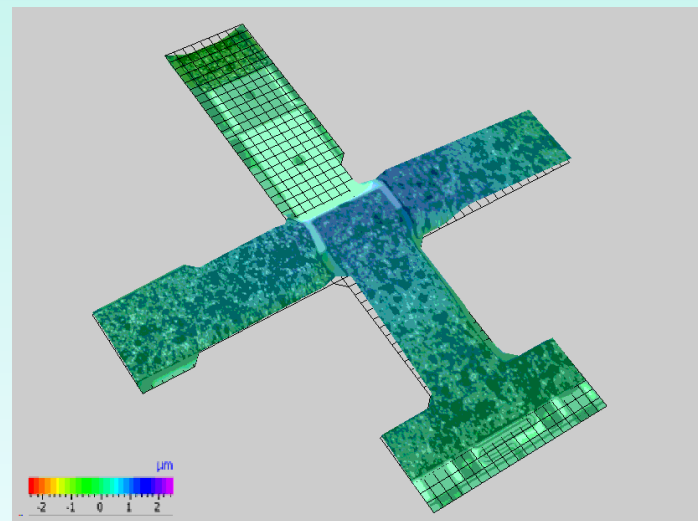
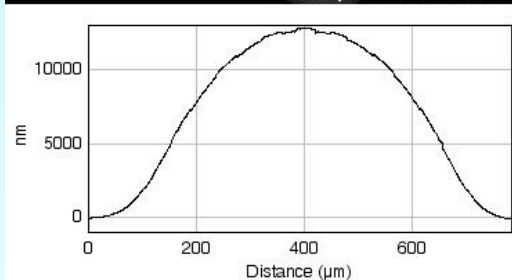
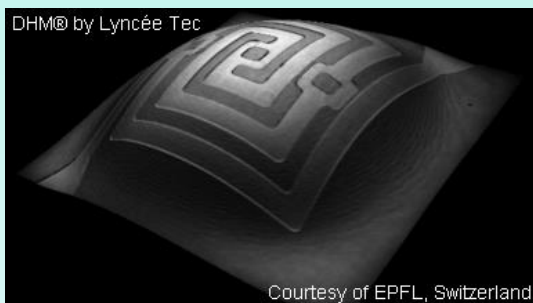




# 3.0. ТОПЛИННИ МИКРОЗАДВИЖВАНИЯ

Проф. д-р Тодор Тодоров

[tst@tu-sofia.bg](mailto:tst@tu-sofia.bg)



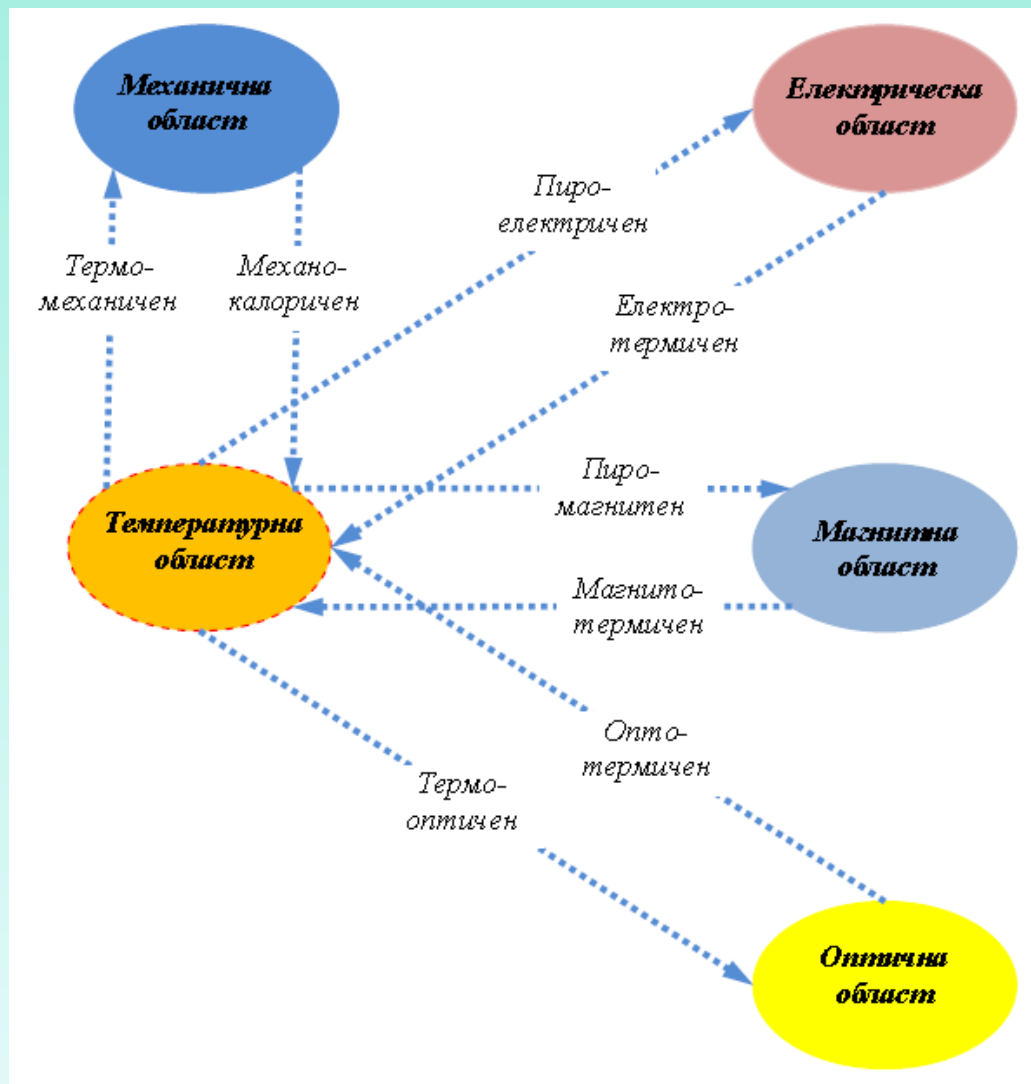


# Съдържание

- **Топлинно удължение**
- **U и V -образно термозадвижване,**
- **Термо биморфи и мултиморфи,**
- **Микропневматични и хидравлични термоактуатори,**
- **Микроклапани и микропомпи**
- **Разпредели на течности (микродиспенсери)**
- **Мастилено струйни термоглави**



## Мултифизични връзки и термоелефети





## Топлинно удължение

**Топлинното удължение** на материалите се характеризира с коефициента на линейно удължение  $\alpha_T$ . Относителното линейно удължение  $\varepsilon$ , на даден материал е пропорционално на температурната промяна  $\Delta T$ ,

$$\varepsilon = \alpha_T \Delta T.$$

$\alpha_T$  има размерност  $[1/^\circ\text{C}]$  или  $[1/^\circ\text{K}]$ . Най-често  $\alpha_T$  е функция на температурата и обикновено нараства с повишаване на температурата.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\text{абсолютното удължение}}{\text{първоначалната дължина}}$$



## Топлинно удължение

Ако един прът, подложен на нагряване е ограничен надлъжно,



нормалното напрежение е:

$$\sigma = E\varepsilon = E\alpha_T\Delta T$$

а силата

$$F = \sigma A = E\alpha_T\Delta T A$$



## Топлинно удължение

за най-често употребяваните в MEMS материали

Материал	$\alpha_T$ ( $\times 10^{-6}$ ) [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	$E$ [GPa]	$T_M$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\rho$ ( $\times 10^{-3}$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]
<i>Si</i>	3.0 – 4.2	130	1412	2.33
Полисилиций	NA	165	NA	2.32
<i>SiO<sub>2</sub></i>	0.50	57 – 92	1713	2.19
<i>Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub></i>	4.0	150	1900	~ 3.0
<i>Al</i>	25	70	660	2.7
<i>Ni</i>	13	206	1453	8.91
<i>Au</i>	14.2	80	1064	19.3
<i>Cu</i>	16.6	128	1083	8.96
<i>GaAs</i>	6.86	85.5	1238	5.32
<i>SUS</i>	52	4 – 5	NA	NA

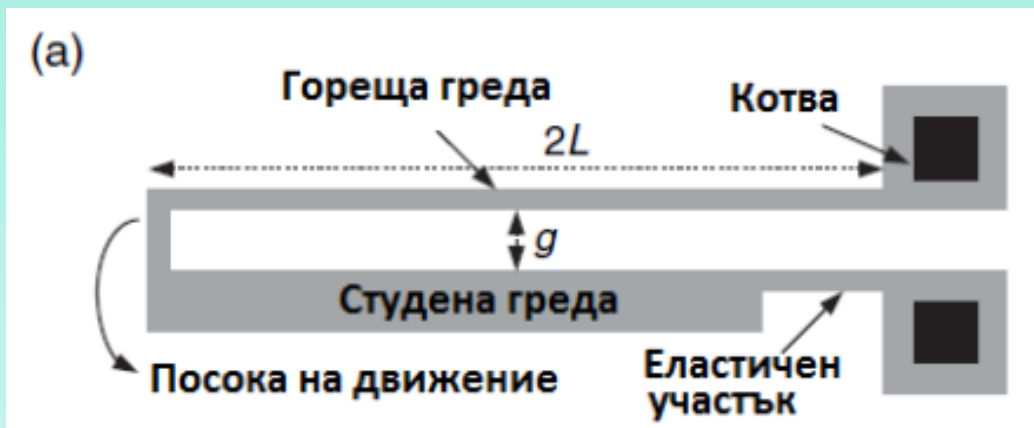


## **Свойства на топлинните микроактуатори**

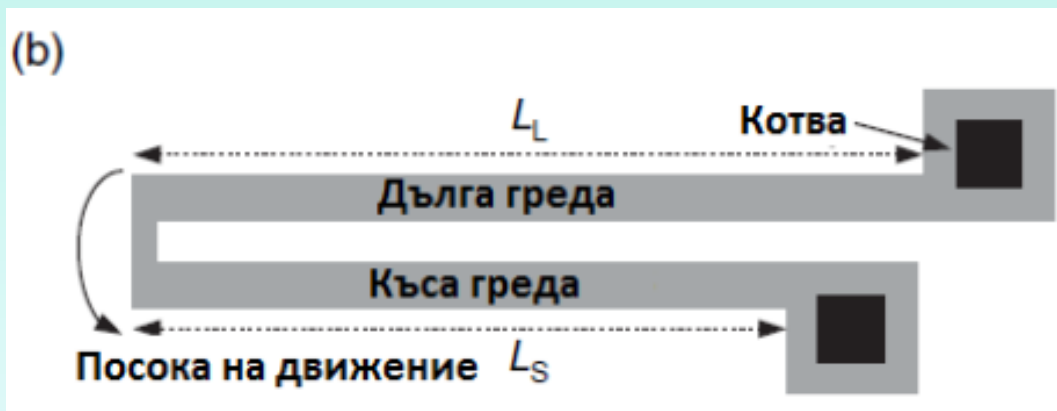
- голяма **сила** ( от няколко стотин  $\mu\text{N}$  до няколко  $\text{mN}$ );
- голямо **преместване** (5 до 50  $\mu\text{m}$ );
- работят при **ниски напрежения** (1V до 15V)
- разнообразно приложения** в електро-оптичните комуникации, микро-монтажите и микро инструментите;
- Si- базирани материали предимно се използват поради добре разработени технологии и липсата на вътрешни напрежения;
- базираните на цветни метали термоактуатори са по-ефективни от силициевите. Те постигат по-големи премествания и сили, поради по-високите коефициенти на удължение и консумират по-малка мощност, но ако се налага да задържат изпълнителното звено в активна позиция, те консумират по-висока енергия и температура.



