



Lekcija 13

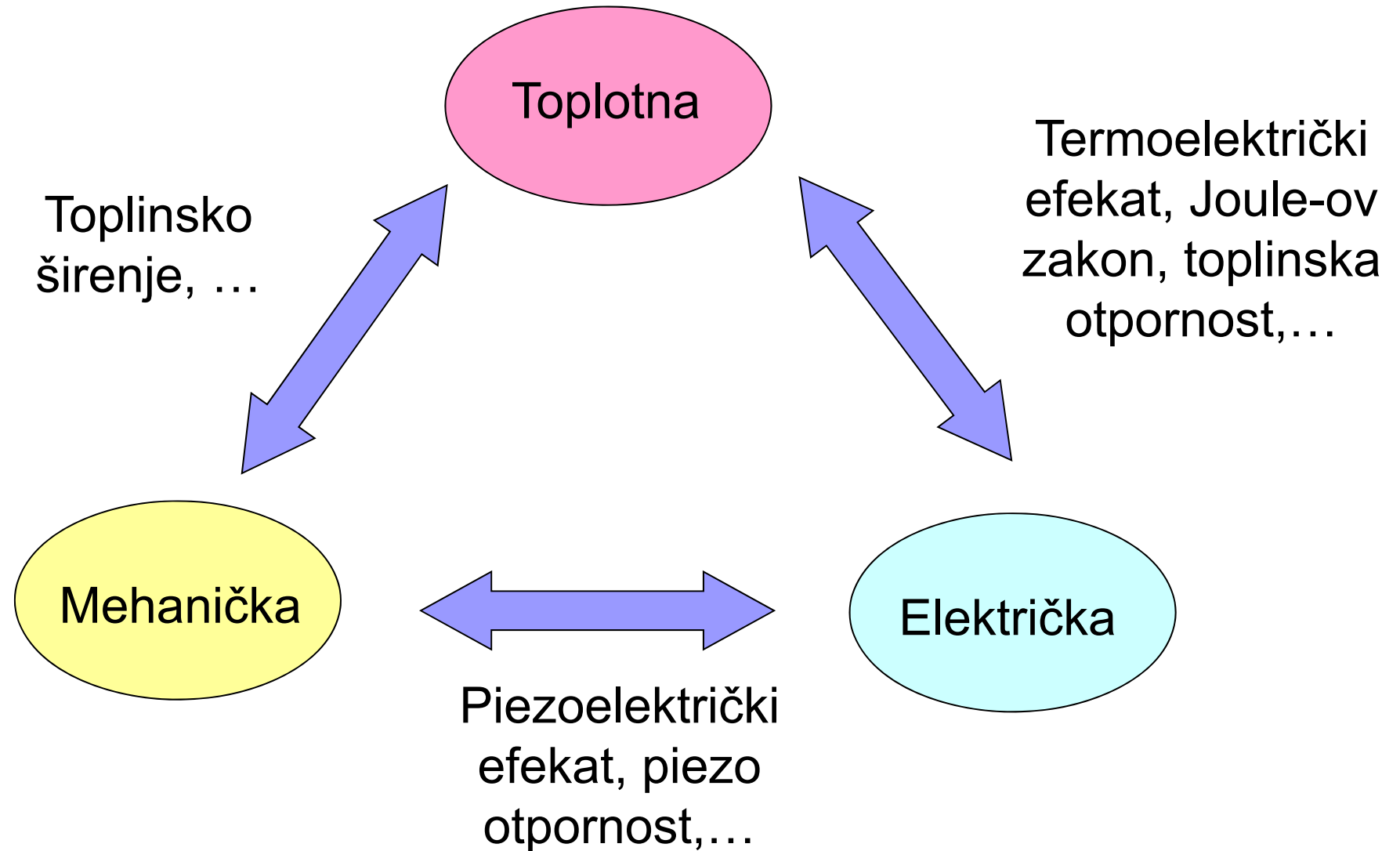
Termalni aktuatori

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

13.1. Termalna (toplinska) aktuacija

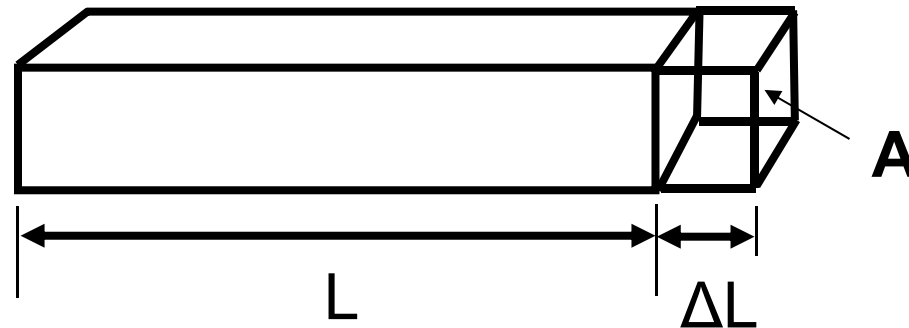
- Princip pretvorbe toplinske energije u mehaničko kretanje (aktuaciju).
- Koristi se svojstvo širenja tijela usljed zagrijavanja kako bi se proizvelo kretanja.
- Kada električka struja teče kroz usku polugu (šipku), poluga će se zagrijavati i širiti zbog visoke specifične otpornosti i gustoće struje.
- Kada struja prestane teći, poluga će se vratiti u prvobitni oblik.
- Termalni aktuatori se grade od sljedećih materijala: metala, poluvodiča, keramike, polimera.

Pretvorba energije



13.1.1. Efekat toplinskog širenja (ekspanzije)

- Širenje krutog tijela usljed zagrijavanja.



- Koeficijent toplinskog širenja** α predstavlja relativnu promjenu duljine usljed jedinične promjene temperature.
- Toplinsko naprezanje** ε_T :

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T$$

- Toplinski udar** σ_T :

$$\sigma_T = E \varepsilon_T = E \alpha \Delta T$$

Efekat toplinskog širenja (ekspanzije)

- Sila usljed toplinskog širenja F (izlaz):

$$F_T = A \sigma_T$$

- Tipične vrijednosti koeficijenta toplinskog širenja različitih materijala:

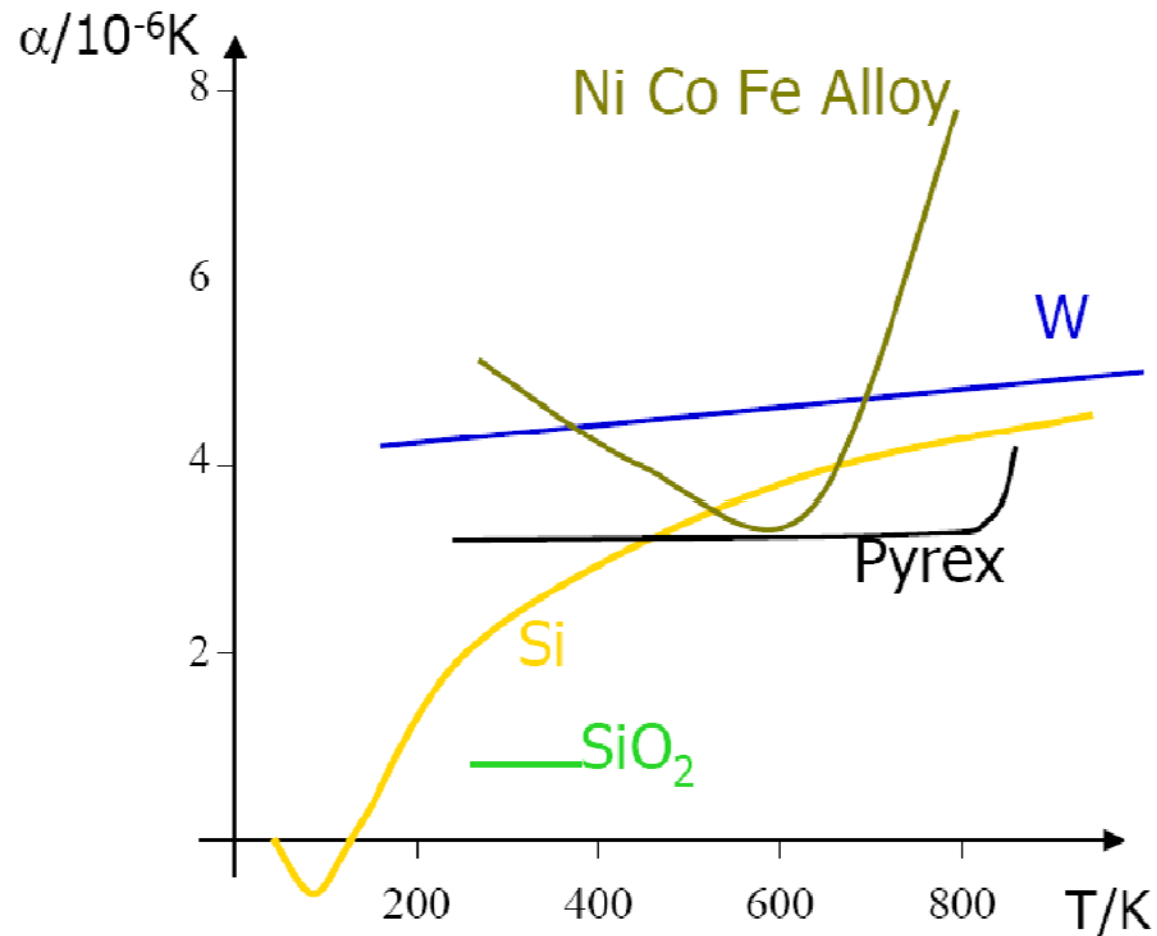
c - toplinski kapacitet – izražava sposobnost pohrane toplinske energije

κ – toplinska vodljivost – izražava sposobnost prijenosa topline.

	c (J/kg·K)	κ (W/cm·K)	α ($10^{-6}/K$)
Si	712	1.49	2.6
Polysilicon	920 (?)	0.34	2.33
SiO₂	745	0.0138	0.35
Al	903	2.37	25.0
Au	129	3.18	14.2
GaAs	325	0.56	5.4
Polyimide (Dupont PI2611D)			3.00
Polyimide (Amoco Ultradel 1414)			191

Efekat toplinskog širenja (ekspanzije)

- Ovisnost koeficijenta toplinskog širenja o temperaturi zagrijavanja



Primjer 1 (1/2)

Pretpostavimo da imamo silicijsku polugu duljine $100 \mu\text{m}$, širine $1 \mu\text{m}$ i visine $1 \mu\text{m}$. Poluga se zagrijava do temperature od 100 K (uzeti da je početna temperatura 0 K) ($\alpha_{\text{silicija}} = 2.6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$, $E_{\text{silicija}} = 450 \text{ GPa}$).

Potrebno je odrediti:

- silu koja se razvija usljed zagrijavanja.
- produljenje poluge usljed zagrijavanja.

Rješenje:

- Sila usljed toplinskog širenja:

$$F_T = A \sigma_T = AE \alpha \Delta T .$$

$$F_T = (10^{-3} \cdot 10^{-3}) \cdot (450 \cdot 10^3) \cdot 2.6 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 117 \mu\text{N}.$$

Primjer 1 (2/2)

b) Produljenje poluge:

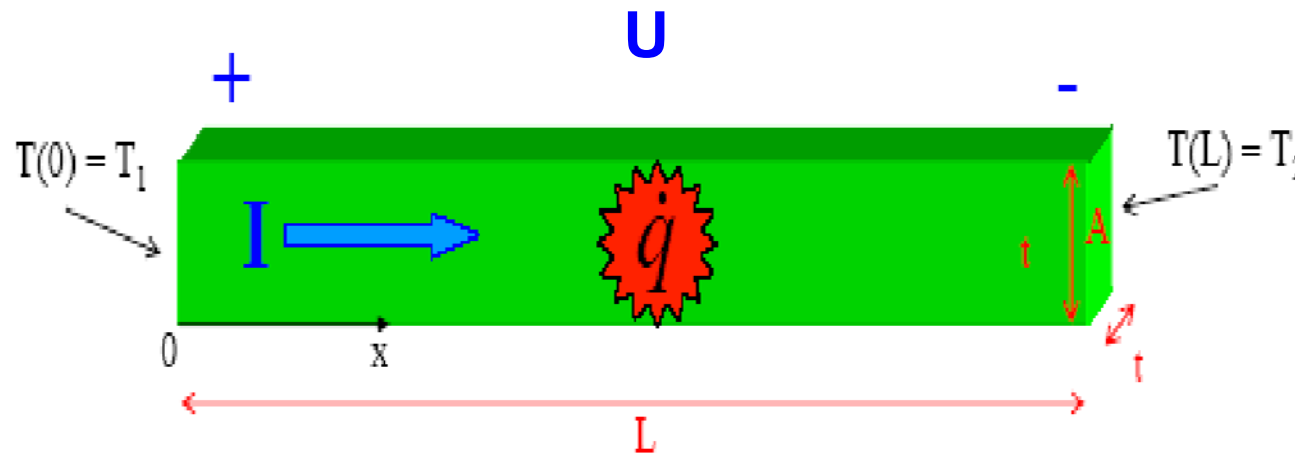
$$\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon_T .$$

$$\Delta L = L \varepsilon_T = L \alpha \Delta T .$$

$$\Delta L = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 2.6 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 26 \text{ nm} .$$

13.1.2. Elektrotermalni efekat (aktuacija)

- Tijelo se širi usljed zagrijavanja i uzrokuje kretanje strukture.



