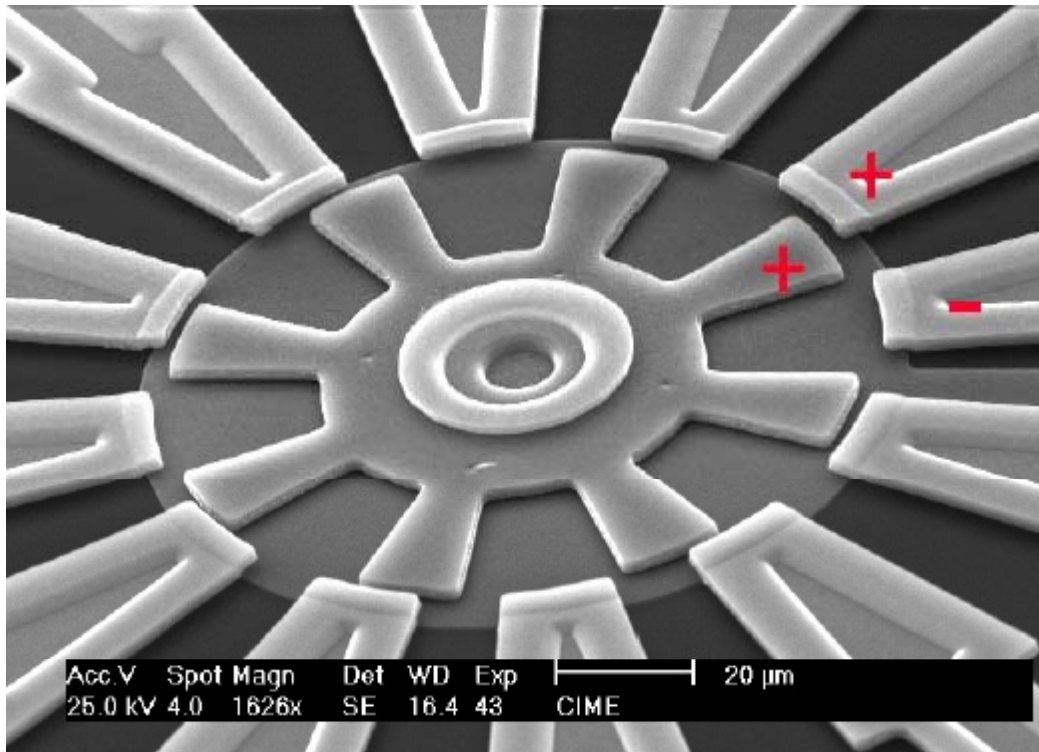
## Aktuator u obliku češlja

- Kapacitivni motor za generiranje rotacijskih vibracija.



## 12.3.2. Rotacijski elektrostatički aktuator

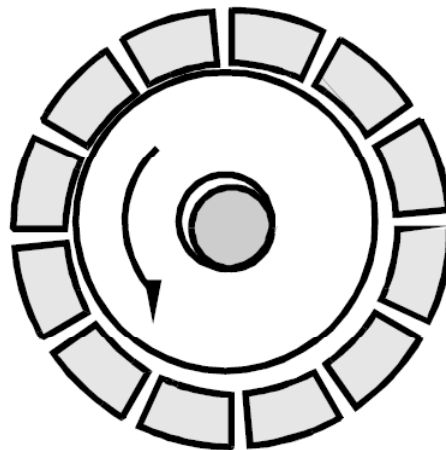
- Elektrostatički rotacijski motor pogonjen promjenjivim naponom koji se dovodi sukcesivno na vrhove kraka.
- Nastalo rotacijsko elektrostatičko polje vuče za sobom rotor.



- Koristi slobodno gibajući rotor okružen kapacitivnim pločama.
- Prvi rotacijski elektrostatički mikroaktuator napravljen 1989 godine sa promjerom 60-120  $\mu$ m i brzinom 500 obrtaja/minuti.
- Problem je bilo trenje na kliznoj površini.
- Ova sila trenja je postojala čak i kada su nanošeni tanki filmovi silicijum nitrata s ciljem njenog smanjivanja.

## Rotacijski elektrostatički aktuator

- Kasnija unapređenja (1990.) omogućila su postizanje brzina od 15000 o/min i neprekidan rad u trajanju više od nedjelju dana.
- Međutim i dalje je ostao problem trenja.
- Jedno od rješenja je bila zamjena klizećeg kontakta kotrljajućim – tzv. **wobble motor**.
- Njegov rotor je glatki prsten koji, koristeći elektrostatičko privlačenje, ekscentrično rotira bez kliznog kontakta sa osovinom.