## U – образни термоактуатори



различни ширини на термоучастъците



различни дължини на термоучастъците



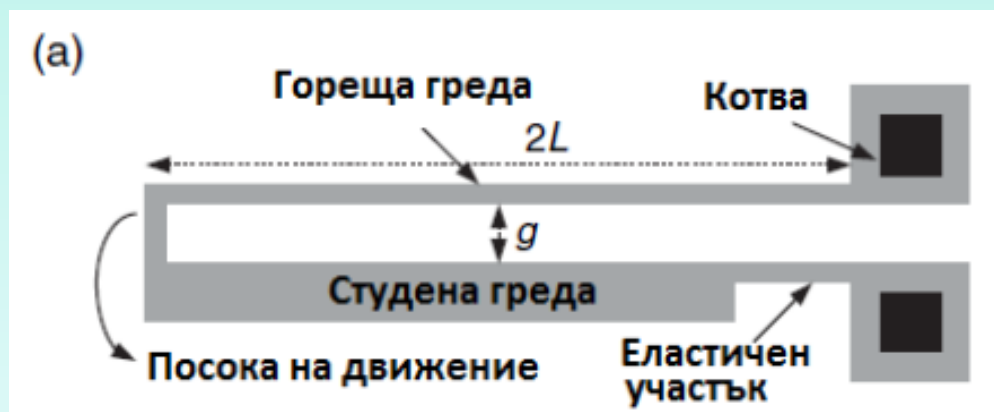


## U – образни термоактуатори

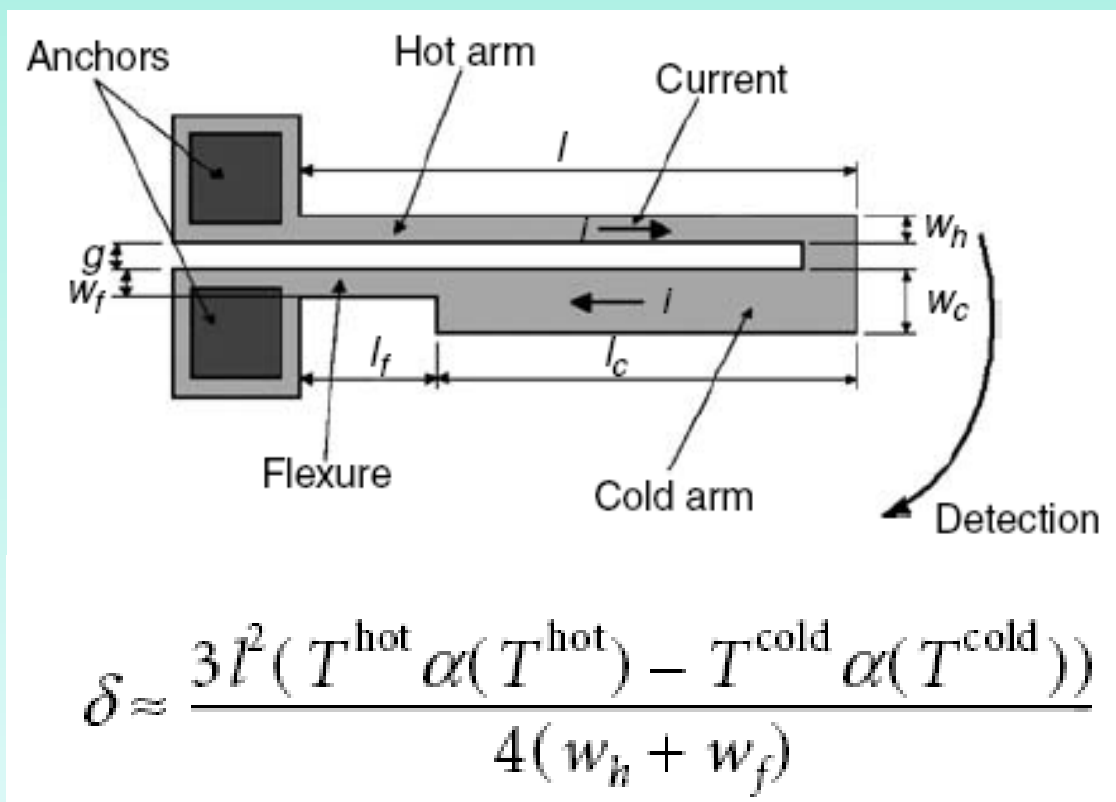
Преместване на свободния край

$$\delta = \frac{\alpha \Delta T_{НС} L^2}{g \left( 0,7707 + 0,3812 \frac{t^2}{g^2} \right)},$$

$\Delta T_{НС}$  е разликата между  
температурите на горещата и  
студената греда  
 $t$  е дебелината на гредата



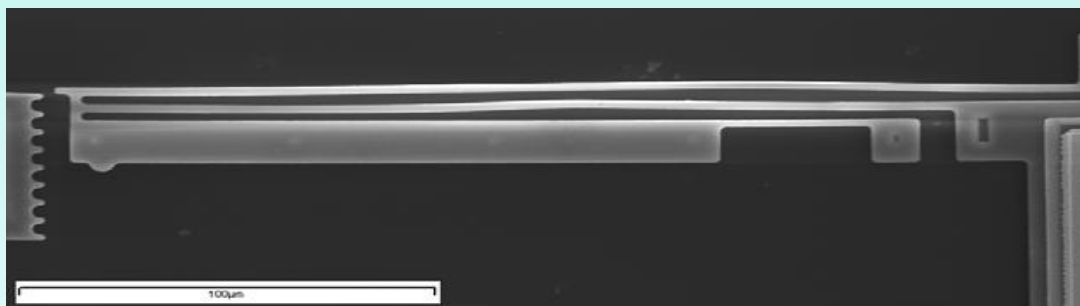
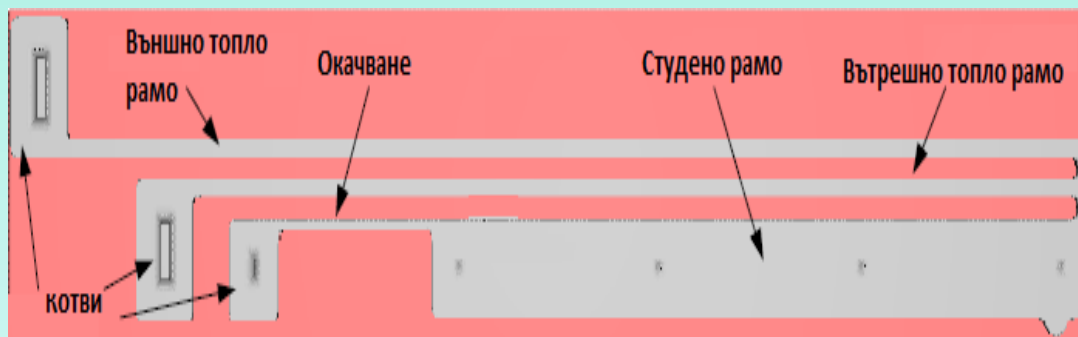
## *U – образни термоактуатори*