- Energija:

$$q = I^2 R = \frac{I^2 L \rho}{A}$$

ili

$$q = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 A}{L \rho}$$

Elektrotermalni efekat (aktuacija)

- Gustoća energije:

$$\dot{q} = \frac{q}{V} = \frac{I^2 \rho}{A^2}$$

ili

$$\dot{q} = \frac{q}{V} = \frac{U^2}{L^2 \rho}$$

- Prijenos toplote

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q} = 0,$$

$$T(x) = \frac{1}{2} \frac{\dot{q}}{\kappa} (Lx - x^2) + \frac{1}{L} (T_2 - T_1)x + T_1$$

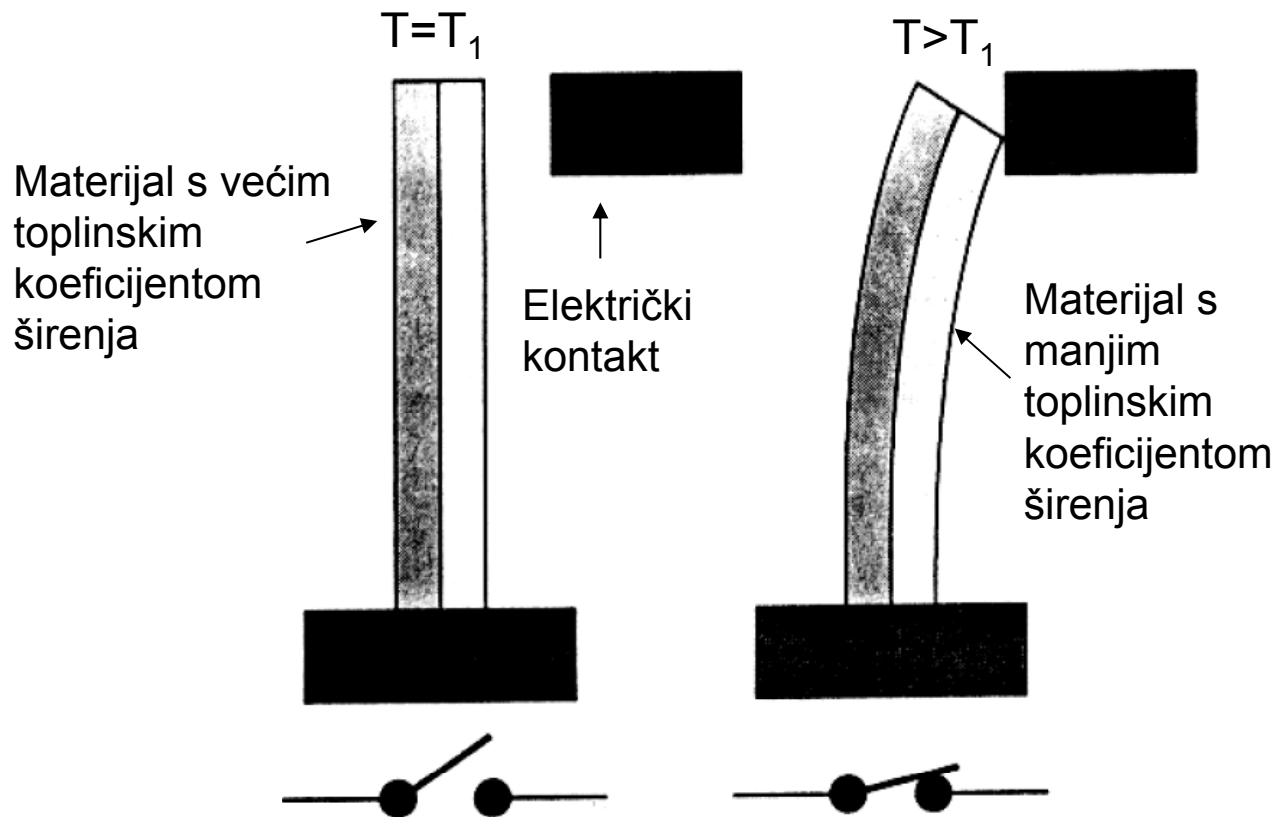
Elektrotermalni efekat (aktuacija)

- Produljenje usljed zagrijavanja: nova duljina L_{novi}

$$L_{novi}(x) = \int_0^x [1 + \alpha(T(\chi) - T_0)] d\chi$$

13.1.3. Termalni bimorfizam metala

- Bimetalna poluga (dva slijepljena metalna materijala različitih toplinskih koeficijenata širenja).
- Protokom struje kroz njih dolazi do savijanja



Polumjer savijanja bimetalne poluge:

$$R = \frac{(l_1 + l_2)^2}{6(\alpha_1 - \alpha_2)(T_1 - T_0)l_1l_2},$$

gdje su:

l_1, l_2 – debljina svakog materijala
 T_0 – početna temperatura [°C],
 T_1 – krajnja temperatura [°C],
 α_1, α_2 – toplinski (temperaturni) koeficijenti širenja materijala [°C⁻¹].

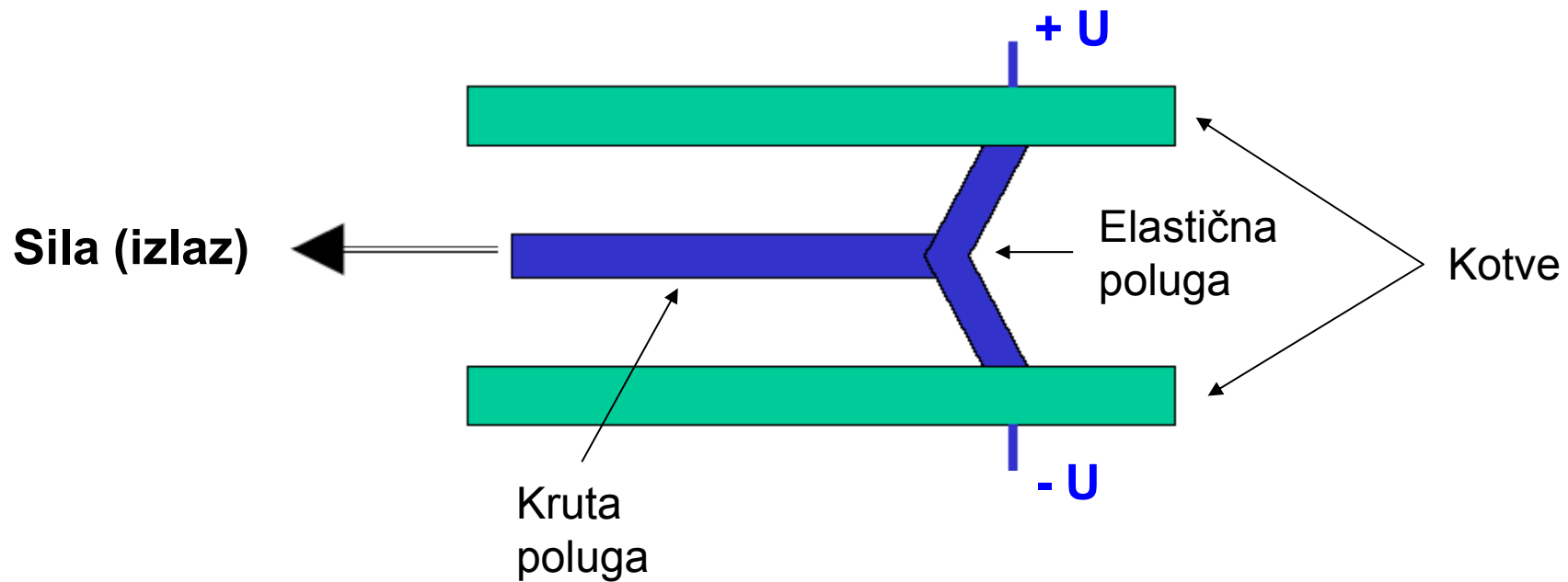
Na ovom principu radi termalni bimorfni prekidač.

13.2. Podjela termalnih aktuatora

- Aktuatori koji koriste efekte toplinskog širenja ili su pogonjeni toplinskom energijom:
 - Termoelastični aktuatori.
 - Termalno bimorfni aktuatori.
 - Bimorfni elektrotermalni aktuatori.
 - Termalni pneumatski ventili.
 - Aktuatori za pohranu podataka (glave za pisanje/čitanje).
 - Memorijski oblikovani aktuatori.

13.2.1. Termoelastični akuatori

- Elektro-toplinsko-mehanički efekti.
- Aktuacija (kretanje) temeljena na toplinskom širenju krutog tijela.

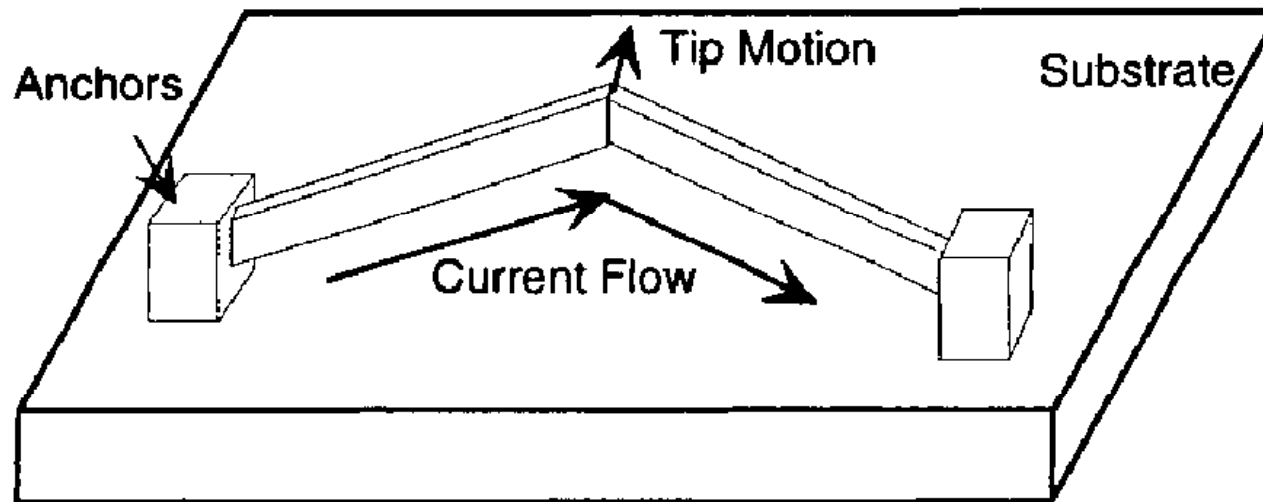


Termoelastični aktuatori

- Elastična poluga se zagrijava \rightarrow T (temperatura) raste \rightarrow toplinsko širenje \rightarrow kretanje poluga (generira se sila za obavljanje rada).
- Izvor zagrijavanja (topline): električka struja (Joule/Ohm toplina).
- Verzije aktuatora s jedim ili više pari poluga (ruku).
- Veoma precizno upravljanje pomacima (rezolucija 10 nm).
- Dizajn ovih aktuatora se općenito ne koristi u praksi jer je malena izlazna sila naspram veličine sistema.

Termoelastični akuatori

- Primjer: toplinski akuator u obliku slova V

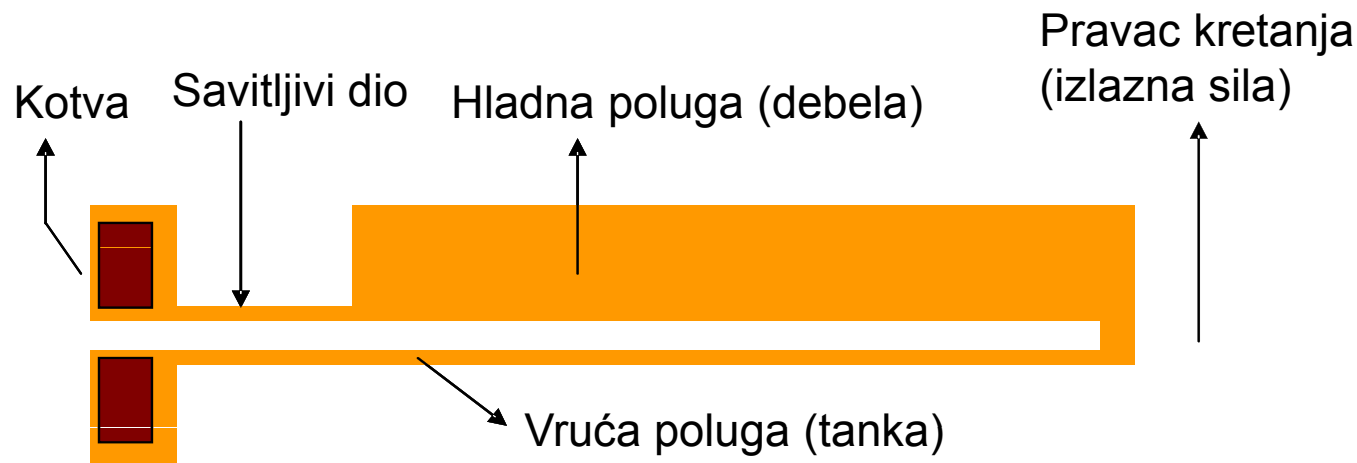


Termalni akuator u obliku slova V

[Que, 1999]