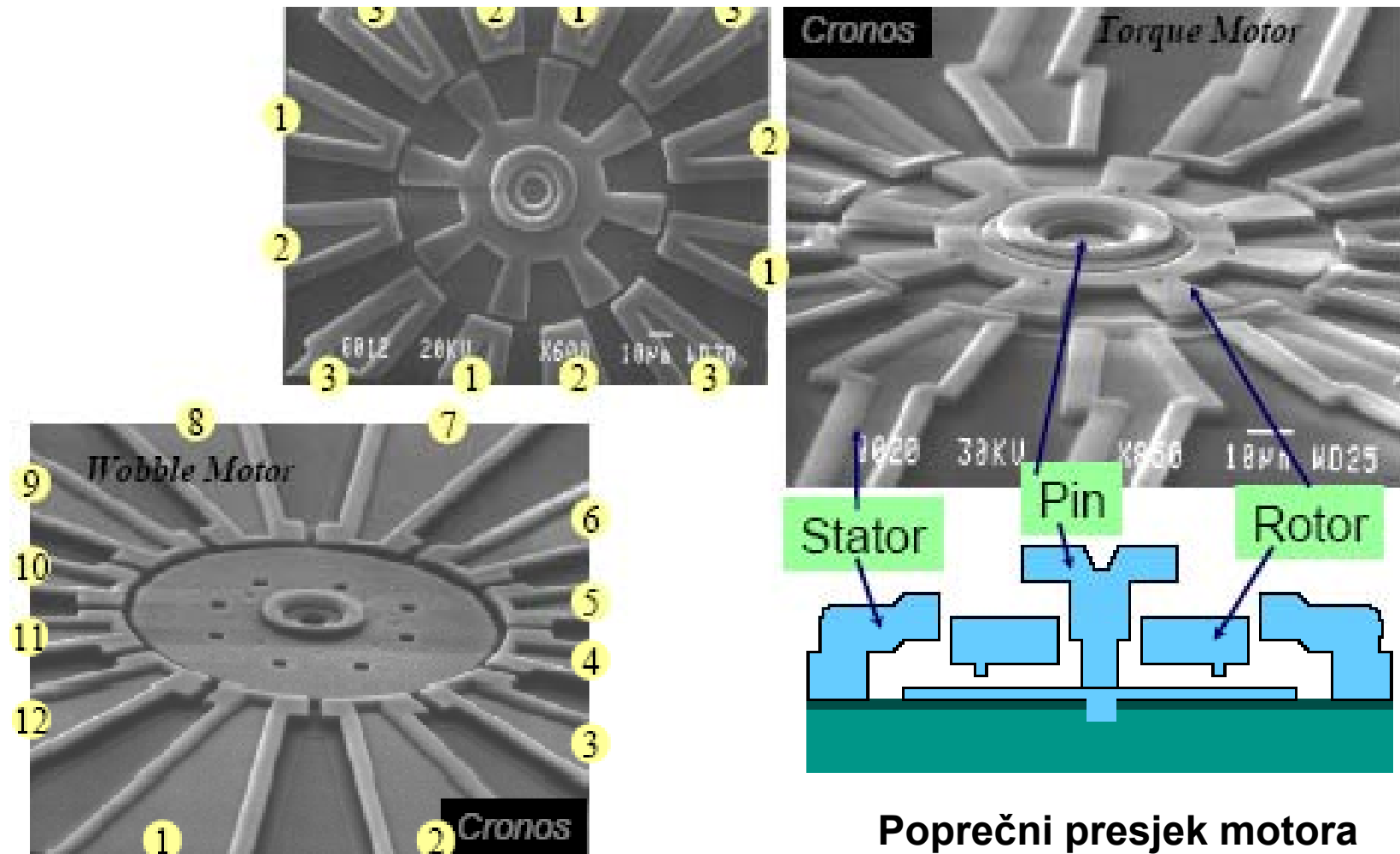
wobble motor

## Rotacijski elektrostatički aktuator

- S obzirom da je obim otvora rotora malo veći od obima osovine rotor se zapravo okrene za nešto više od jednog kruga po završenom ekscentričnom okretu.
- Time se smanjuje trenje ali i postiže veći obrtni momenat na manjim brzinama.
- Danas: brzina vrtnje do 300.000 obrtaja/minut (kod linearnih motora brzina do 1 mm/s).
- Napon do 300 V.
- Fabrikacija (mikrostrojna obrada):
  - polisilicij oksid.
  - metal.

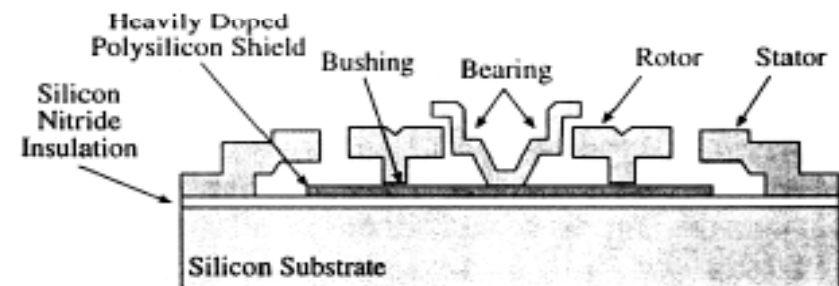
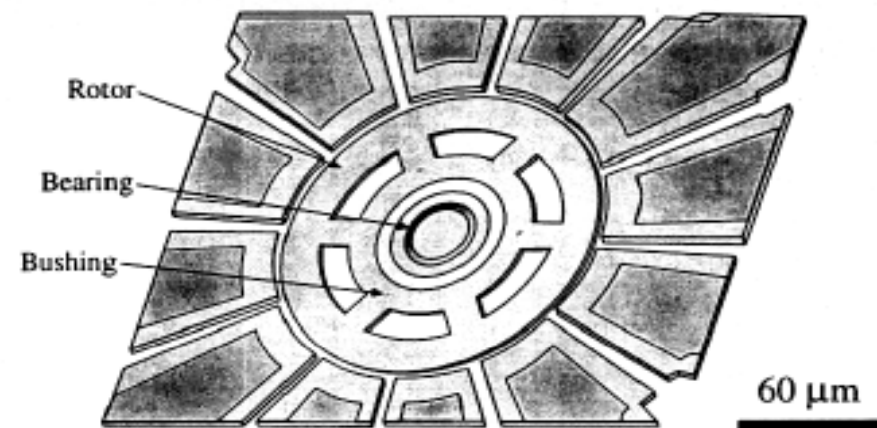
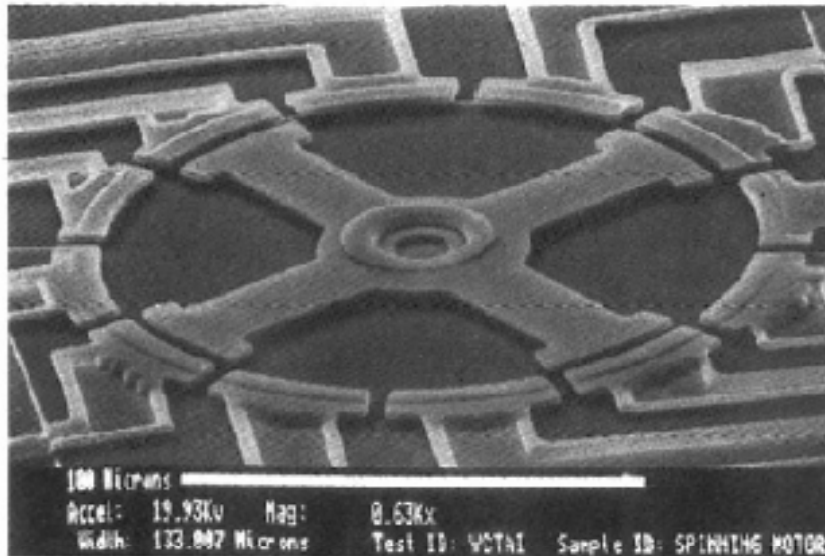
# Rotacijski elektrostatički aktuator

- Elektrostatički rotacijski motor.