## *U – образни термоактуатори*

U – образен термомикрoактуатор с две загряващи се рамена

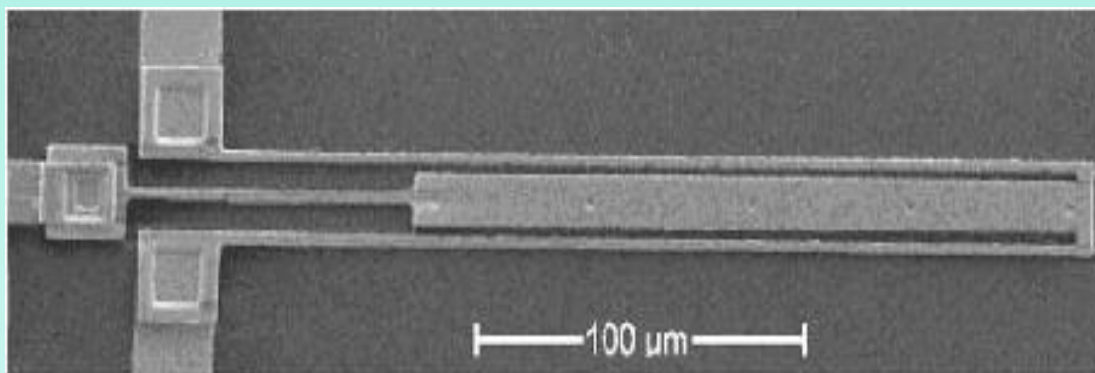


Дължината на U - актуатора е около 200µm

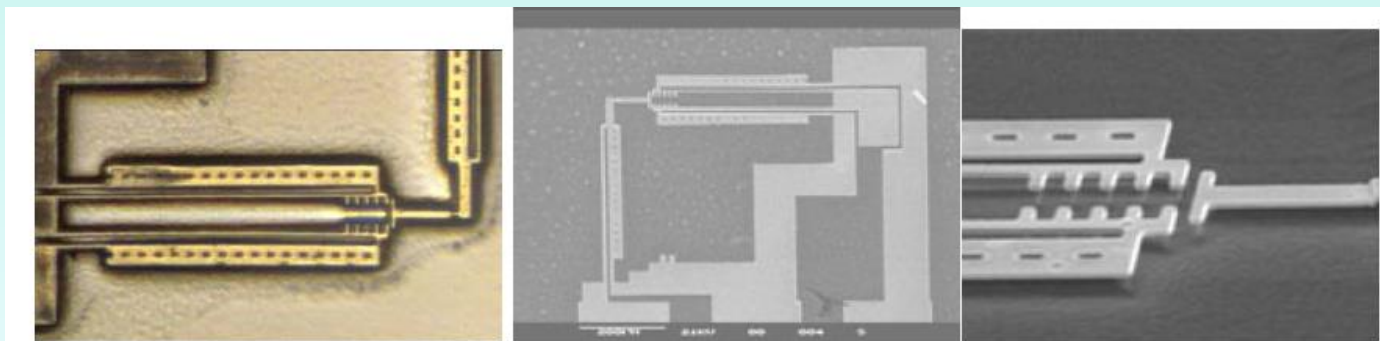


## *U – образни термоактуатори*

Двупосочен U – образен микротермоактуатор



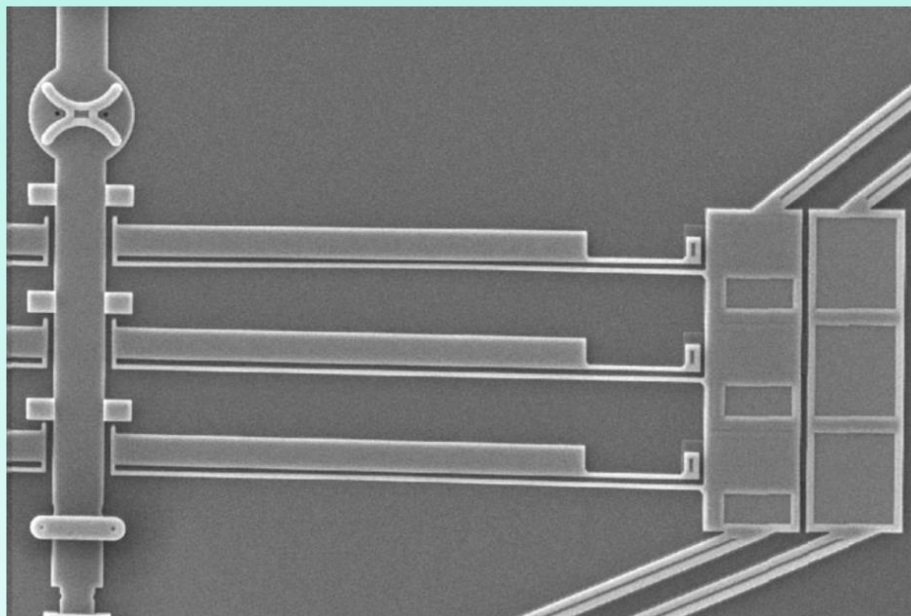
Заклучващи се U – образни микротермоактуатори





## *U – образни термоактуатори*

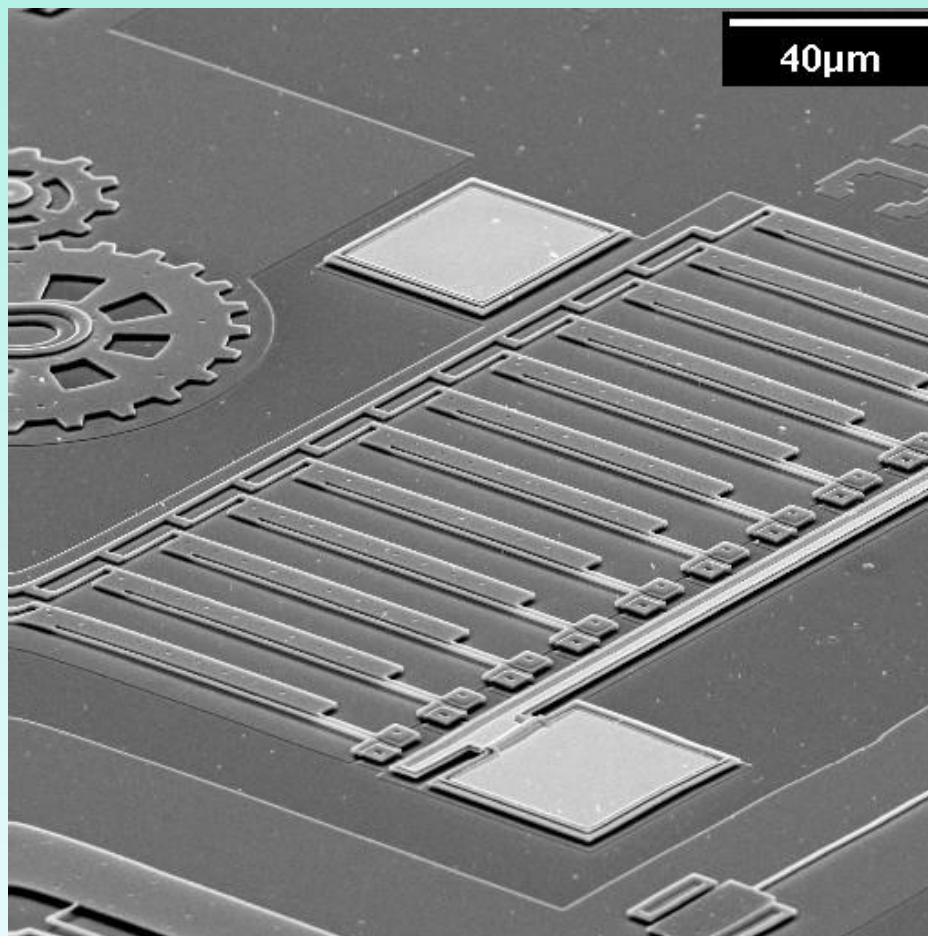
Паралелно свързани U – образни микро термоактуатори за увеличаване на силата





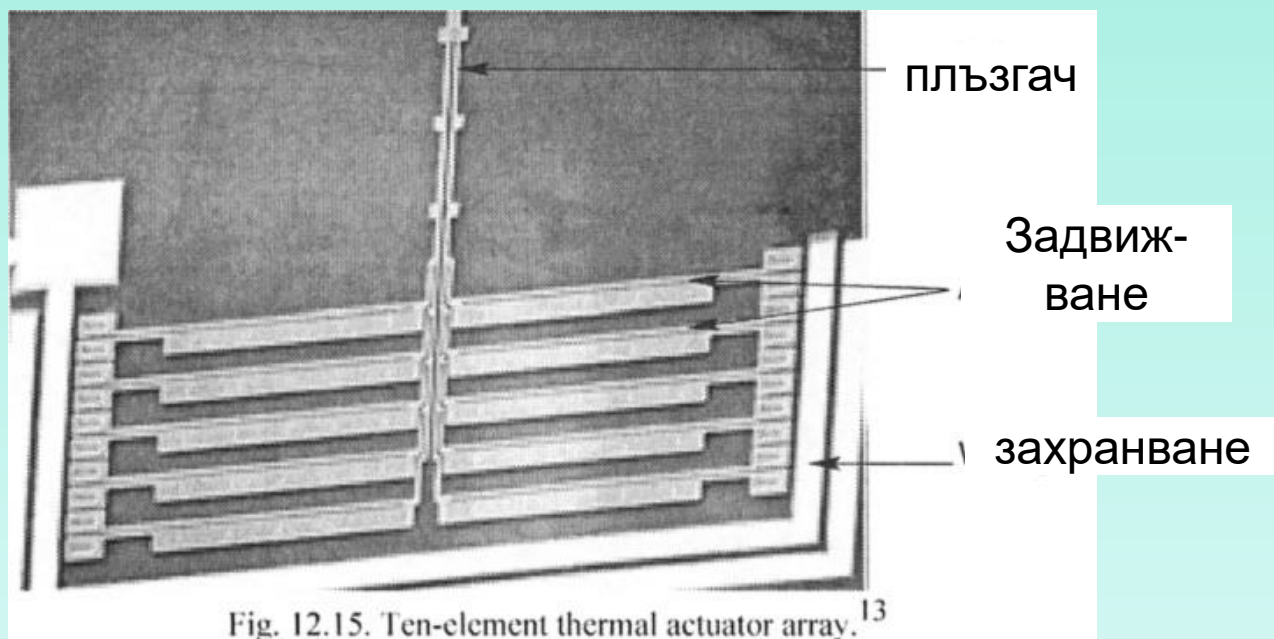
## ***U – образни термоактуатори***

SEM изображение на група от термозадвижвания.