13.2.2. Termalno bimorfni aktuatori

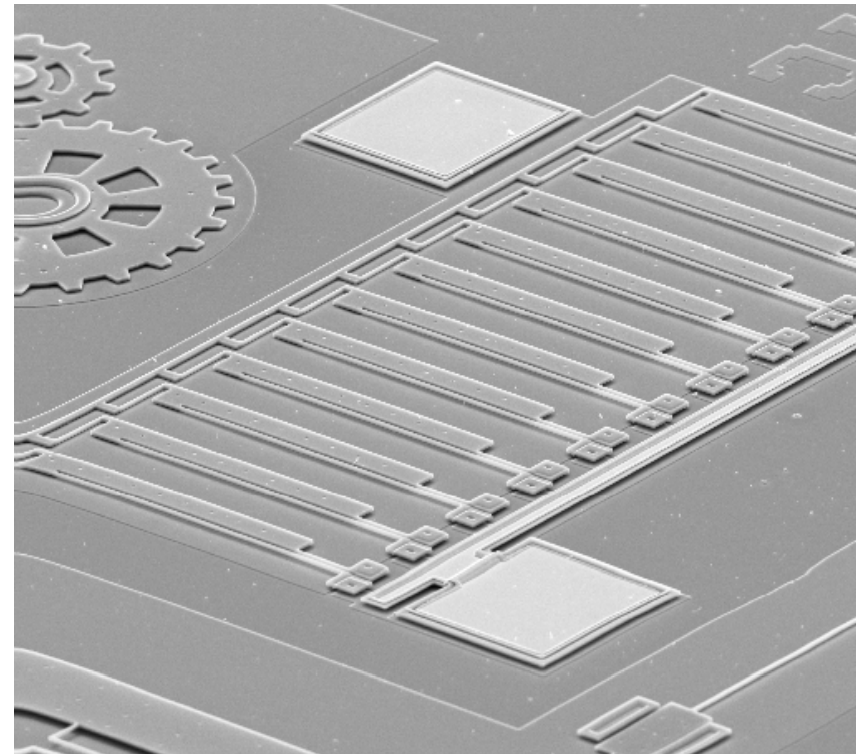
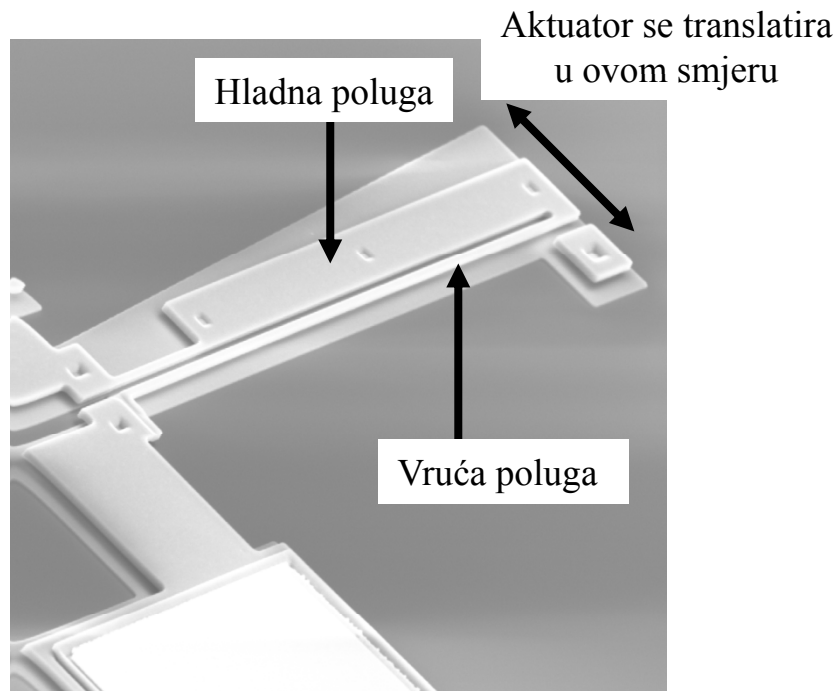
- Toplinski aktuator sa paralelnim polugama.
- Također koristi princip toplinskog širenja, ali za razliku od termoelastičnih aktuatora razvija veće sile.
- Koristi poluge različitih debljina za generiranje kretanja.
- Električka struja protječe kroz cijelu strukturu → raste T vruće poluge → vruća poluga se širi (zakrivljuje) → veliki toplinski udar → diferencijal udara uzrokuje deflekciju.



Paralelne poluge [Guckel, 1992]

Termalno bimorfni aktuatori

Veoma efikasni i proizvode velike iznose sila po jedinici površine.



Kaskada termalnih aktuatora za velike sile.

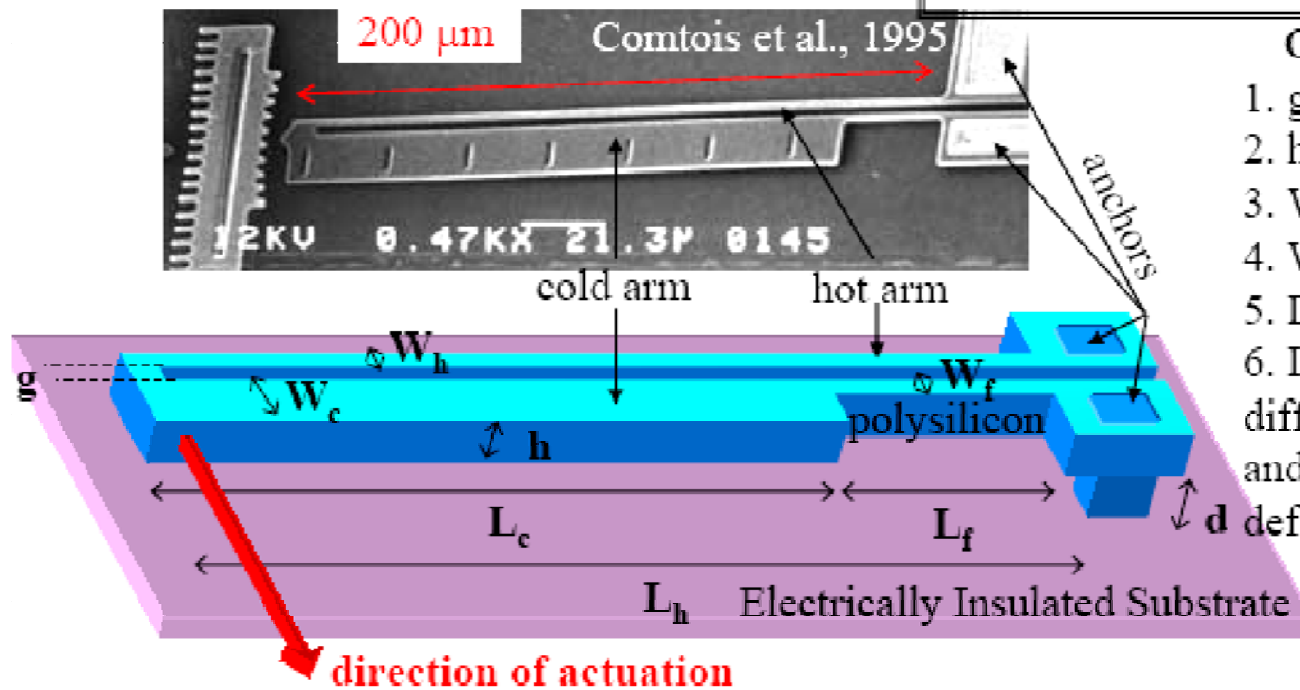
Termalno bimorfni aktuatori

Horizontalna deflekcija

- Laterally/Horizontally Deflecting
 - Motion that is parallel to the plane of the substrate

Example properties needed for modeling an electro-thermal actuator:

- ρ = electrical resistivity = $2.3 \times 10^{-3} \Omega\text{m}$
- α = coefficient of thermal expansion = $29 \times 10^{-7} \text{K}^{-1}$
- α_r = temperature coefficient of resistance = $1.25 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$
- k = thermal conductivity = 32W/mK
- E = Young's modulus = 169GPa
- ν = Poisson's ratio = 0.22

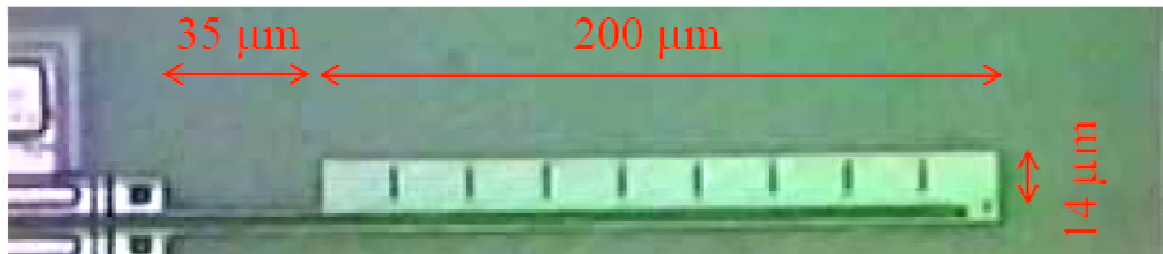


Optimum Dimensions:

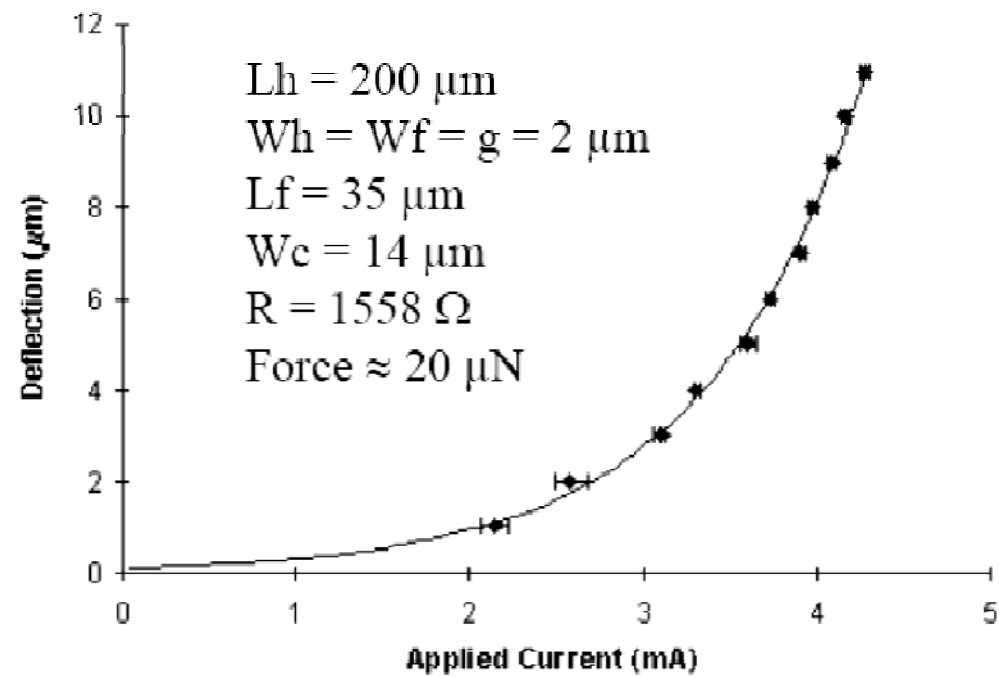
1. g = as small as possible
2. h = as tall as possible
3. $W_c/W_h = 7$
4. W_h = as small as possible
5. $L_f \approx L_h/4$
6. Increasing the temp. difference between the cold and hot arm increases deflection.