## Rotacijski elektrostatički aktuator

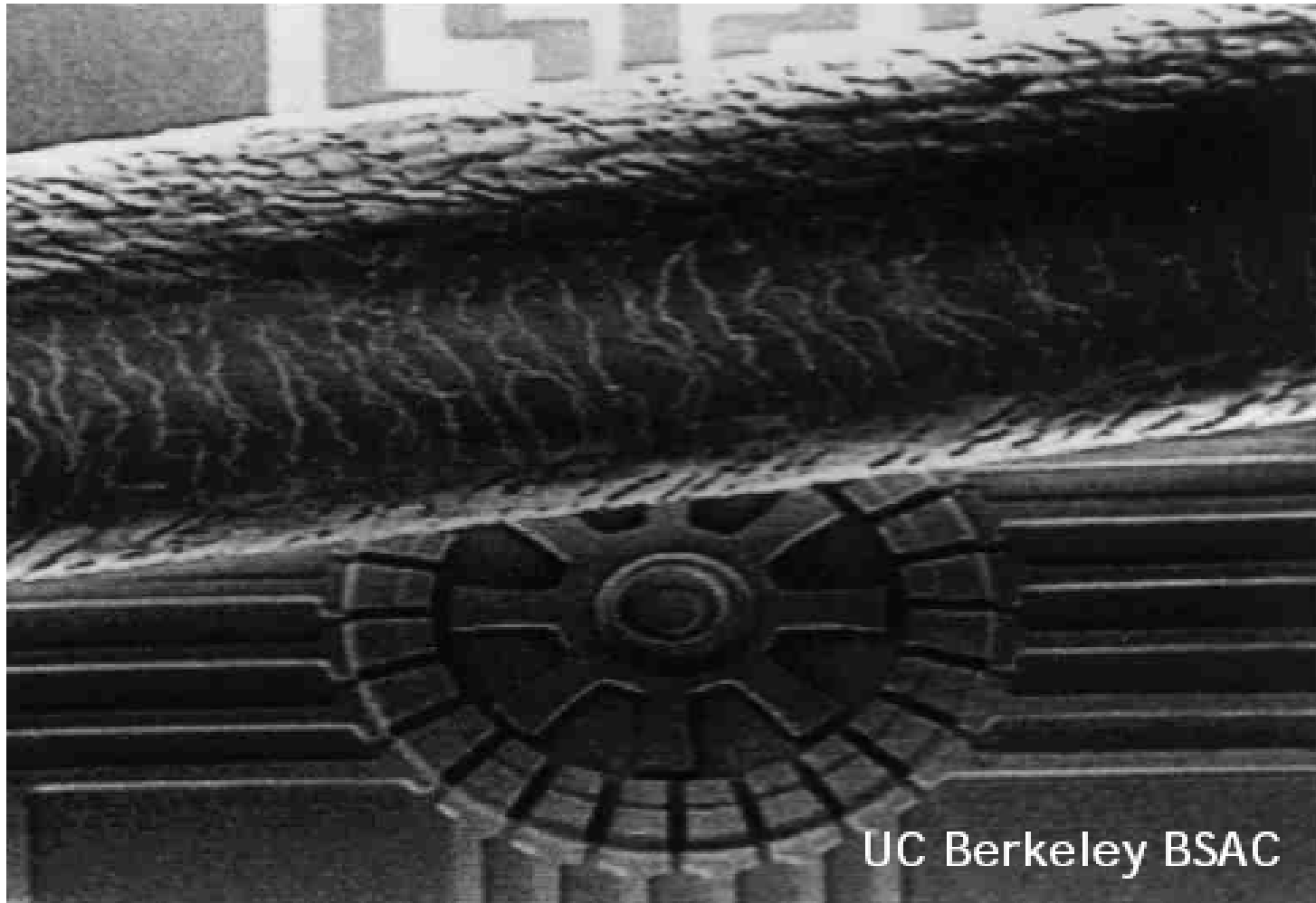
- Elektrostatički aktuatori (motori) se proizvode primjenom tehnika “površinskog mikrostrojarstva”.





# Rotacijski elektrostatički aktuator

- Rotacijski motor



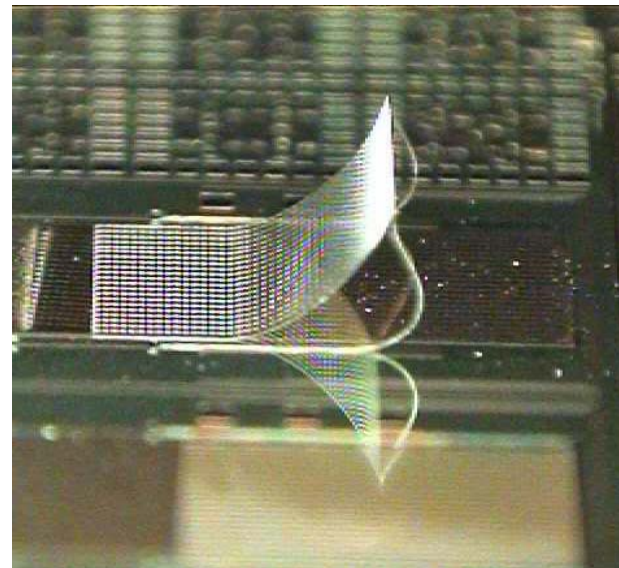
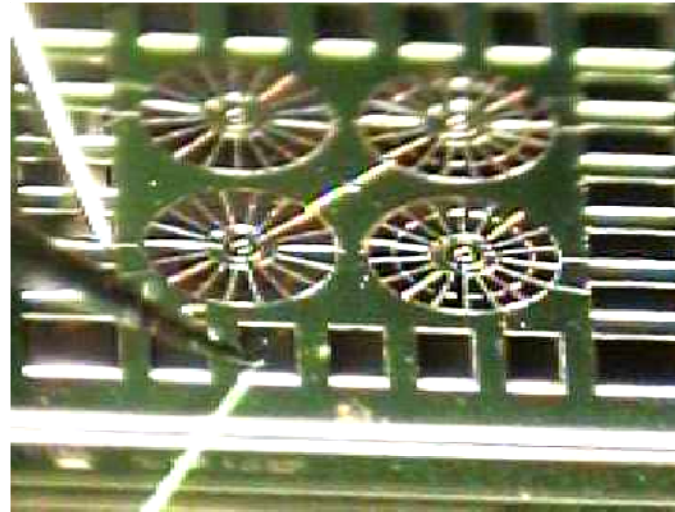
## 12.3.3. Primjena elektrostatičkih aktuatora

- Akcelerometri u hard diskovima



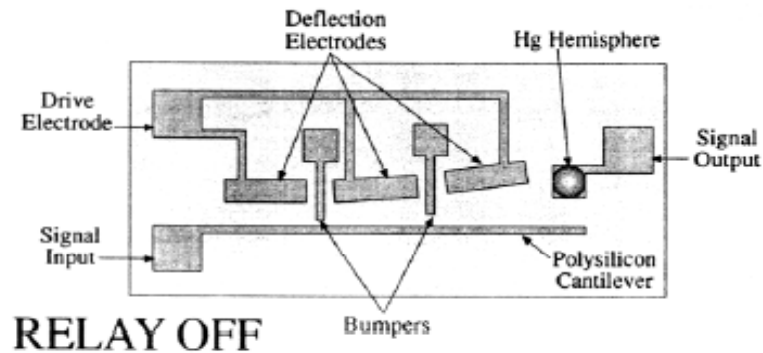
## Primjena elektrostatičkih aktuatora

- 500  $\mu\text{m}$  elektrostatički silicijski mikromotor
- 2 x 3  $\text{mm}^2$  fleksibilni polisilicijski stator