## U – образни термоактуатори

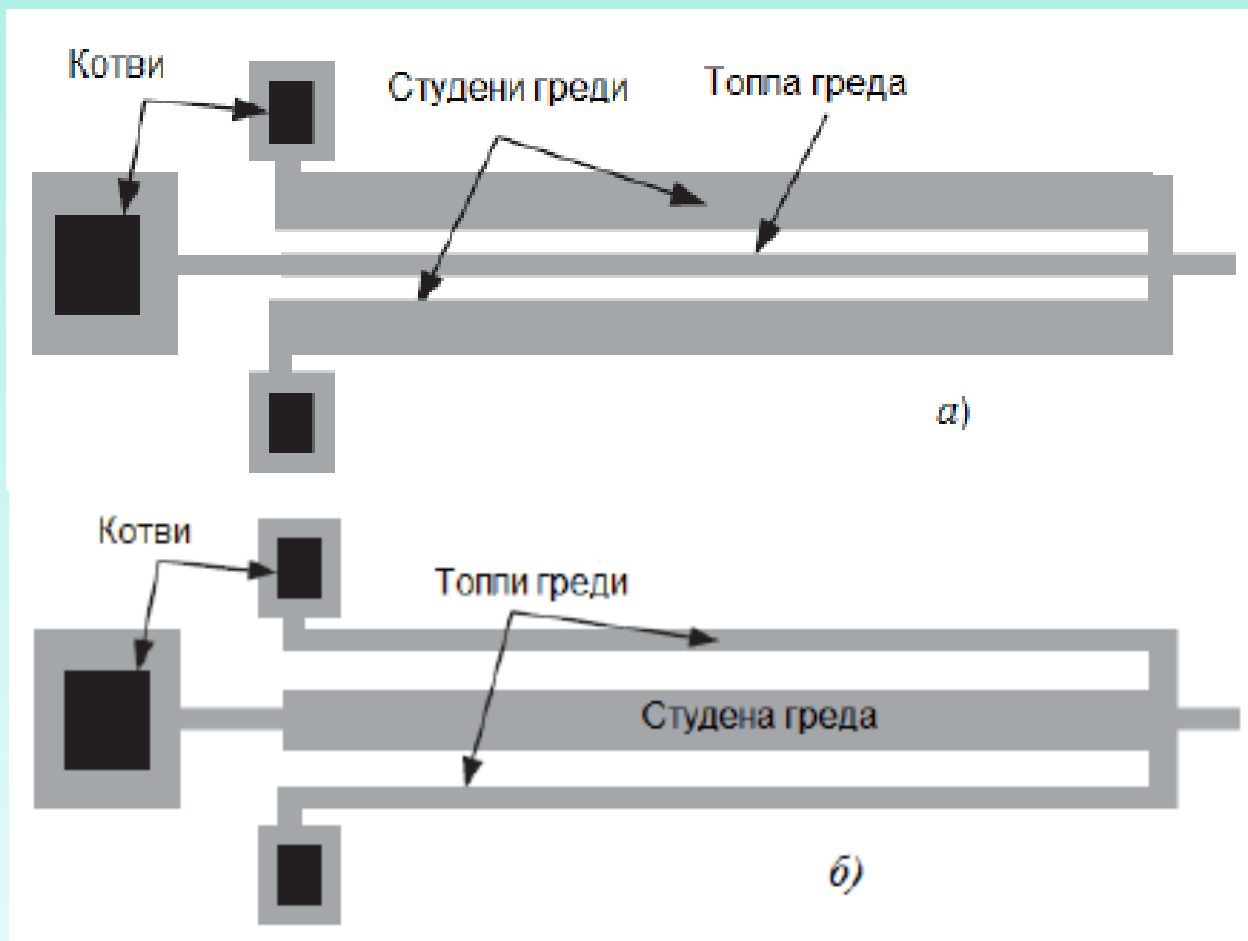


4,8  $\mu\text{N}$  е ходът на всяко задвижване. До 60 задвижвания в група при тази схема могат работят съвместно.



## U – образни термоактуатори

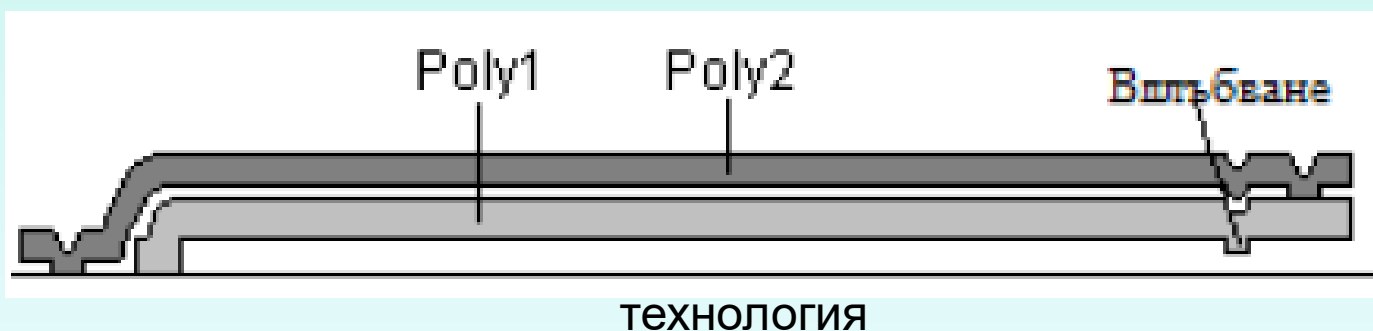
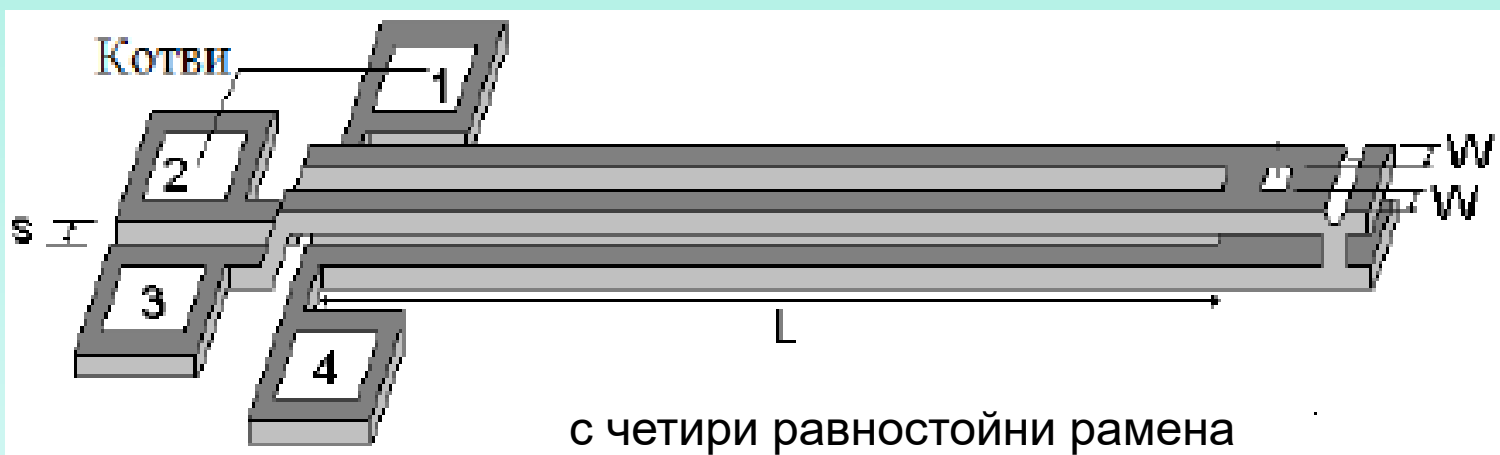
Вертикални U-образни микро термоактуатори равнинни структури





## U – образни термоактуатори

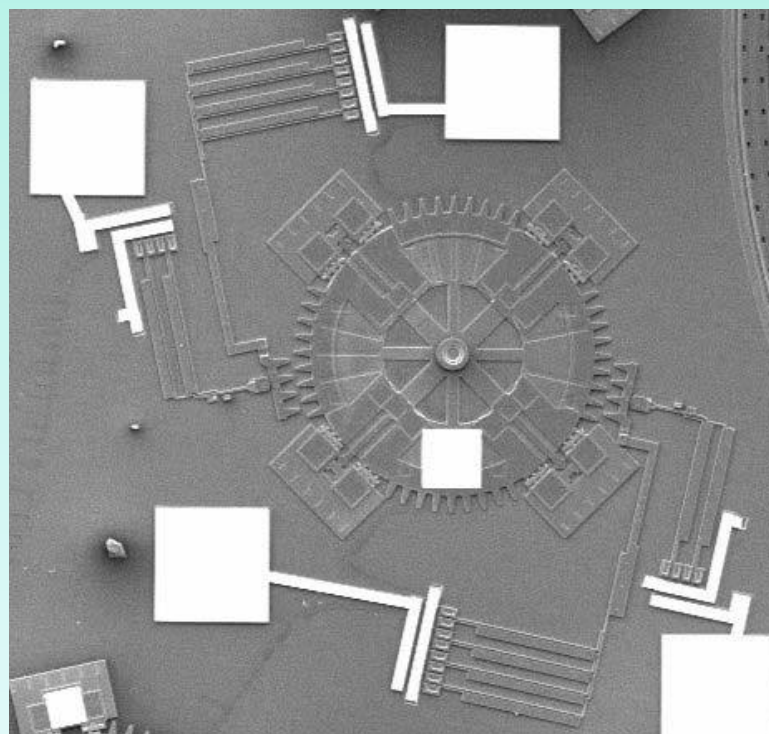
Вертикални U-образни микро термоактуатори пространствени структури