Termalno bimorfni aktuatori

Horizontalna defleksija



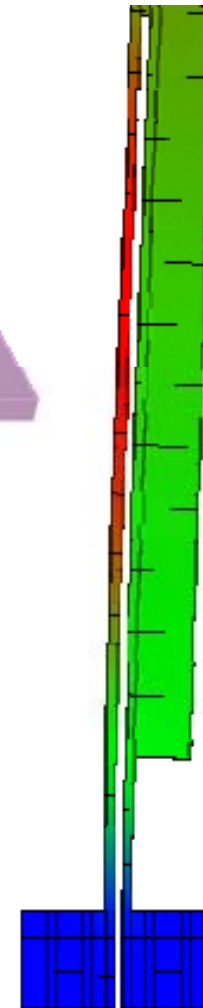
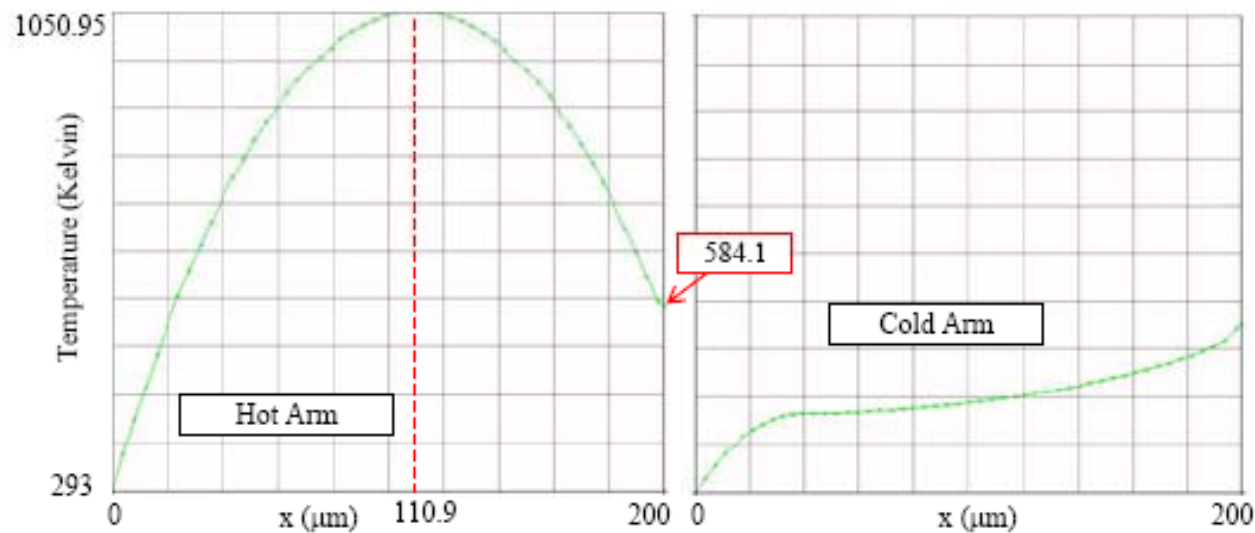
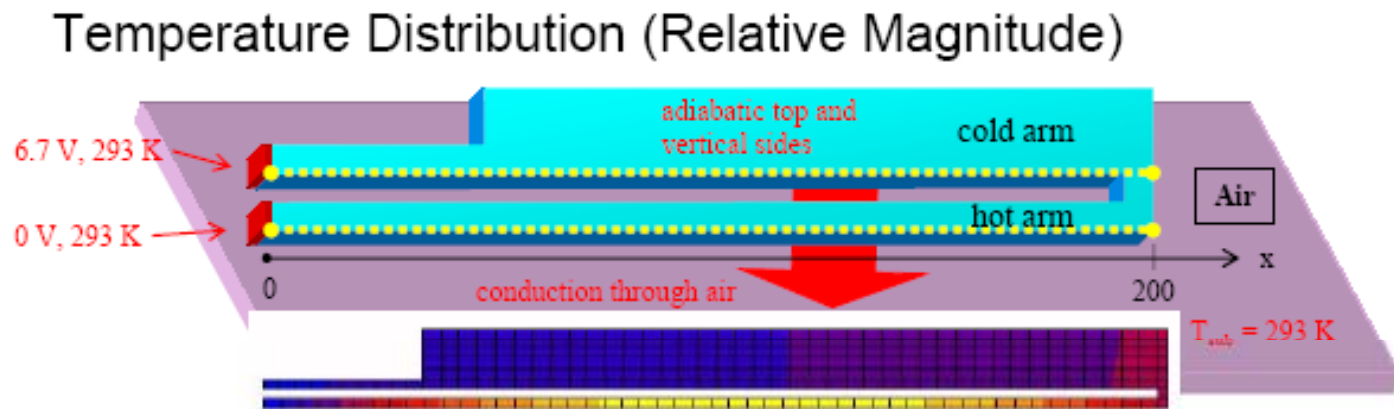
V. Bright et al., AFIT, 1996



Comtois et al., 1995

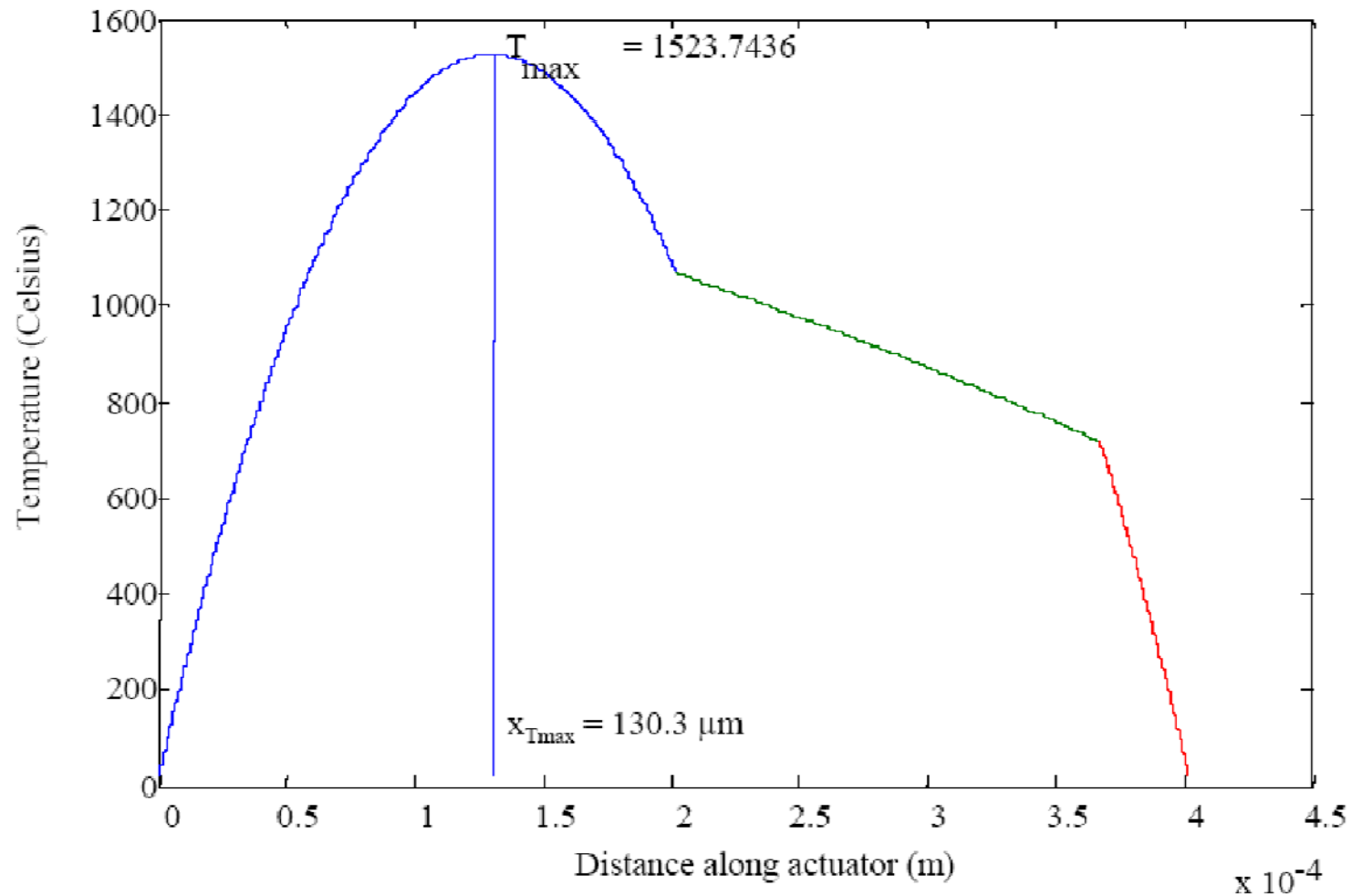
Termalno bimorfni aktuatori

Temperaturna razdioba

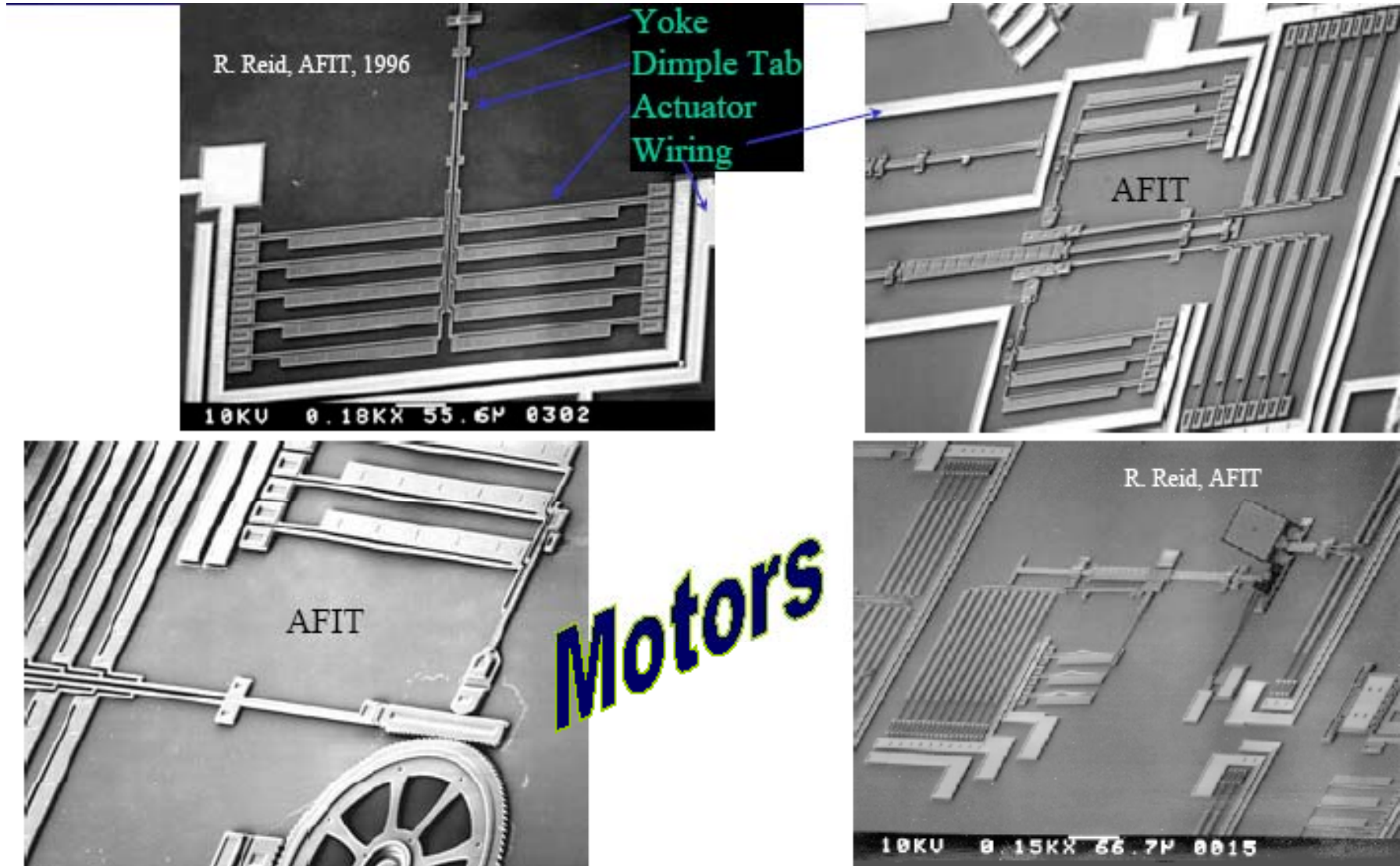


Termalno bimorfni aktuatori

Analitičko modeliranje temperaturne razdiobe lateralno deflektiranog termalnog aktuatora