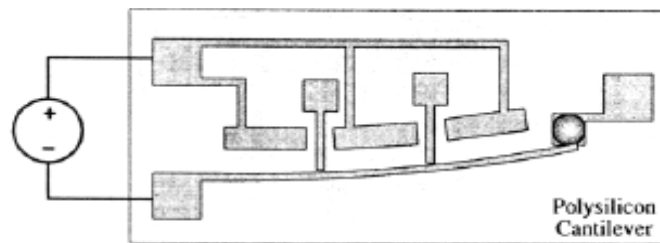


## Primjena elektrostatičkih aktuatora

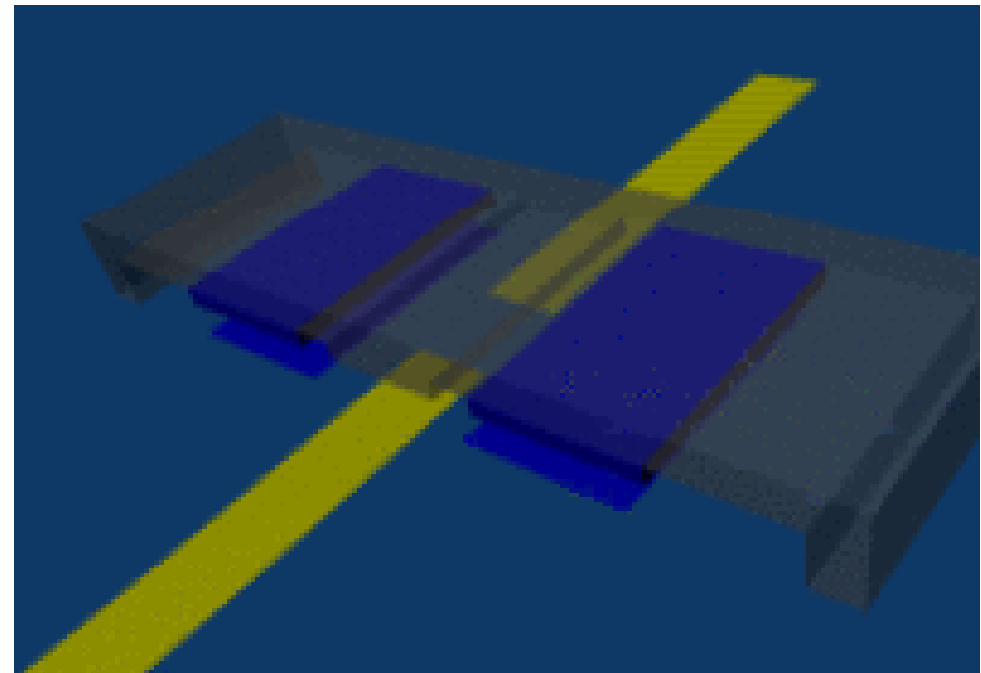
- Prekidač kao elektrostatički aktuator.
- Elektrostatička sila može zatvoriti mikroprekidač.



RELAY OFF



RELAY ON



## 12.3.4. Prednosti i nedostaci elektrostatičkih aktuator

### ▪ **Prednosti:**

- širok propusni opseg (visokofrekvencijske operacije),
- mala potrošnja energije:  $I = C \cdot (dV/dt)$
- jednostavan dizajn,
- jednostavna fabrikacija.

### ▪ **Nedostaci**

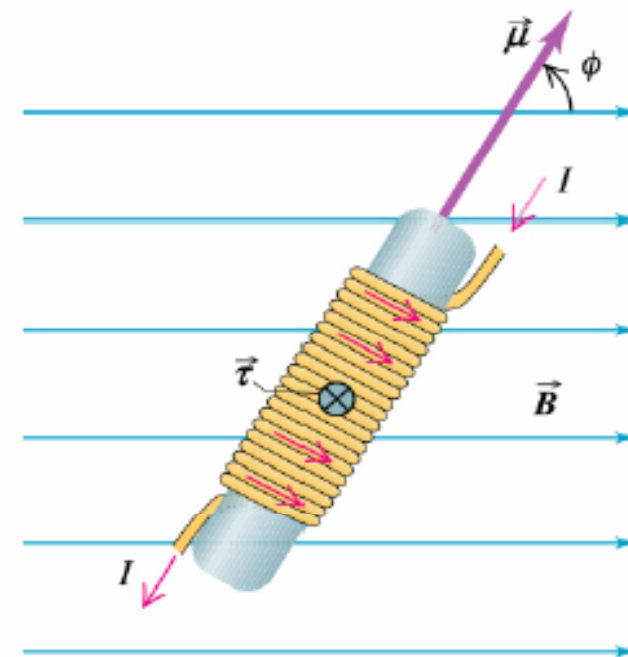
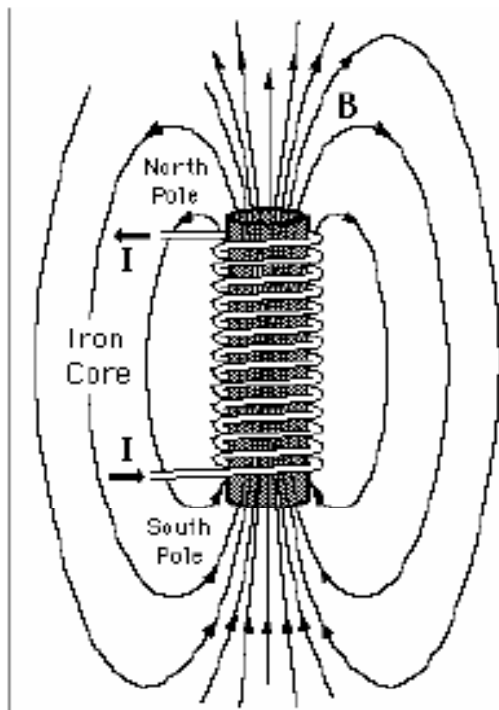
- mala gustoća sile (sila po jedinici volumena),
- potreban visok napon i velika impedancija,
- zahtijeva visoku rezoluciju mask/fab da bi bili efikasni,
- nelinearno djelovanje,
- ograničen broj stupnjeva slobode
  - ✓ kretanje izvan ravnine + kretanje u ravnini.

## 12.4. Elektromagnetski aktuatori

- Sila se generira promjenom magnetskog polja koje deluje na magnetski materijal.
- **Prednosti:**
  - velika sila s obzirom na dimenzije aktuatora,
  - sposobnost privlačenja i odbijanja,
  - linearan odziv struje.
- **Nedostaci**
  - veliki otisak aktuatora (~cm),
  - zahtijeva vanjske izvore za generiranje magnetskog polja,
  - složena proizvodnja i sklapanje na mikro razini, poseban problem proizvodnja namota,
  - visoka potrošnja energije i međudjelovanje magnetskog polja sa bliskim komponentama sistema.
- Ukorporiranje mikro fabrikacije permanentnog magneta u MEMS fabrikacijske procese je otvoreno i aktivno područje istraživanja.