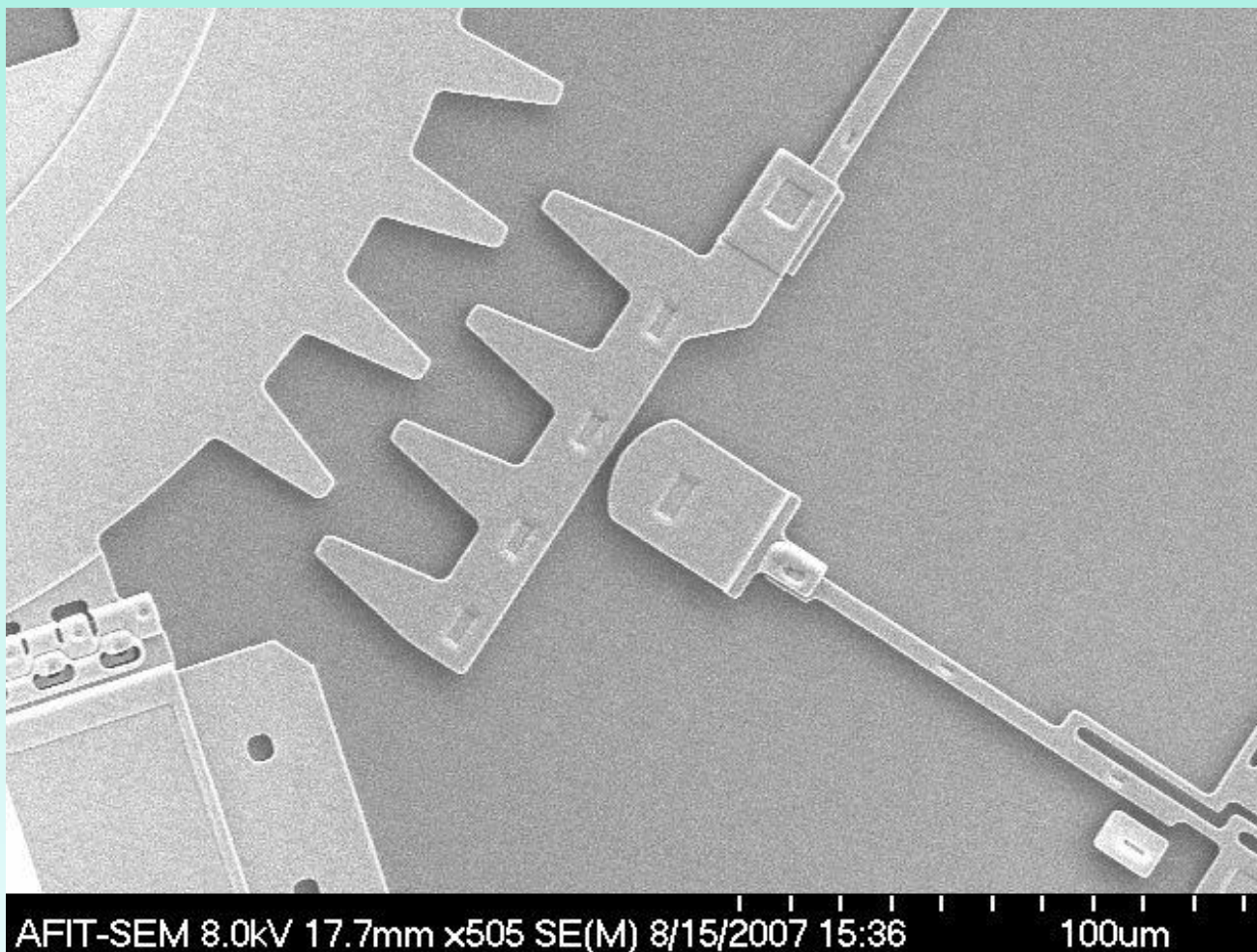
## *U – образни термоактуатори*

Ротационен микро термодвигател  
за позициониране на антена





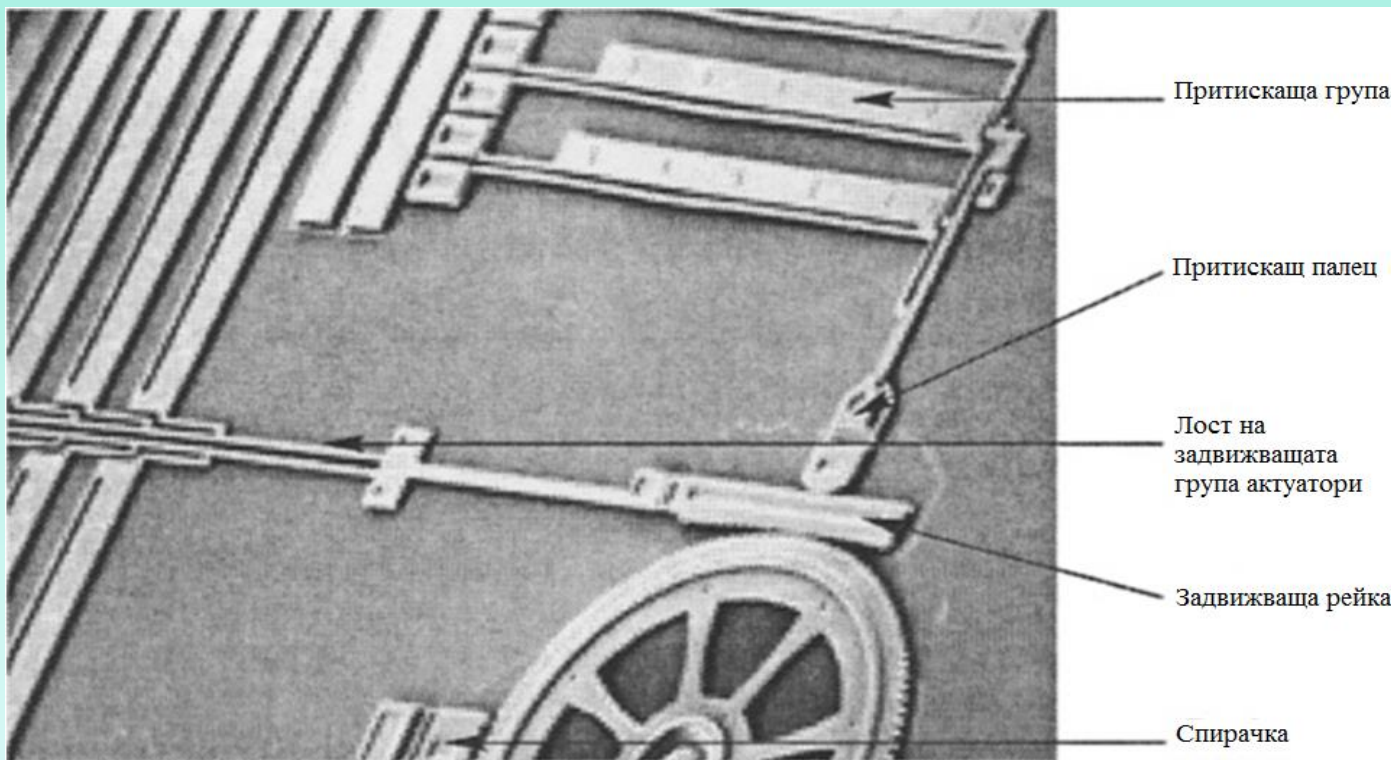
## *U – образни термоактуатори*





## **U – образни термоактуатори**

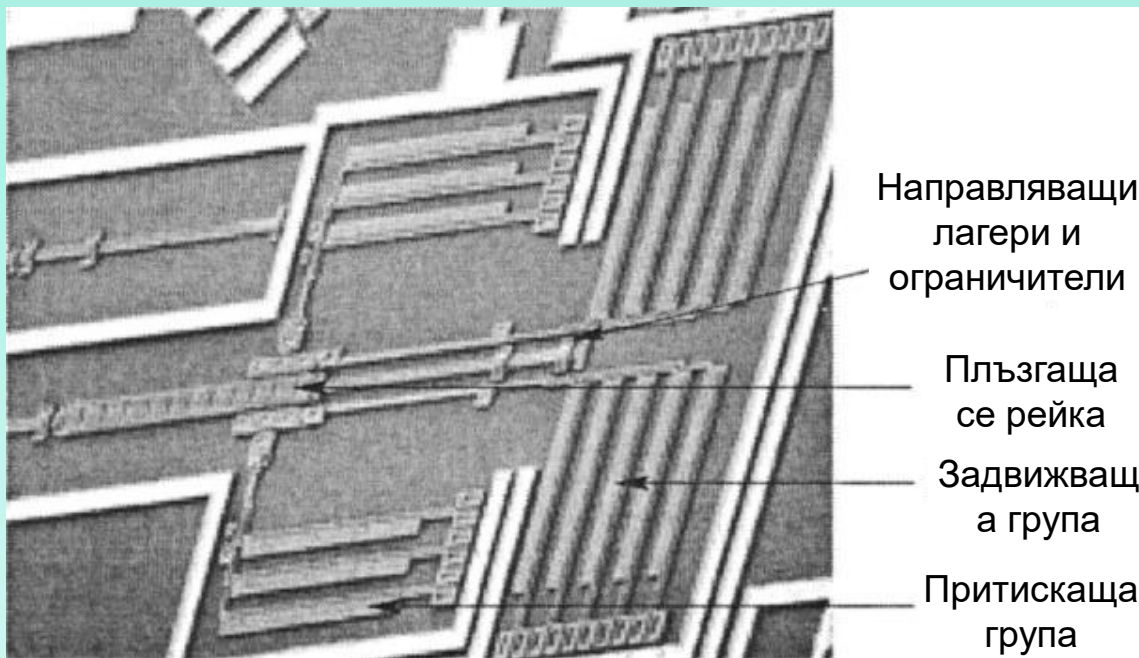
SEM на храпов микро термодвигател



Ротационен стъпков двигател: 3 спомагателни задвижвания за притискащия палец и 10 задвижвания, които завъртат ротора. Те са 240  $\mu\text{m}$  дълги, 21.5  $\mu\text{m}$  широки и 2  $\mu\text{m}$  дебели. Диаметърът на ротора е 200  $\mu\text{m}$ . Зъбите на палеца и роторът са 3.5  $\mu\text{m}$  дебели. Номиналните обороти на мотора са 375 rpm.



## *U – образни термоактуатори*



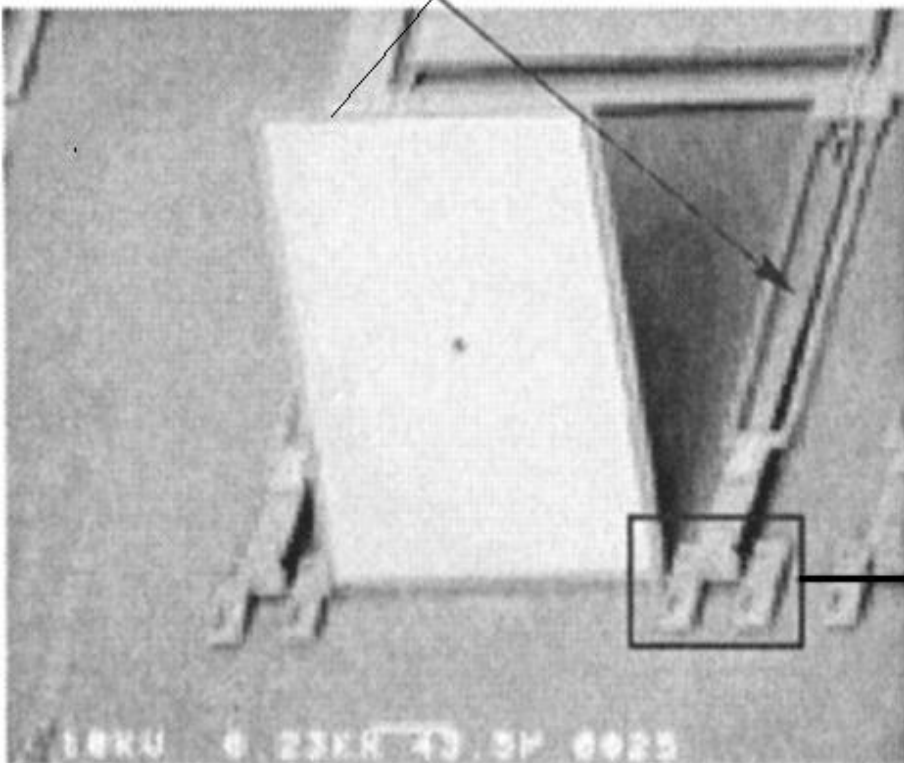
Линеен стъпков мотор със зъбна рейка задвижвана от двете страни от група задвижвания с параметри: 240  $\mu\text{m}$  дължина, 2  $\mu\text{m}$  дебелина. Рейката има ход 200  $\mu\text{m}$  между ограничителите. Палците са 3.5  $\mu\text{m}$  дебели