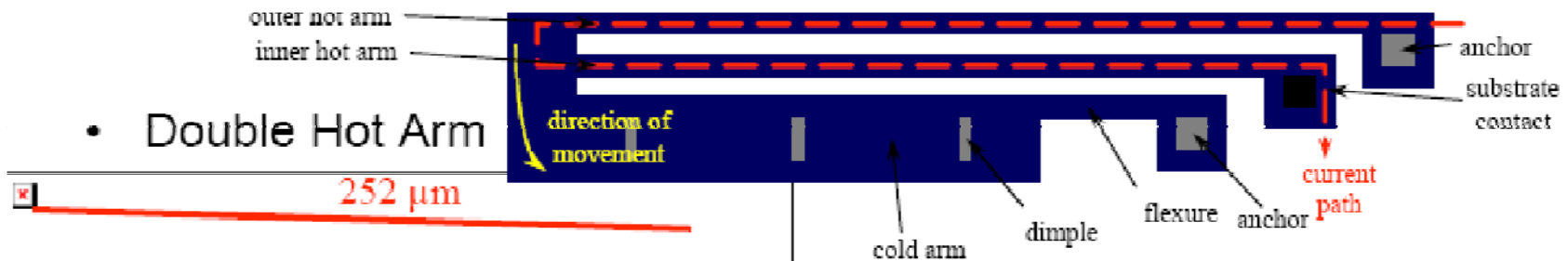


Termalno bimorfni aktuatori



Termalno bimorfni aktuatori

Aktuator sa dvije vruće poluge



- Double Hot Arm

D. Burns et al., AFIT

Design measurements for thermal actuators

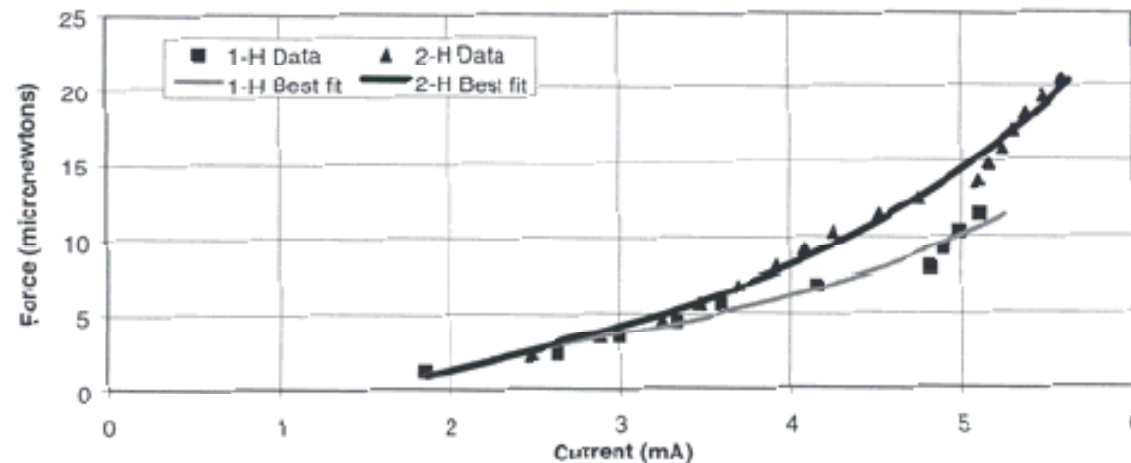
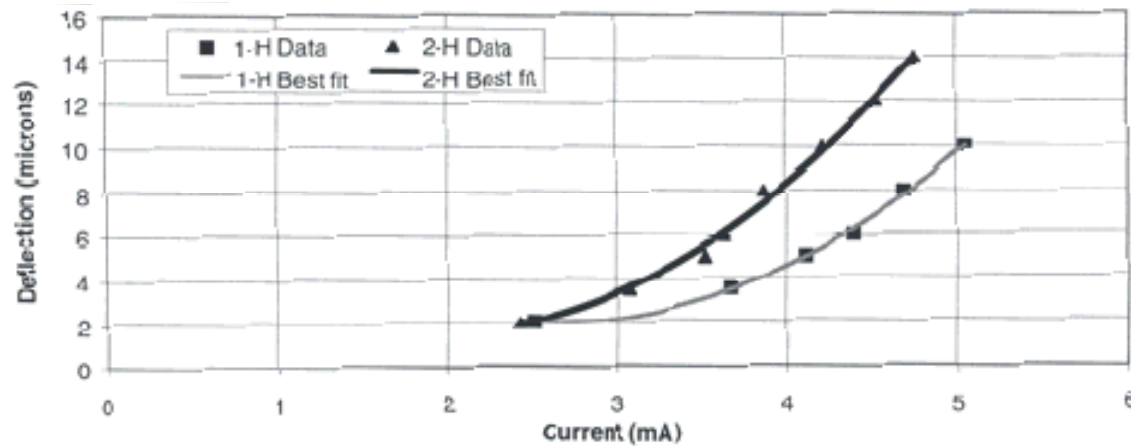
	1-H actuator	2-H actuator
Electrical resistance	1.510 KΩ	2.413 KΩ
Maximum deflection (positive)	10 μm	14 μm
Maximum deflection (backbending)	8 μm	12 μm
Maximum force	11.4 μN	20.5 μN
Maximum current before backbending (under load)	5.12 mA	5.59 mA
Maximum operating frequency (air)	12 KHz	17 KHz
Maximum operating frequency (40 mTorr)	4 KHz	27 KHz

	1-H actuator	2-H actuator
Cold arm length	162 μm	162 μm
Cold arm width	14 μm	14 μm
Flexure length	38 μm	38 μm
Flexure width	2.5 μm	2.0 μm
Inner hot arm length	200 μm	221 μm
Outer hot arm length	not applicable	252 μm
Hot arm width	2.5 μm	2.5 μm
Separation between inner hot arm and cold arm	3 μm	3 μm
Separation between hot arms	not applicable	3 μm

Comparison of single hot-arm (1-H) and double hot-arm (2-H) actuator operating properties

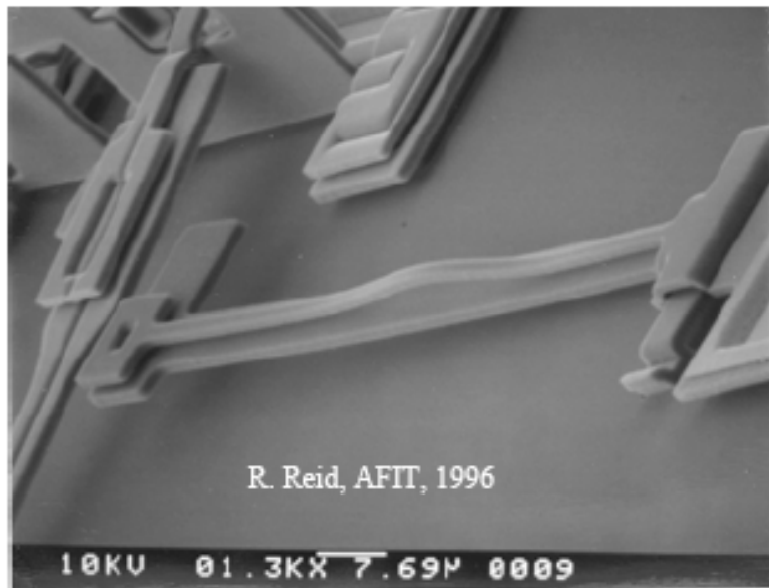
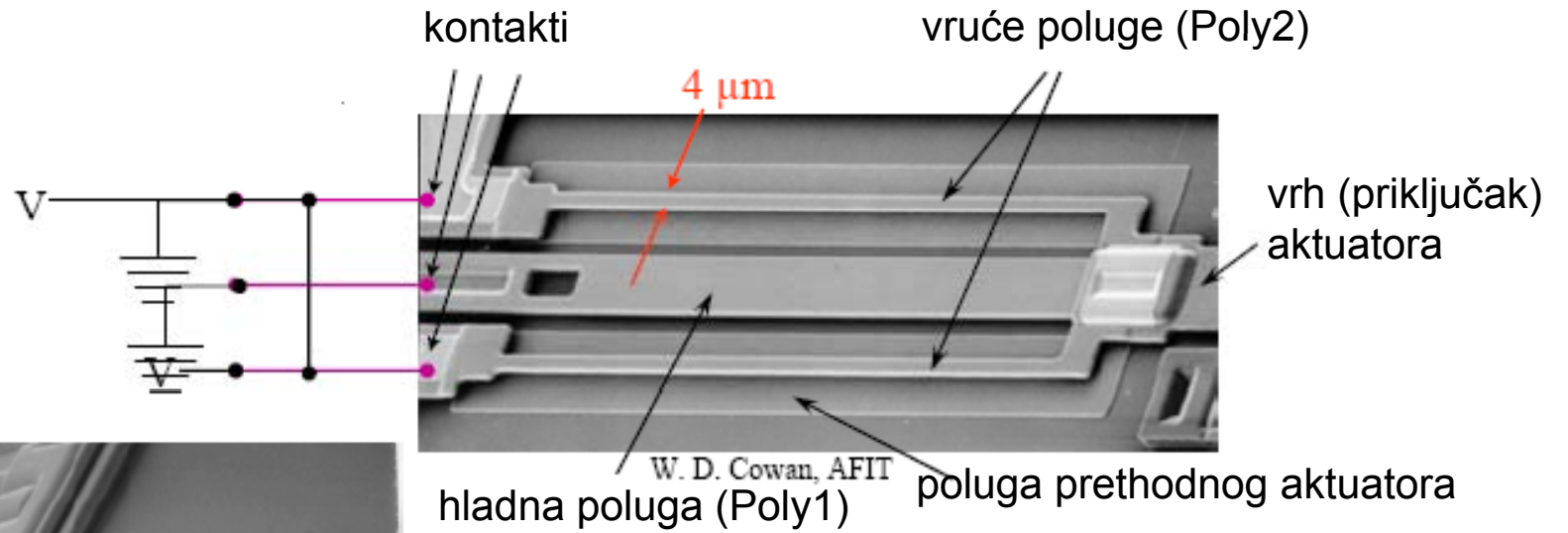
Termalno bimorfni aktuatori

Odzivi deflekcije i sile usljed prolaska el. struje za aktuator s jednom i s dvije vruće poluge



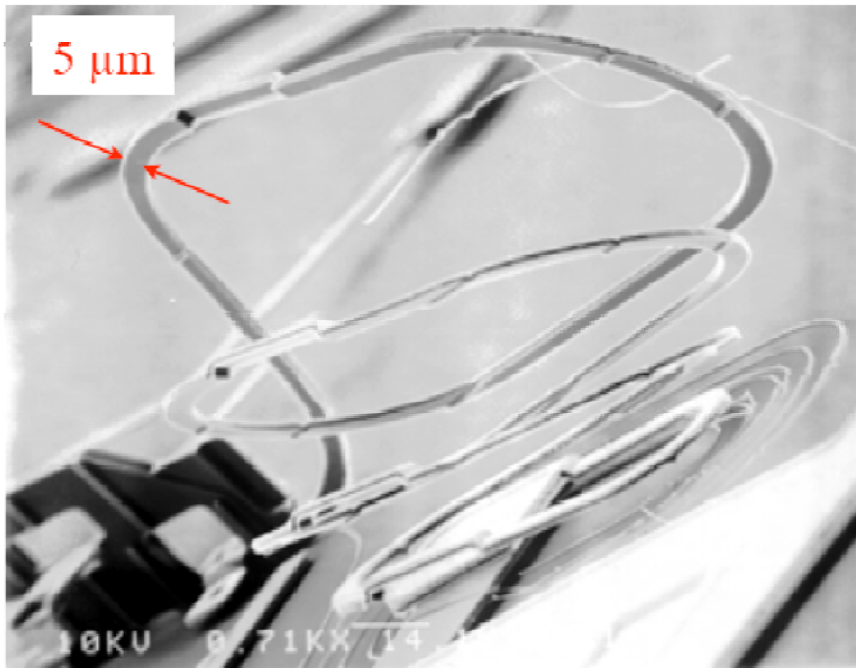
Termalno bimorfni aktuatori

Vertikalna defleksija

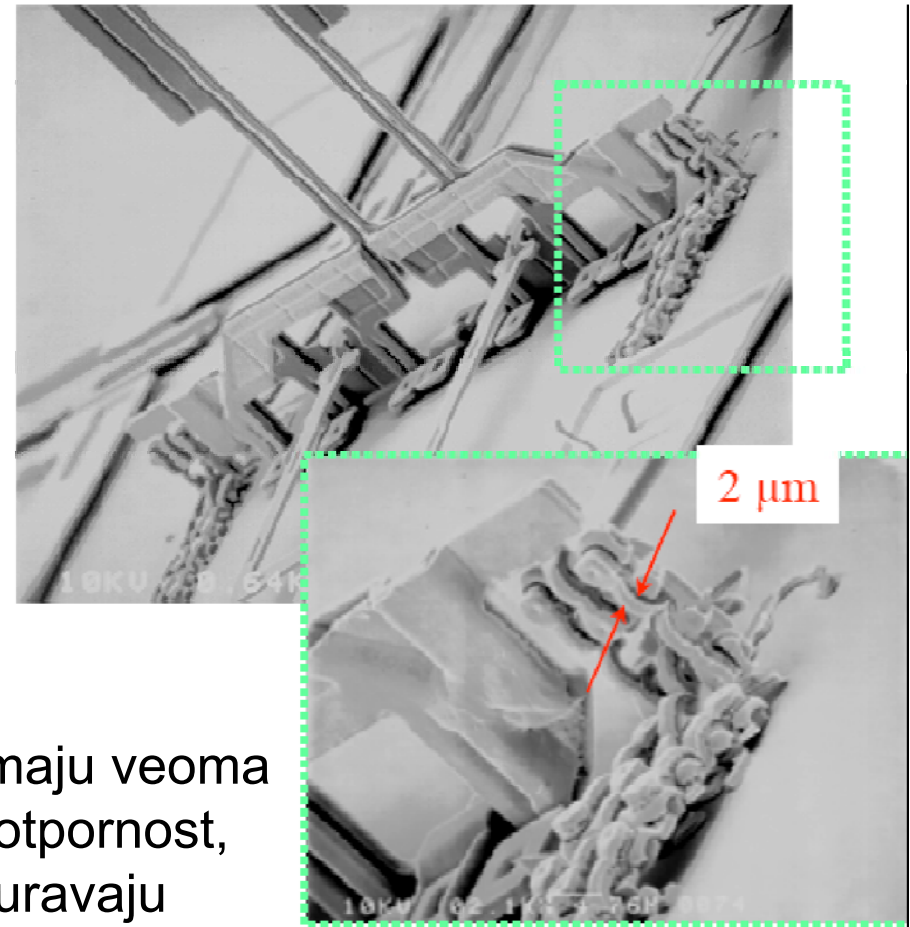


Termalno bimorfni aktuatori

Niska otpornost žica neophodna za elektro-termalnu akciju.