## 12.4.1. Magnetska aktuacija

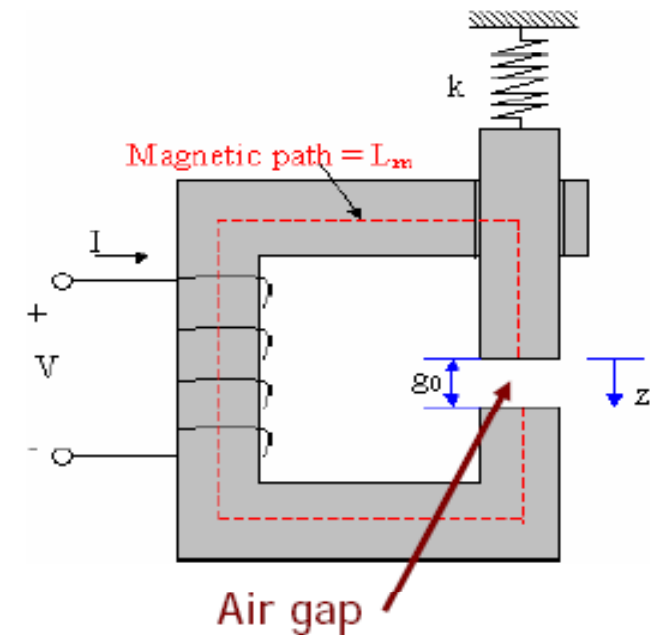
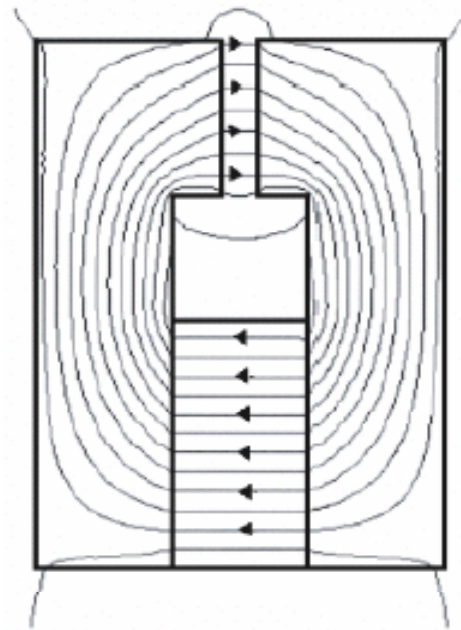
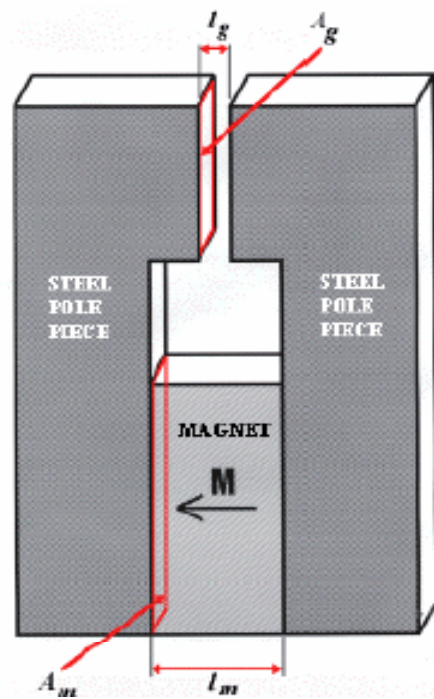
- Gradijenti magnetskog toka mogu pogoniti feromagnetske materijale: sila ili moment.
- Sila ovisi o jačini polja i gradijentu.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

## Magnetska aktuacija

- Osnovni element je magnetski krug koji se sastoji od feromagnetskog materijala sa nemagnetskim rasprom.
- Magnetsko polje ima tendenciju smanjenja zračnog raspora.





## Magnetska aktuacija

- Određivanje/računanje B magnetskog polja korištenjem
  - Biot-Savart zakona,
  - Potencijala.

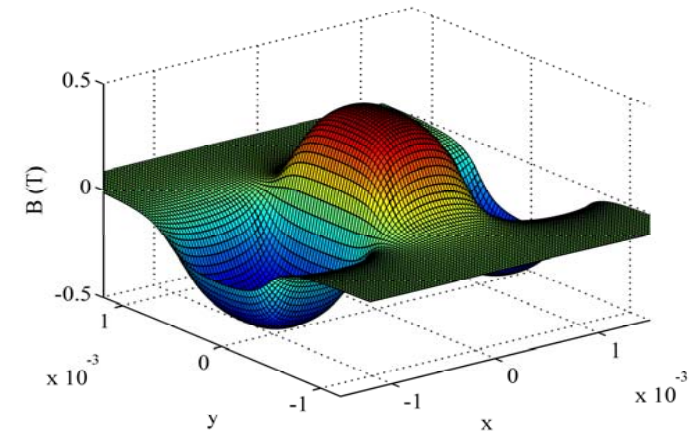
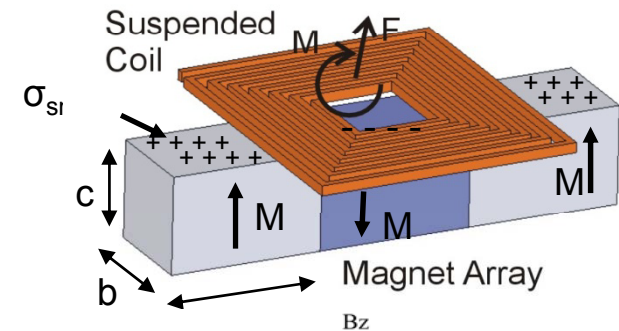
$$\vec{B}(\vec{r}) = -\mu_0 \nabla \phi(\vec{r})$$

- $B$  se koristi za računanje sile:

$$\vec{F}_{coil} = \int_L \vec{i} \times \vec{B}(\vec{r}) dl$$

- Modeliranje sistema korištenjem matrice krutosti:

$$\vec{x}_{stage} = K^{-1} \vec{F}_{coil}$$



## Magnetska aktuacija

- Elektromagnetska sila iznosi:

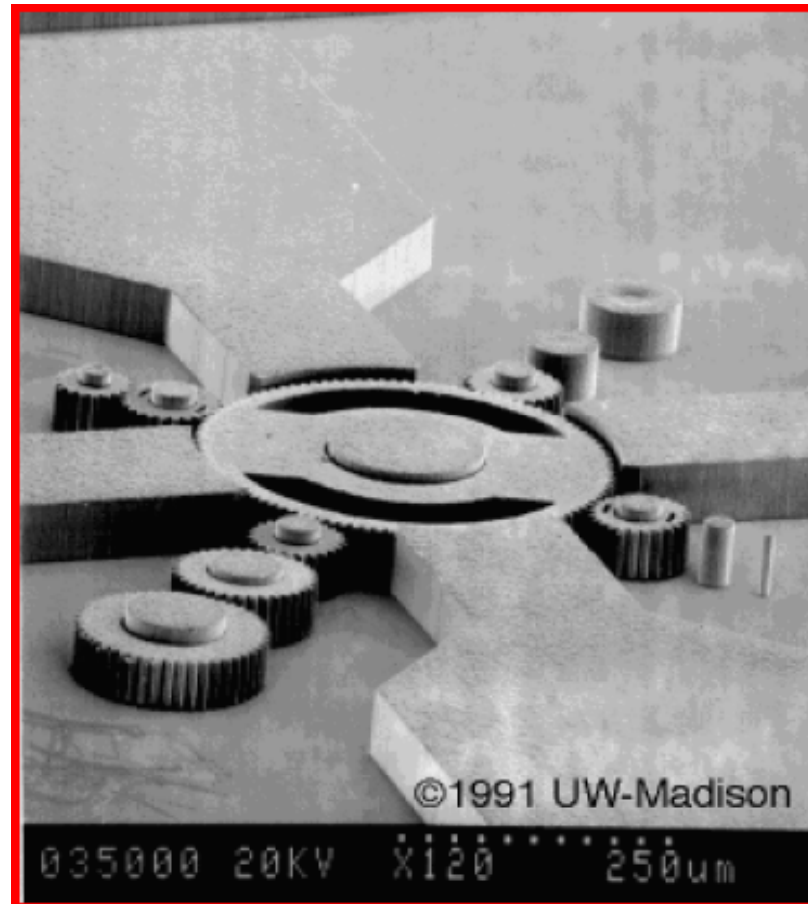
$$F_{emag} = \frac{B}{2\mu} S$$

gdje su:

- $B$  – gustoća magnetskog toka,
- $\mu$  – magnetska permeabilnost,
- $S$  – površina poprečnog presjeka namota.