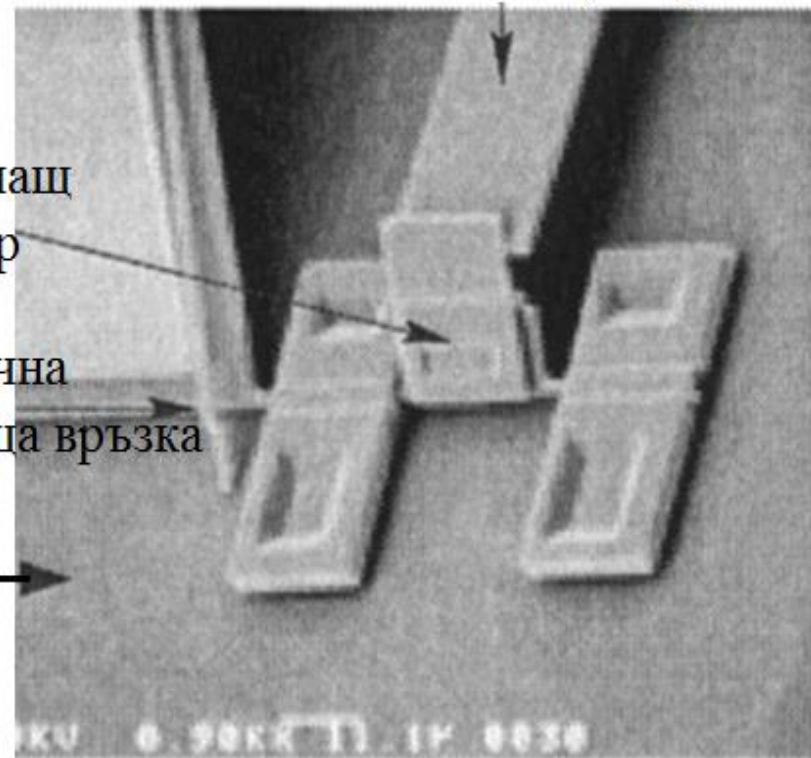
## U – образни термоактуатори

Изскачащо огледало

Два вертикални термоактуатора



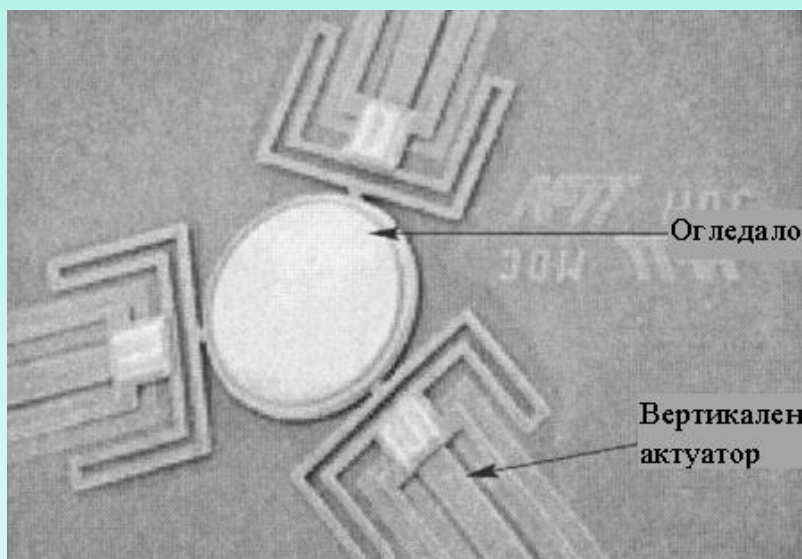
Удължение на актуатора



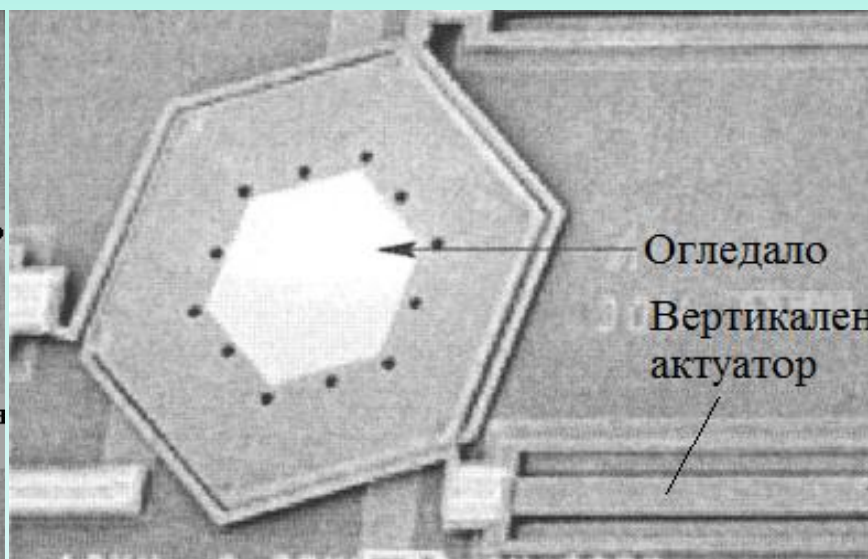


## U – образни термоактуатори

Управляеми огледала с три термоактуатори



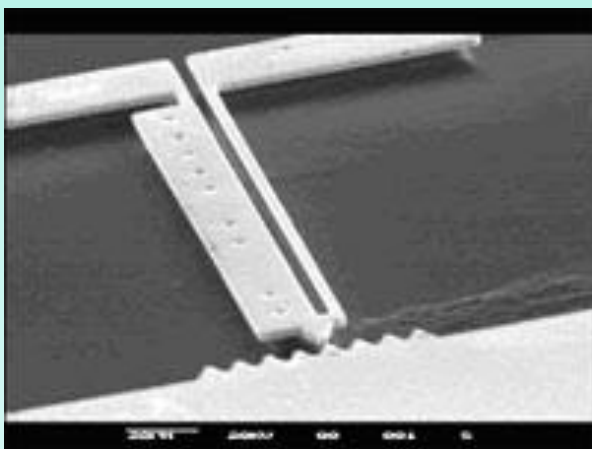
а) шестоъгълно огледало с увеличена честота;



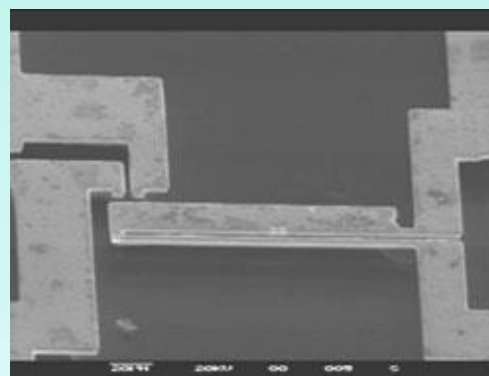
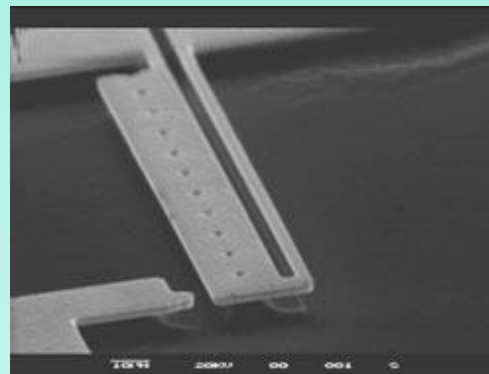
б) кръгло огледало с увеличен наклон



## *U – образни термоактуатори*



*Странично термозадвижване базирани на Ni.*

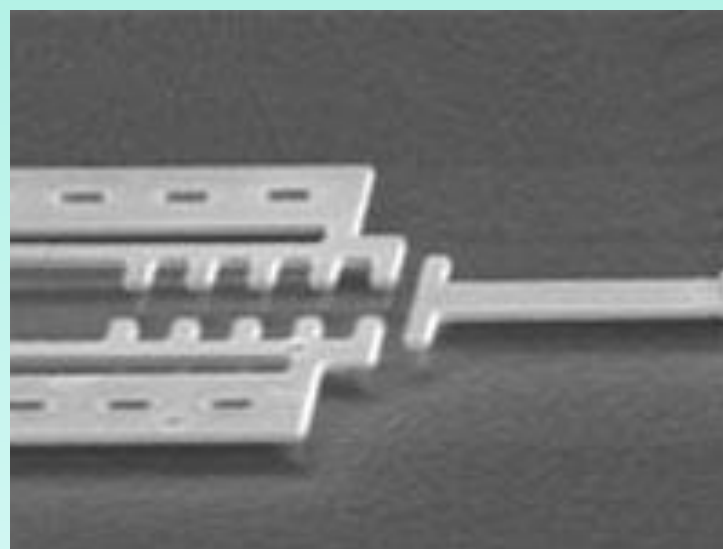


*Микромеханични ключове с единичен и двоен контакт*





## *U – образни термоактуатори*



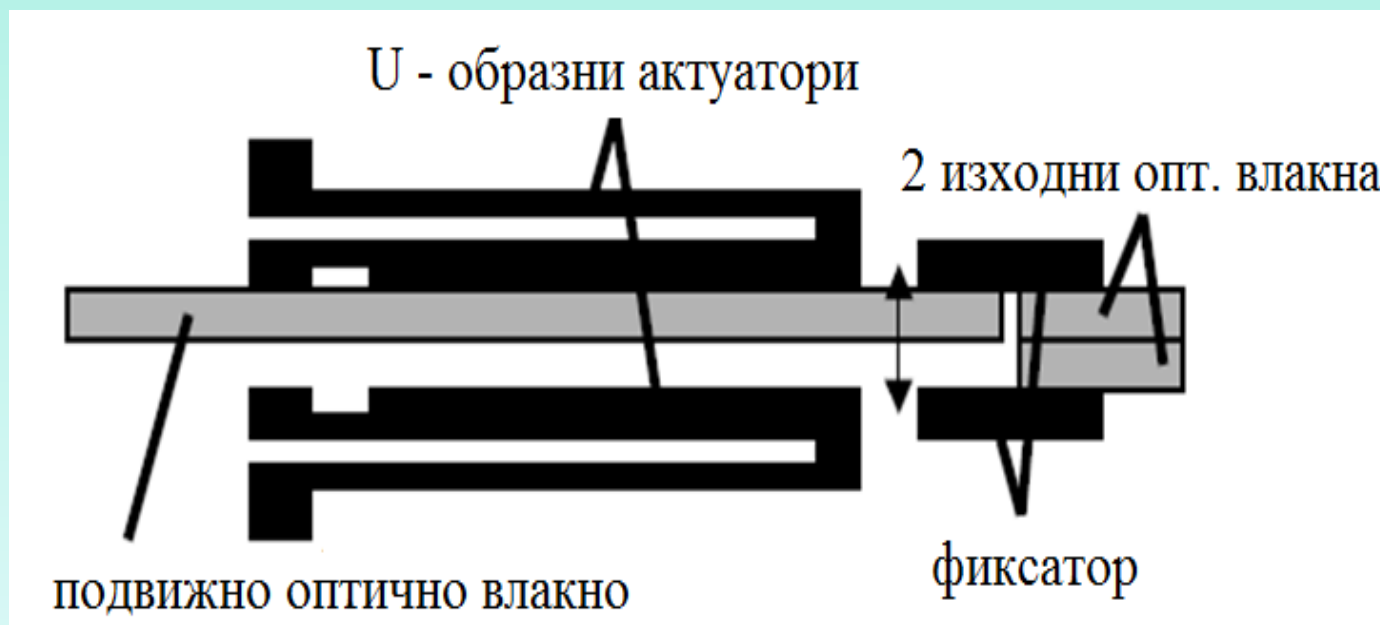
Прилага се за многопозиционни оптични ключове, пренастройване на RF антени и др..