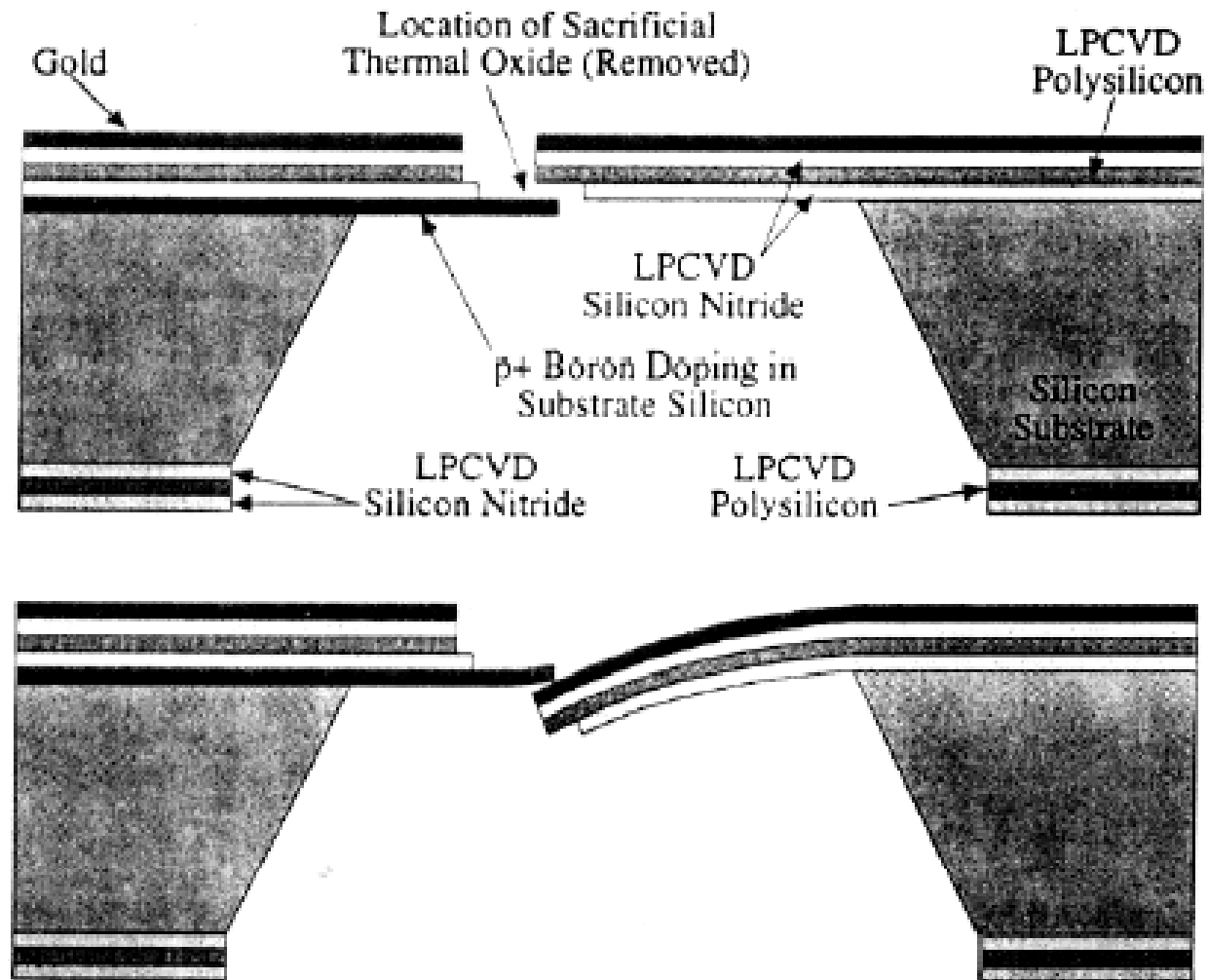
Žičana opruga je dobar primjer niskootporne realizacije.



Lanci imaju veoma visoku otpornost, ali osiguravaju dovoljno visok potencijal za elektrostatičke aktuatore.

Termalno bimorfni aktuatori

Termalni bimorfni prekidač - fabrikacija



Termalno bimorfni aktuatori

Toplinski pogonjeni električni prekidači

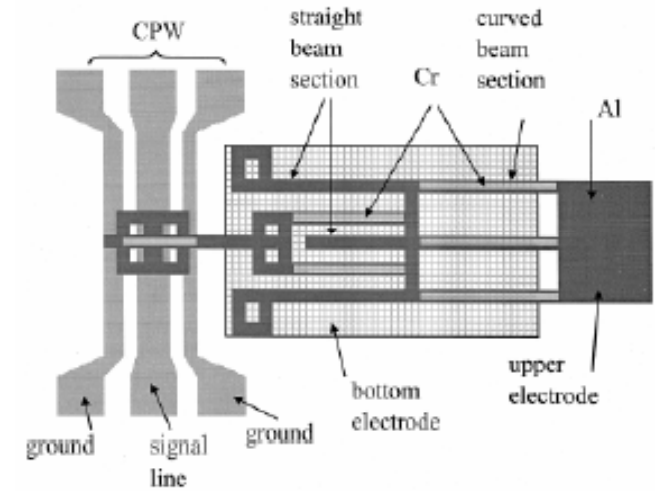
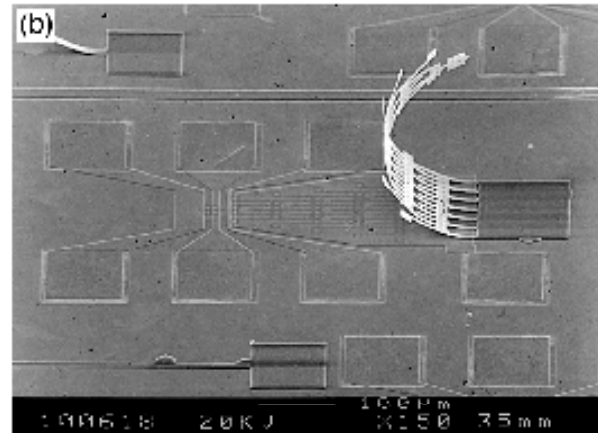
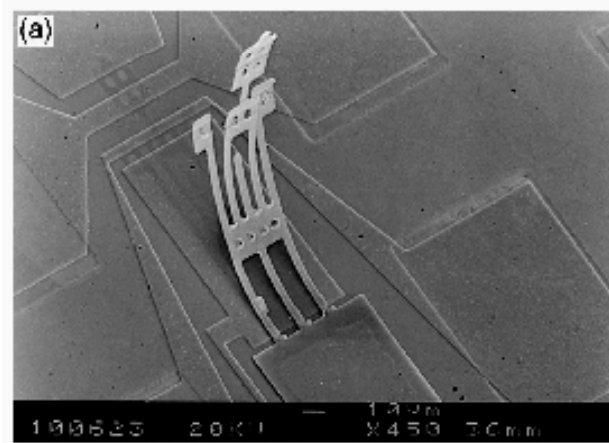
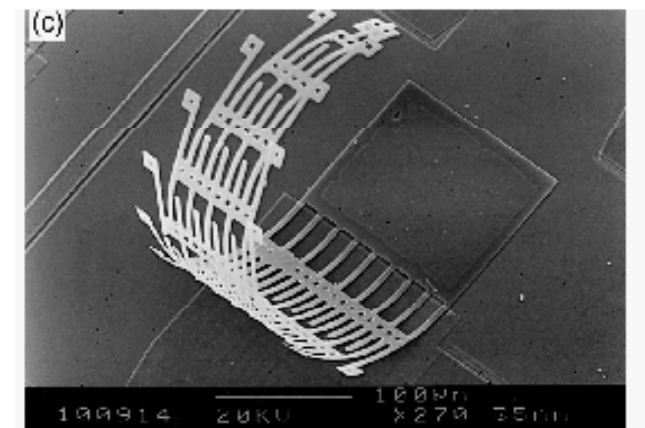


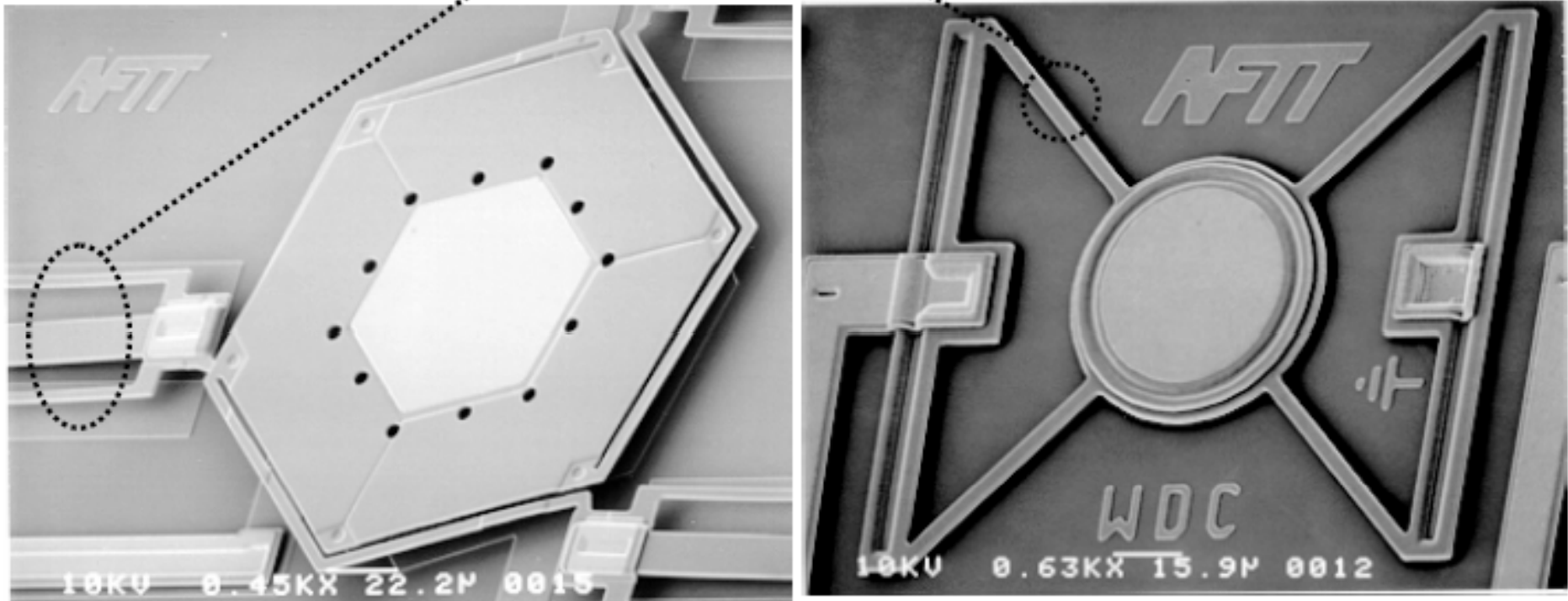
Fig. 2. The top-view of the microwave switch at the 'down' state.



Termalno bimorfni aktuatori

Zrcala klipa

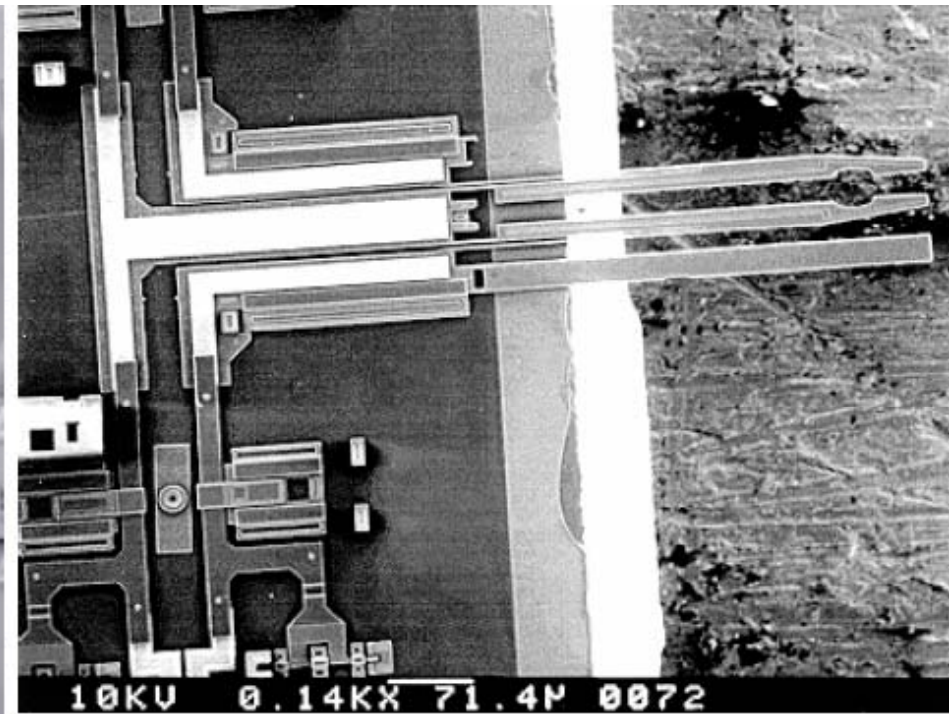
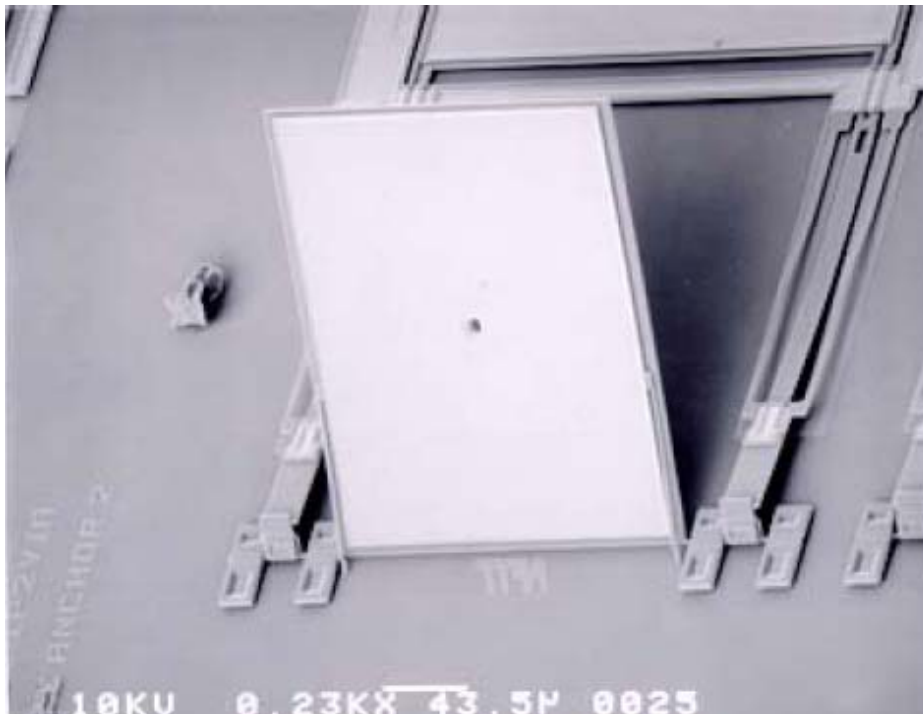
Aktuator