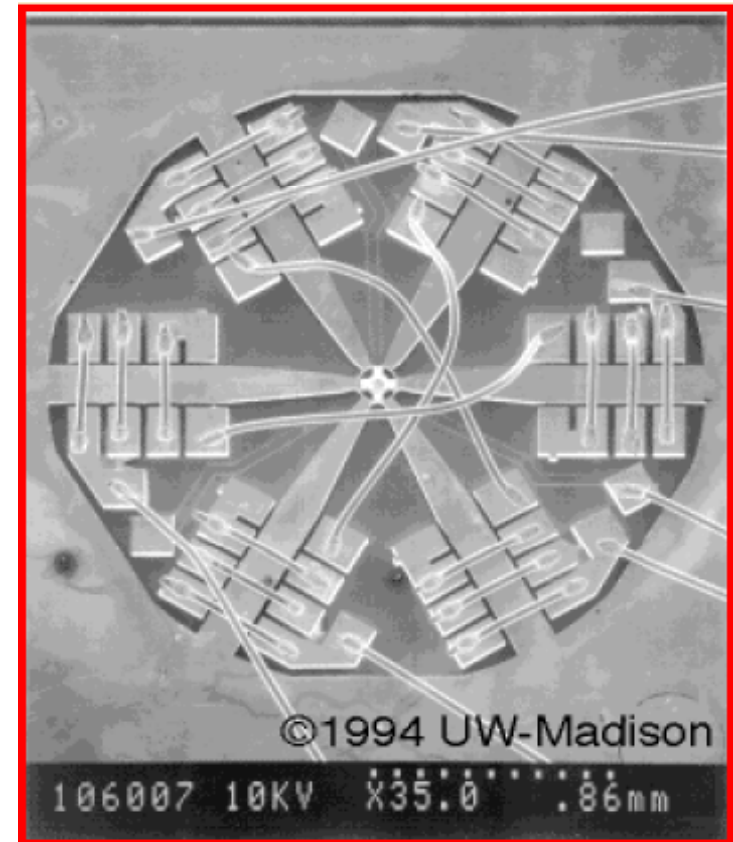
## 12.4.2. Elektromagnetski aktuatori

- Prvi mikromagnetski aktuator je proizveden 1991. godine.
- To je verzija varijabilnoreluktancijskog koračnog motora sa istaknutim polovima na rotoru.



## Elektromagnetski aktuatori

- Elektromagnetski varijabilnoreluktancijski koračni motor proizveden 1994. godine razvijao je 150.000 obrtaja u minuti.
- Motor koristi integrirane namote i fotodiodni enkoder na osovini.
- Rotor i stator su proizvedeni od nikla sa litografijom dubokih x-zraka ( $\lambda=0.2-0.6$  nm) i procesom električkog oblaganja.
- Prekaljeni nikal poboljšava magnetska svojstva materijala.
- Veličina rotora je  $100\ \mu\text{m}$  i statora  $150\ \mu\text{m}$ .
- Novije verzije elektromagnetskih aktuatora koriste električkim putem presvučeni permaloj.



# Elektromagnetski aktuatori

- Fabrikacija elektromagnetskog aktuatora

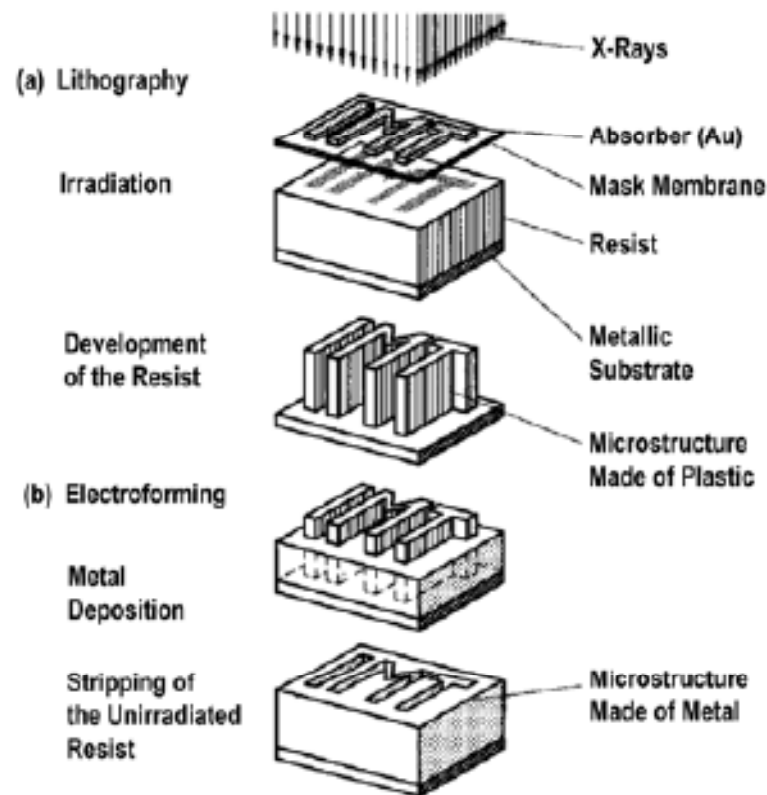
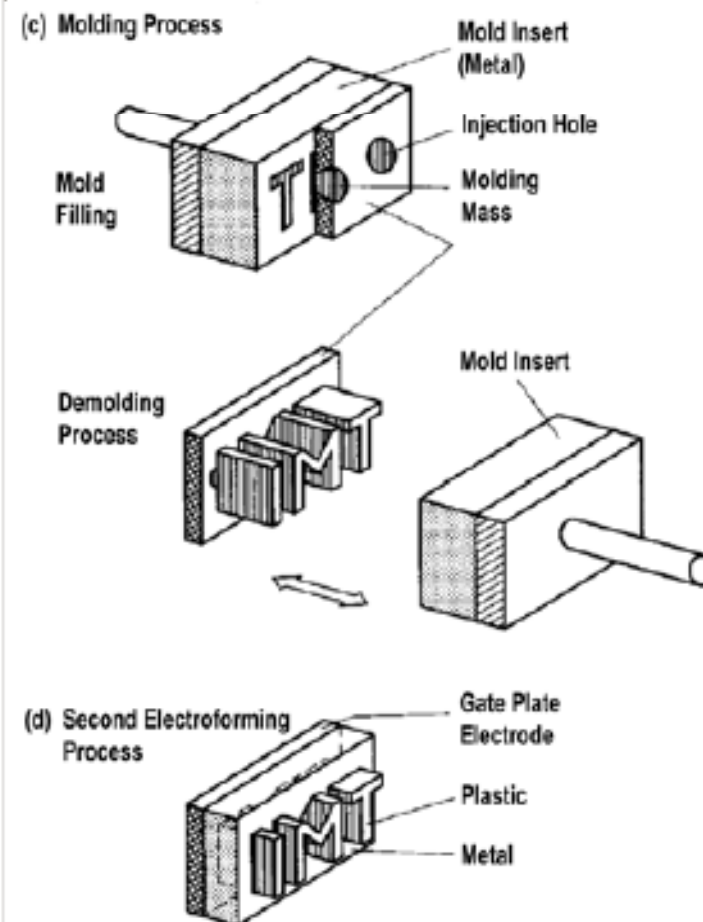
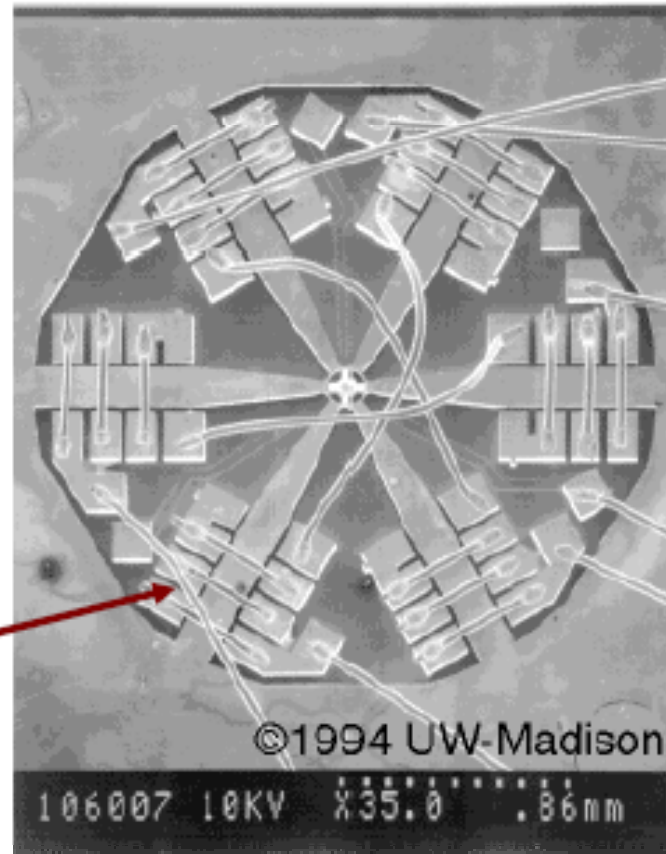