*Двойно заключващ се многопозиционно задвижване. Термозадвижването е бистабилно. Веднъж отклонено, се заключва във 2 положение без да е необходимо подаване на следващо ел. захранване.*



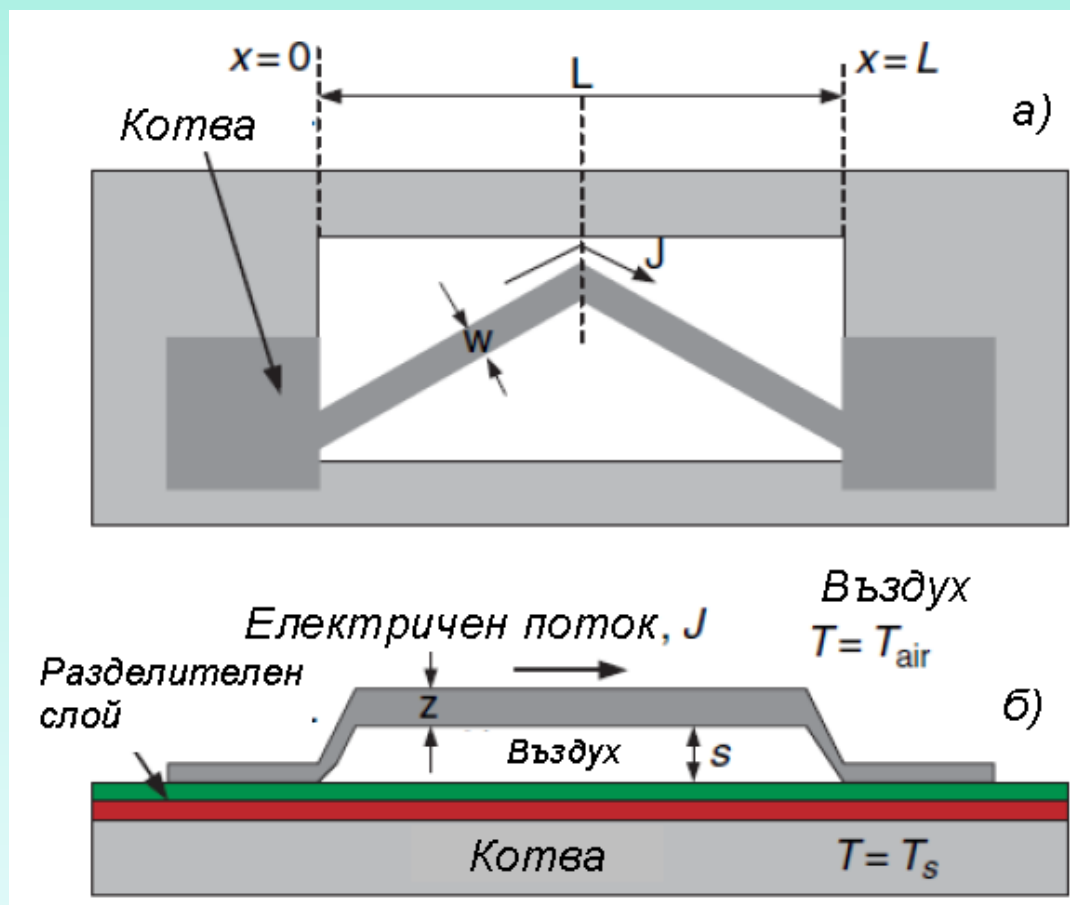
## *U – образни термоактуатори*

Двупътен оптичен ключ



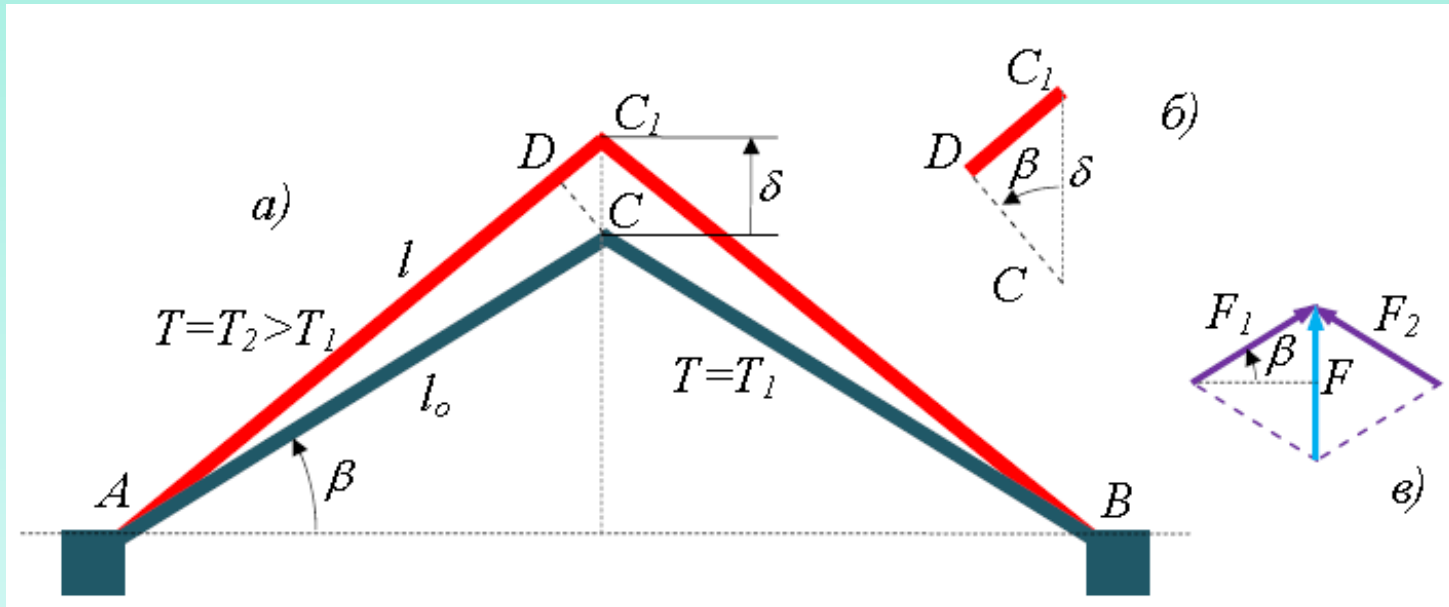


## V – образни термоактуатори



## V – образни термоактуатори

Преместване и сили на V-образен микро термоактуатор



$$\delta = \frac{DC_1}{\sin \beta}. \quad \Delta l = l - l_0 = DC_1 = l_0 \alpha_T \Delta T, \quad \Delta T = T_2 - T_1$$

$$\delta \approx \frac{l_0 \alpha_T \Delta T}{\sin \beta}. \quad F \approx 2EA \alpha_T \Delta T \sin \beta.$$

(при опрян в твърда преграда връх)



## V – образни термоактуатори

Чрез теоремите на Кастилиано са изведени

$$\delta = \frac{A\alpha_T \Delta T l^3 \sin \beta}{12I \cos^2 \beta + Al^2 \sin^2 \beta}, \quad I = \frac{wh^3}{12}$$

$$F = \frac{3EA^2 \alpha_T \Delta T l^2 I \sin \beta}{(12I \cos^2 \beta + Al^2 \sin^2 \beta)(Al^2 \cos^2 \beta + 3I \sin^2 \beta)},$$

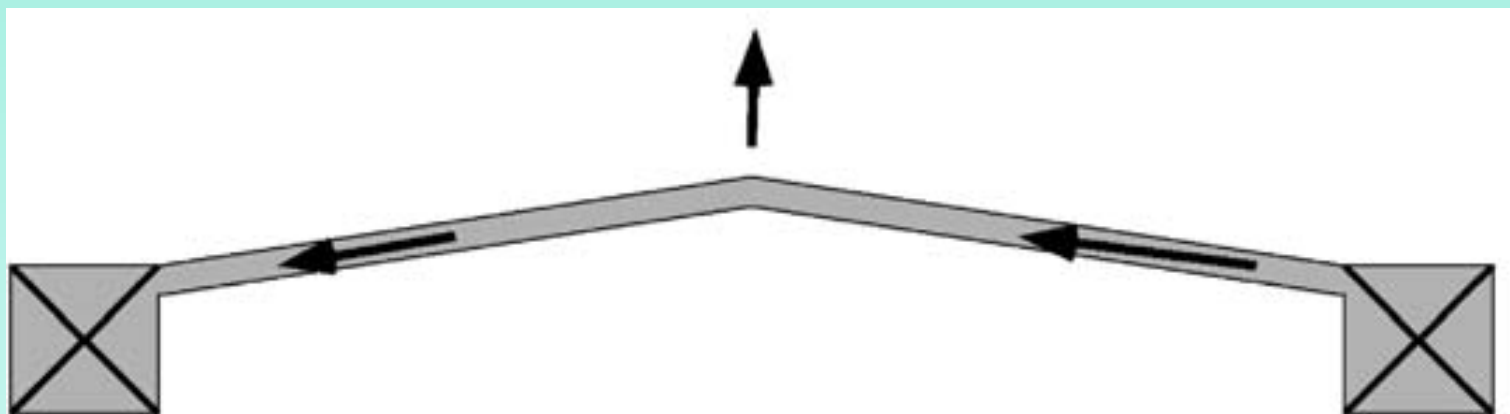
Ходът на V-образните термоактуатори варира между 5 и 50  $\mu\text{m}$ . При ход от 5  $\mu\text{m}$  и ширина на гредата от

$w = 4 \mu\text{m}$  консумираната мощност е 180 mW, захранването не надвишава 15 V. Силите са от порядъка на 1 до 10 mN и честотата е около 700 Hz.