W. D. Cowan, AFIT

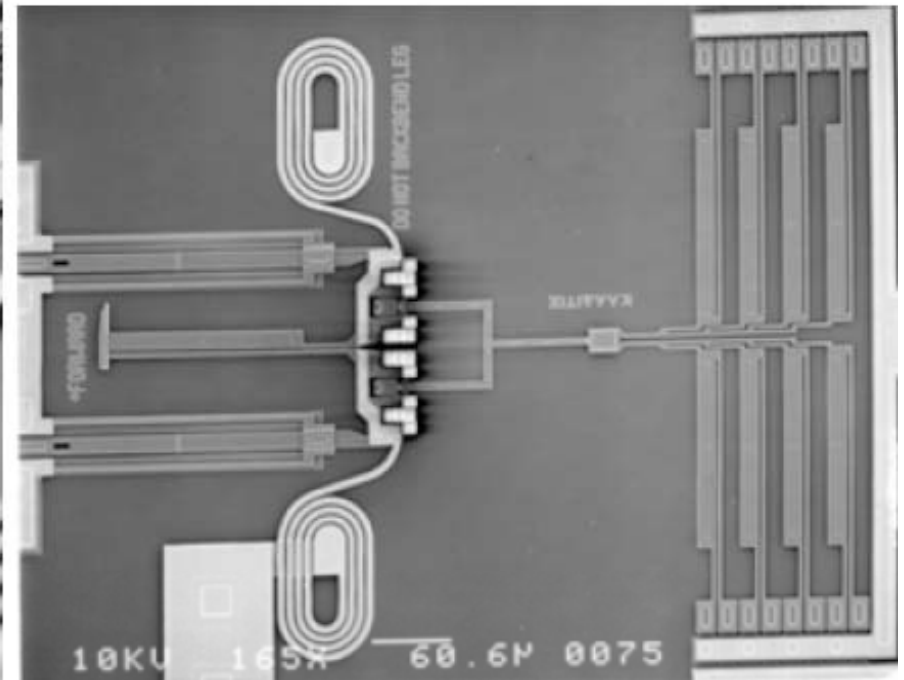
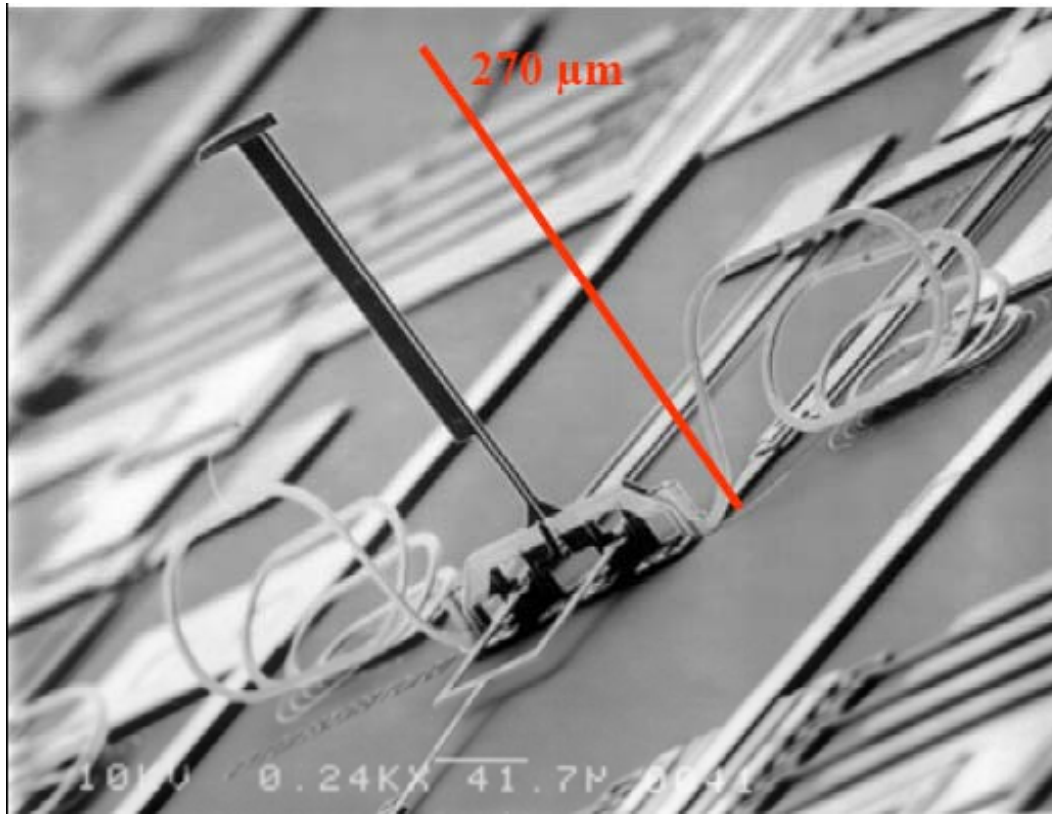
Termalno bimorfni aktuatori

Primjeri: Zrcalo i mikro hvataljka



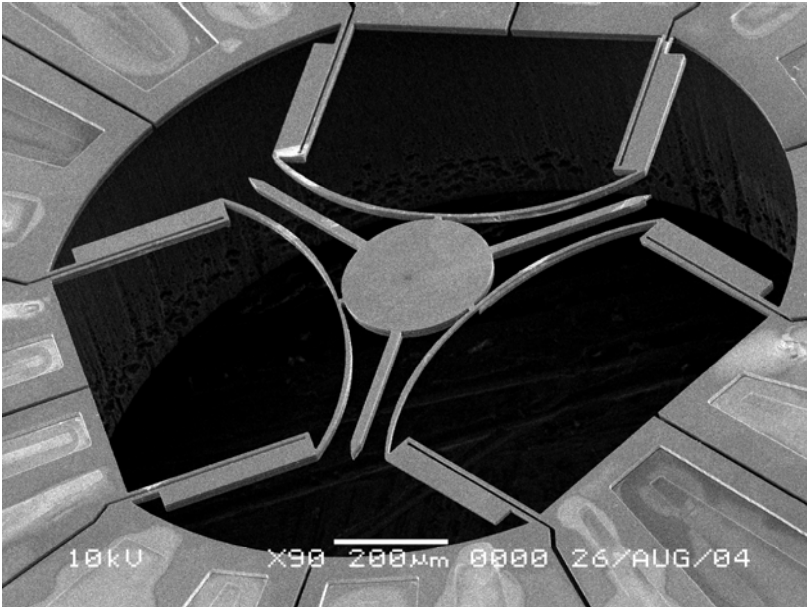
Termalno bimorfni aktuatori

Primjer: Pogon noge mikrorobota

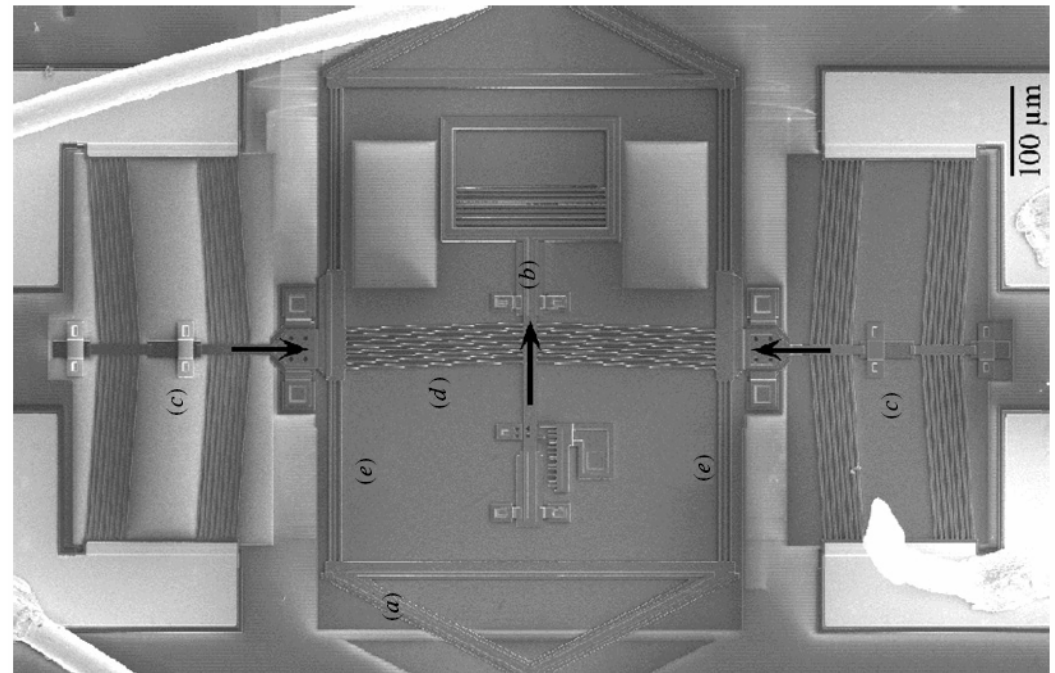


Termalno bimorfni aktuatori

Chen & Culpepper, 2006: Micro-HexFlex

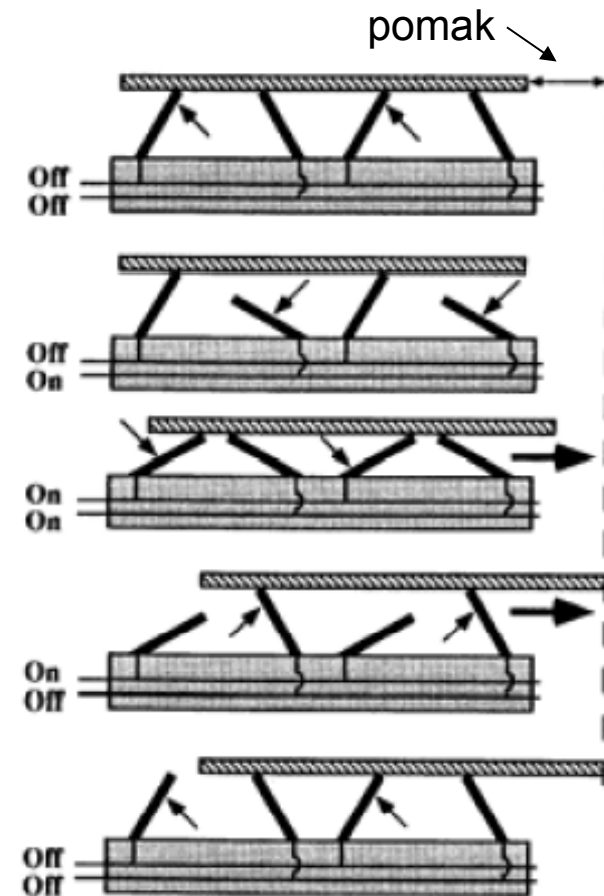
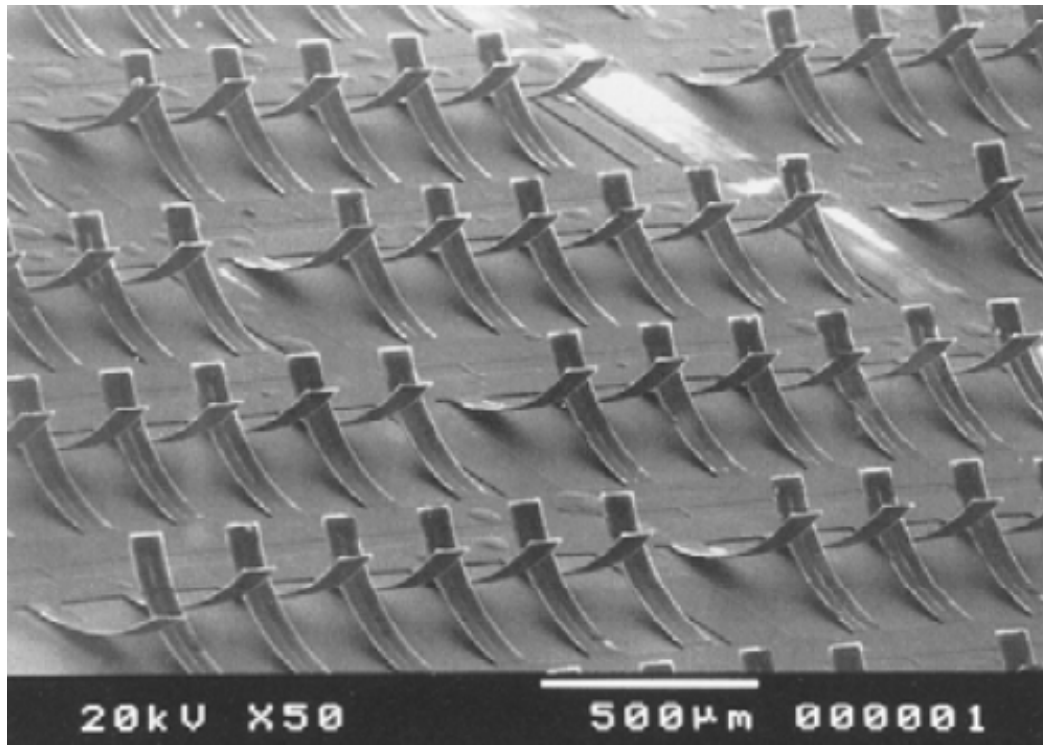