Figure: W. Menz, J. Mohr and O. Paul, 2001, p. 290.

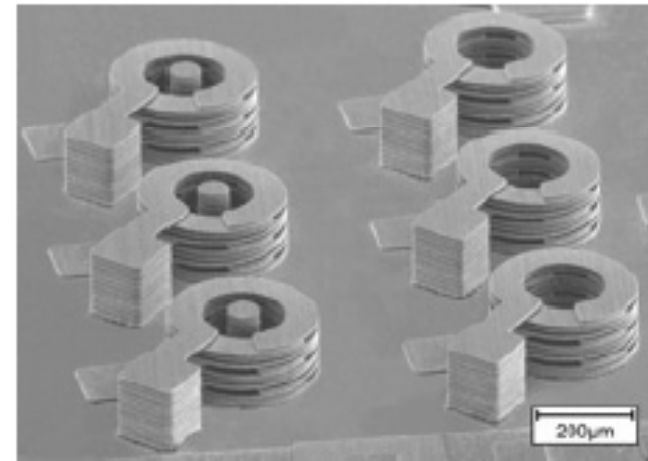


## Elektromagnetski aktuatori

- Magnetske motore na mikro razini je težko proizvesti jer se zahtijevaju namoti.



Namoti na motoru.

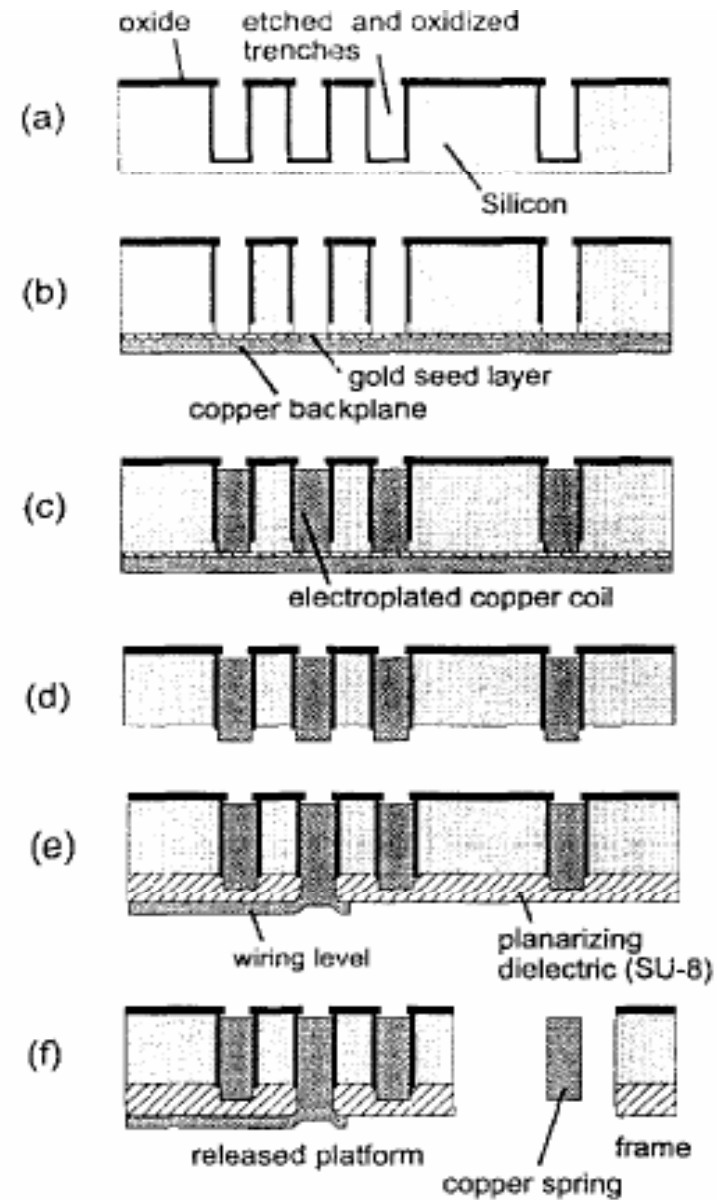


Mikrofabrički namoti – tehnologija mikronamota. Kombinacija litografije x-zrakama i elektrodepozicije.