Howell, 2005: Nanopozicioner



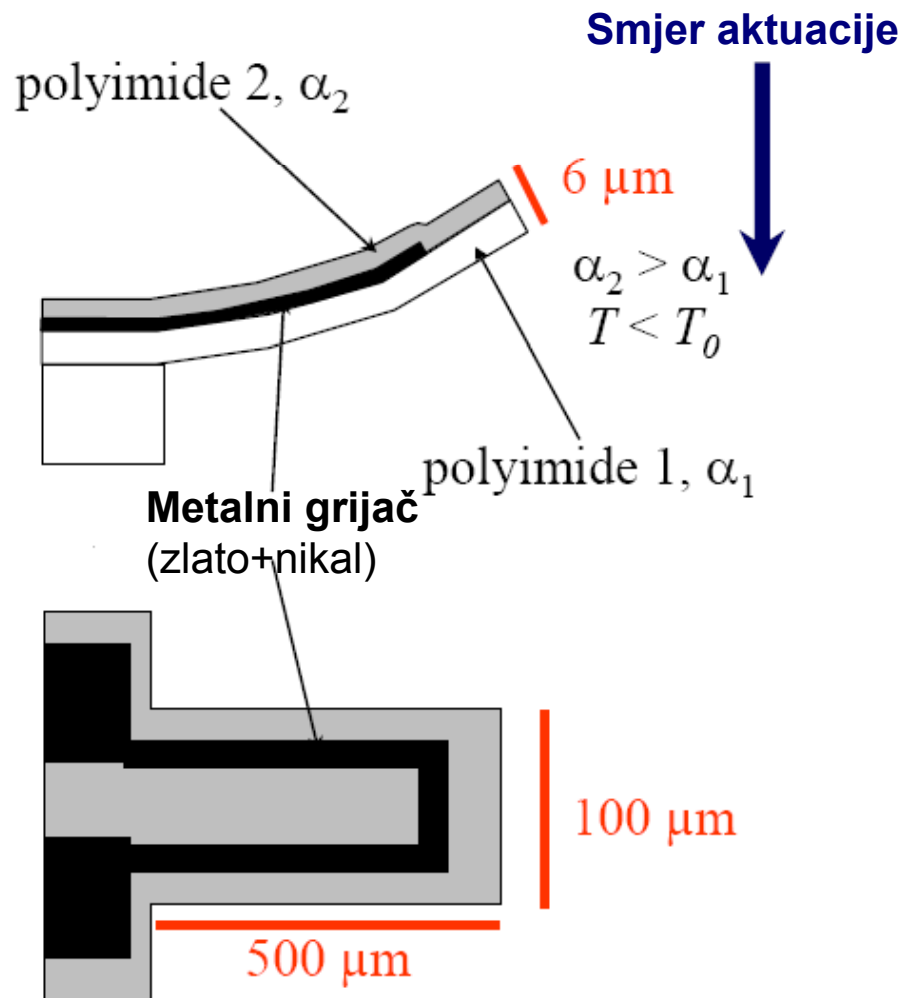
13.2.3. Bimorfni elektrotermalni aktuatori

Aktuator u obliku sendviča dva ili više sloja (materijala) s različitim koeficijentima toplinskog širenja i unutarnjeg električnog zagrijavanja.



Bimorfni elektrotermalni aktuatori

Aktivno kretanje kada se zagrijavaju sa unutarnjim električkim grijačem.

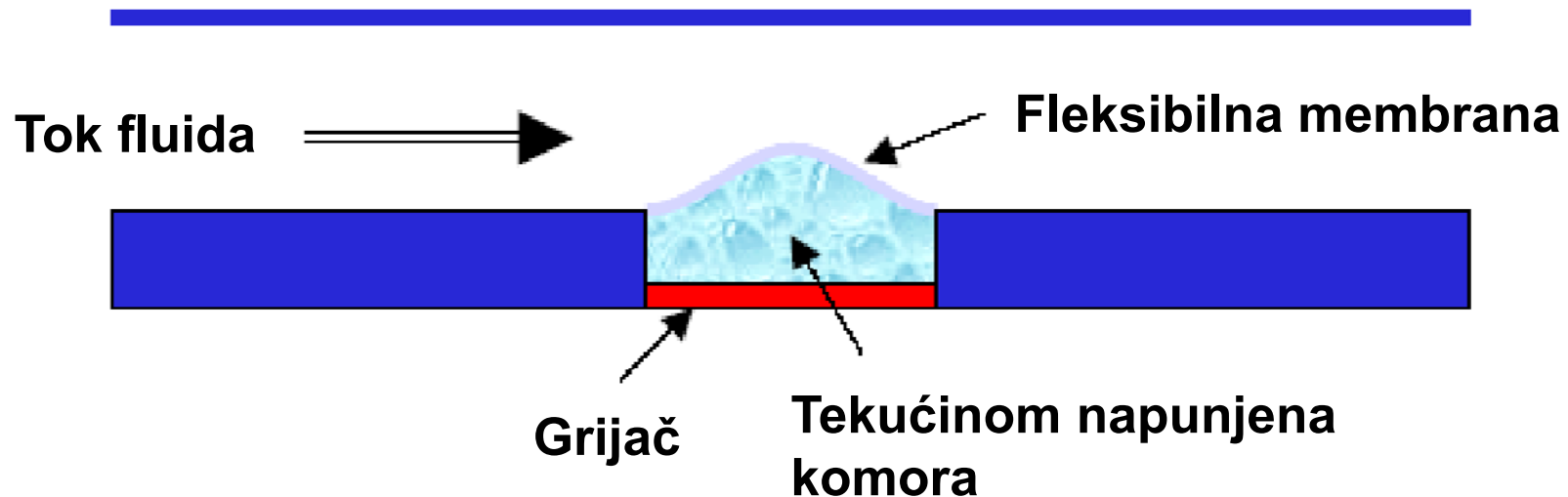


~~$$R = \frac{(l_1 + l_2)^2}{6(\alpha_1 - \alpha_2)(T_1 - T_0)l_1l_2},$$~~

Ovdje ne vrijedi

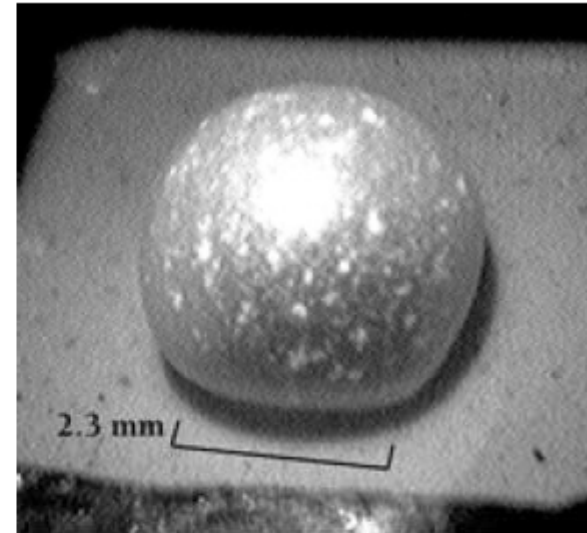
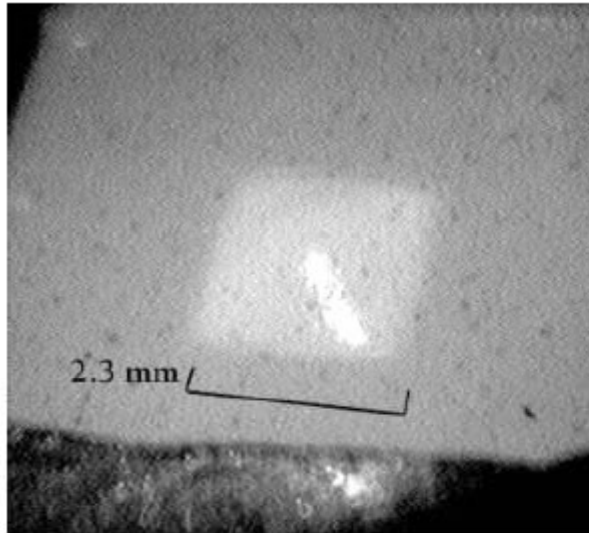
13.2.4. Termalni pneumatski ventili

- Njihov rad se temelji na promjeni volumena tekućine usljed zagrijavanja ($\alpha_{tekućine} \gg \alpha_{krutog\ tijela}$).
- Zahtijeva da grijač (toplinski (termo) otpornik) bude ugrađen u supstrat.
- Električka struja zagrijava element \rightarrow temperatura fluida raste \rightarrow povećava se pritisak fluida \rightarrow elastična membrana se gura prema gore.



Termalni pneumatski ventili

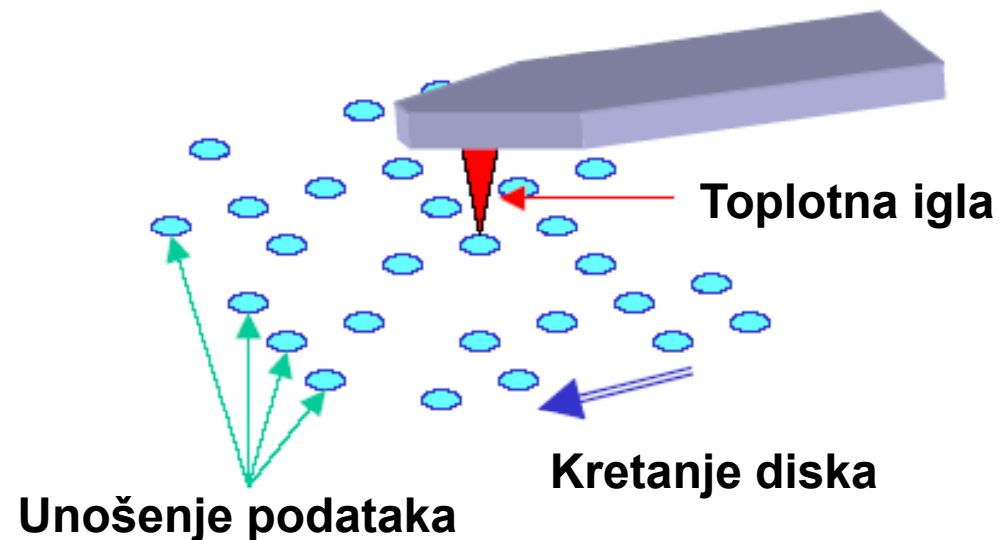
- Fleksibilne membrane djeluju kao ventili koji reguliraju protok fluida.



Silicijska membrana prije i nakon toplinske defleksije

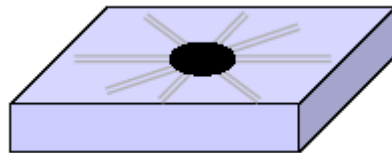
13.2.5. Termalni aktuatori za pohranu podataka

- Piezoelektričko/elektrostatičko aktiviranje konzole sa toplinski otpornom iglom.
- Termalna AFM (atomic force microscope) glava za pisanje/čitanje
 - Formira udubljenja na polikarbonatskom disku (upisivanje).
 - Udubljenje u disku mijenja njegovu temperaturu T (čitanje).

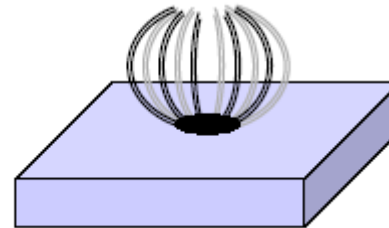


13.2.6. Memorijski oblikovani aktuatori

- Neki materijali (npr. NiTi) mogu se povratiti u početno stanje nakon velikih deformacija sa toplinski induciranom faznom transformacijom.
- Nizak T : deformacija
- Zagrijavanje iznad kritične T : povratak u originalno stanje.
- Velika gustoća energije (ali sporo promjenjiva).



Zagrijavanje (električka struja)



Sobna temperatura T

13.3. Prednosti i nedostaci elektrotermalnih aktuatora

- **Prednosti:**

- potreban malen napon za aktuciju,
- generiraju velike sile i male pomake,
- jednostavna fabrikacija,
- omogućuje višeosnu aktuciju (više stupnjeva slobode).

- **Nedostaci:**

- jako ovisni o temperaturi,
- imaju veliku vremensku konstantu (~ 1 ms),
- potrošnja energije,
- ograničen propusni opseg,
- upravljanje ovim aktuatorima je komplicirano (složeno).