Litografija je planarni proces – namote je teško izgraditi.

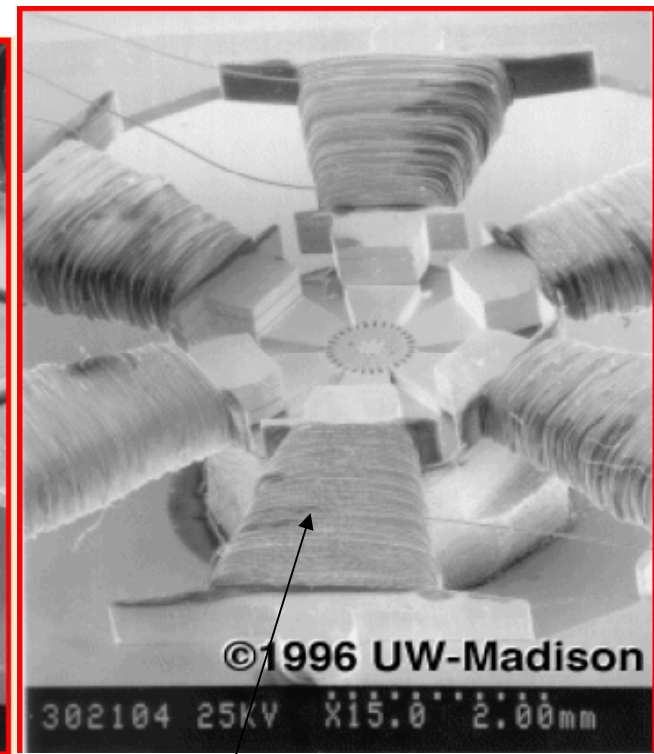
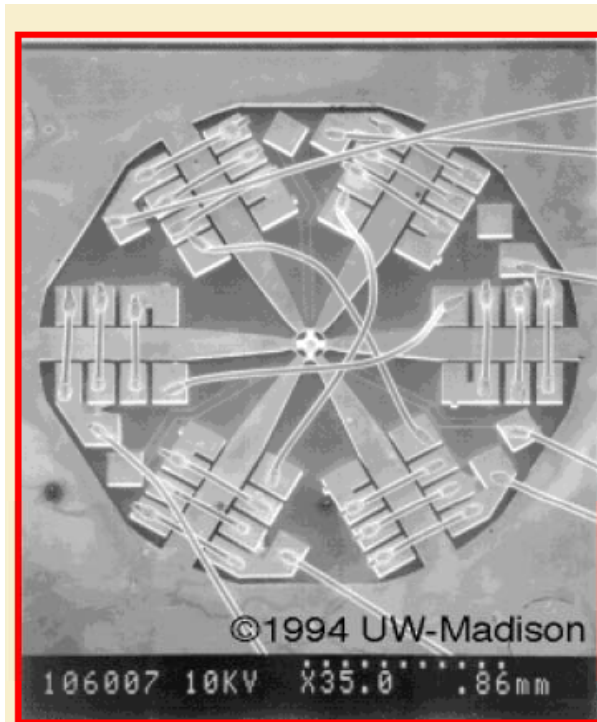
# Elektromagnetski aktuatori

- Fabrikacija mikronamota



# Elektromagnetski aktuatori

- Mikronamoti

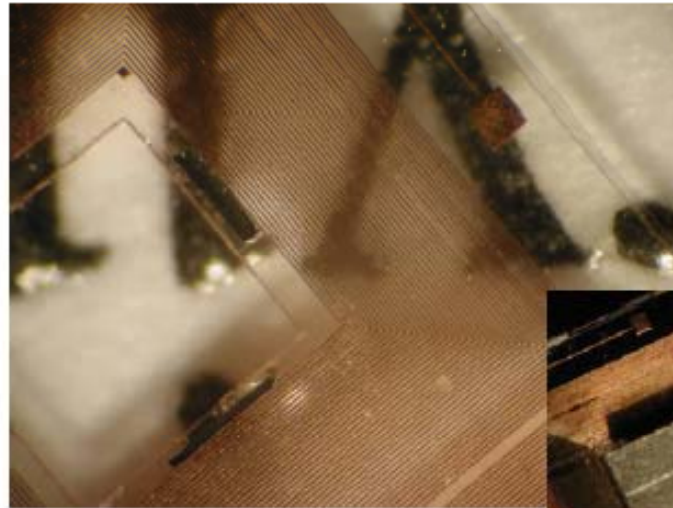
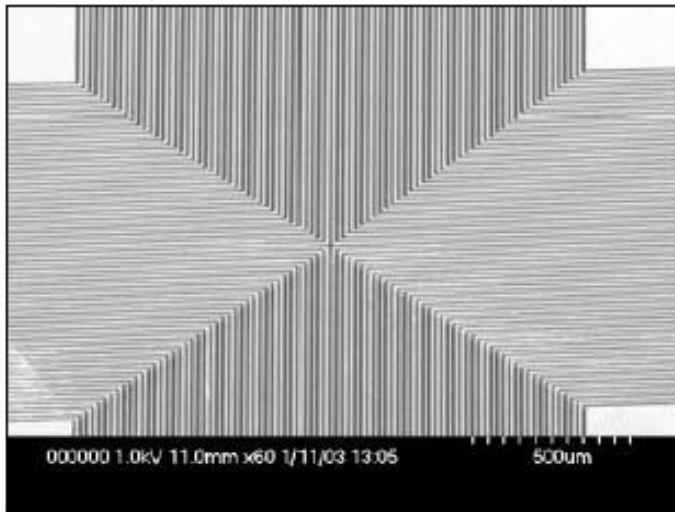


6.800 namota (mikro) na statorskim polovima.

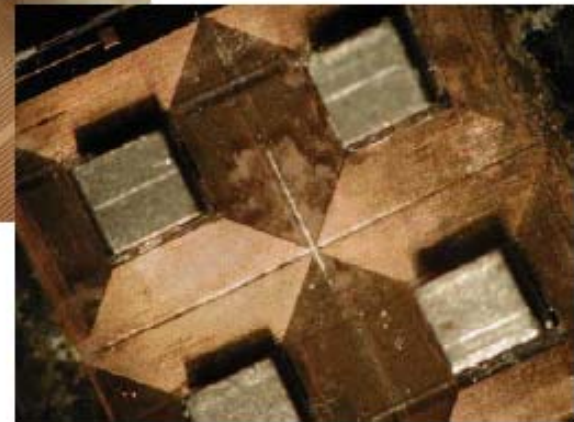


## Elektromagnetski aktuatori

- Višestruke namote je teško izgraditi litografskim procesima.



$$B = NI$$



**Višestruki namoti su potrebni za minimizaciju zahtjeva na struju (zagrijavanje).**

## Elektromagnetski aktuatori

- XYZ skener za aplikacije u sondama.
- Performanse:  $100 \times 100 \times 10 \mu\text{m}$ / rezonancija na 61Hz.