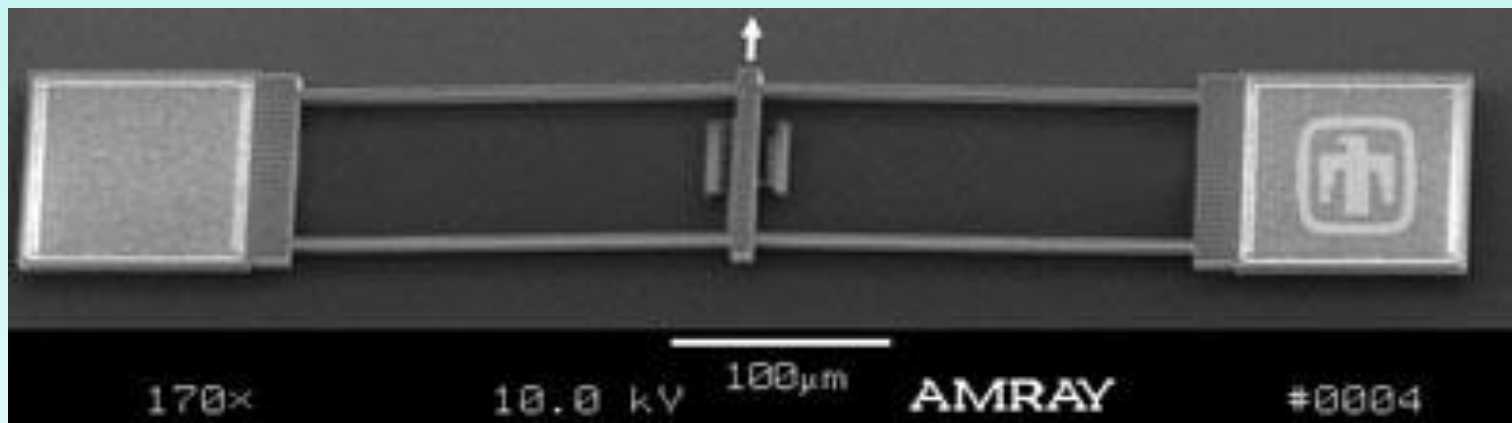
При тези микро актуатори най-голямо приложение намират никелът и силицият.



## V – образни термоактуатори



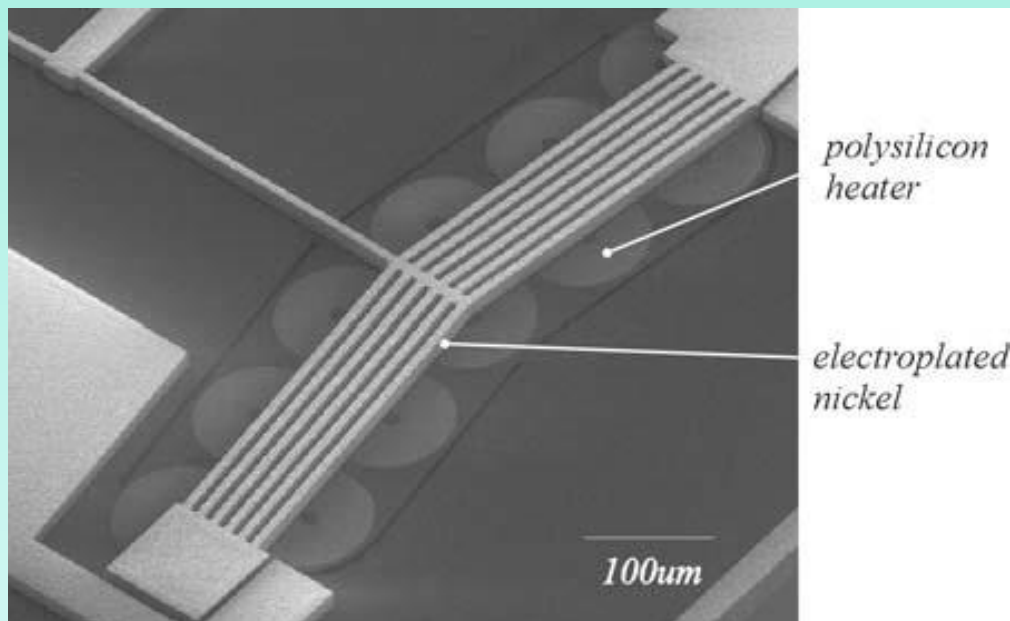
V-образното термозадвижване има ход от  $5 \mu\text{m}$  до  $50 \mu\text{m}$



V- образно термозадвижване (on-chip in-plane) за висока сила при линейно преместване.



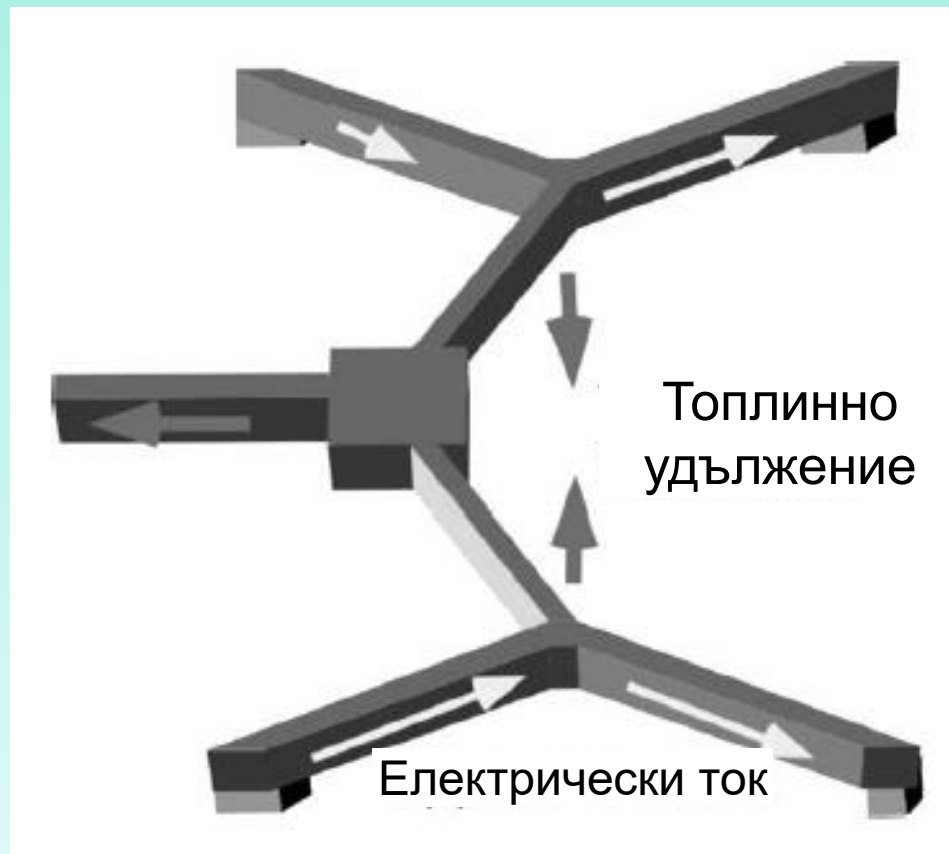
## V – образни термоактуатори



SEM изображение на никелов V актуатор, нанесен чрез електролиза върху SiN и разположен над капсулиран полисилициев нагревател.



## *V – образни термоактуатори*

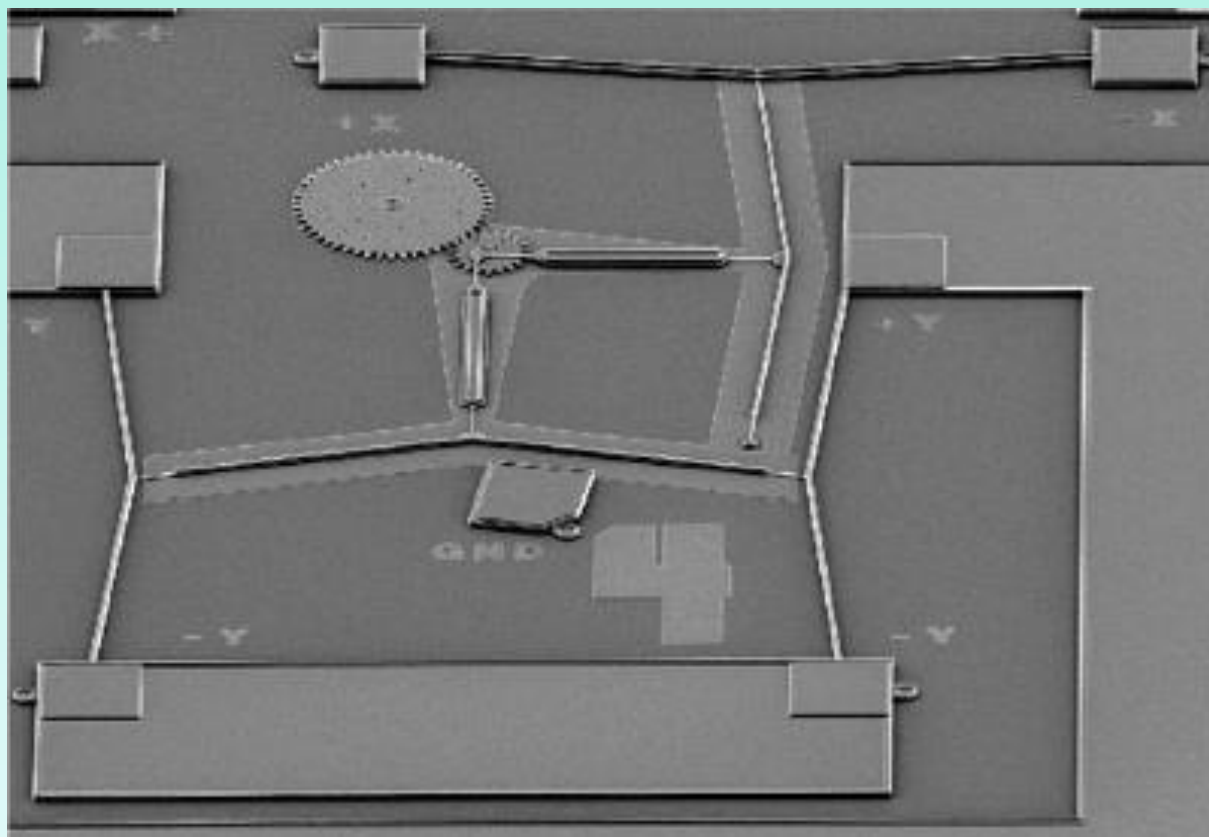


Каскадно U-образно термозадвижване





## *V – образни термоактуатори*



Приложение на каскадно U-образно термозадвижване



## V – образни термоактуатори

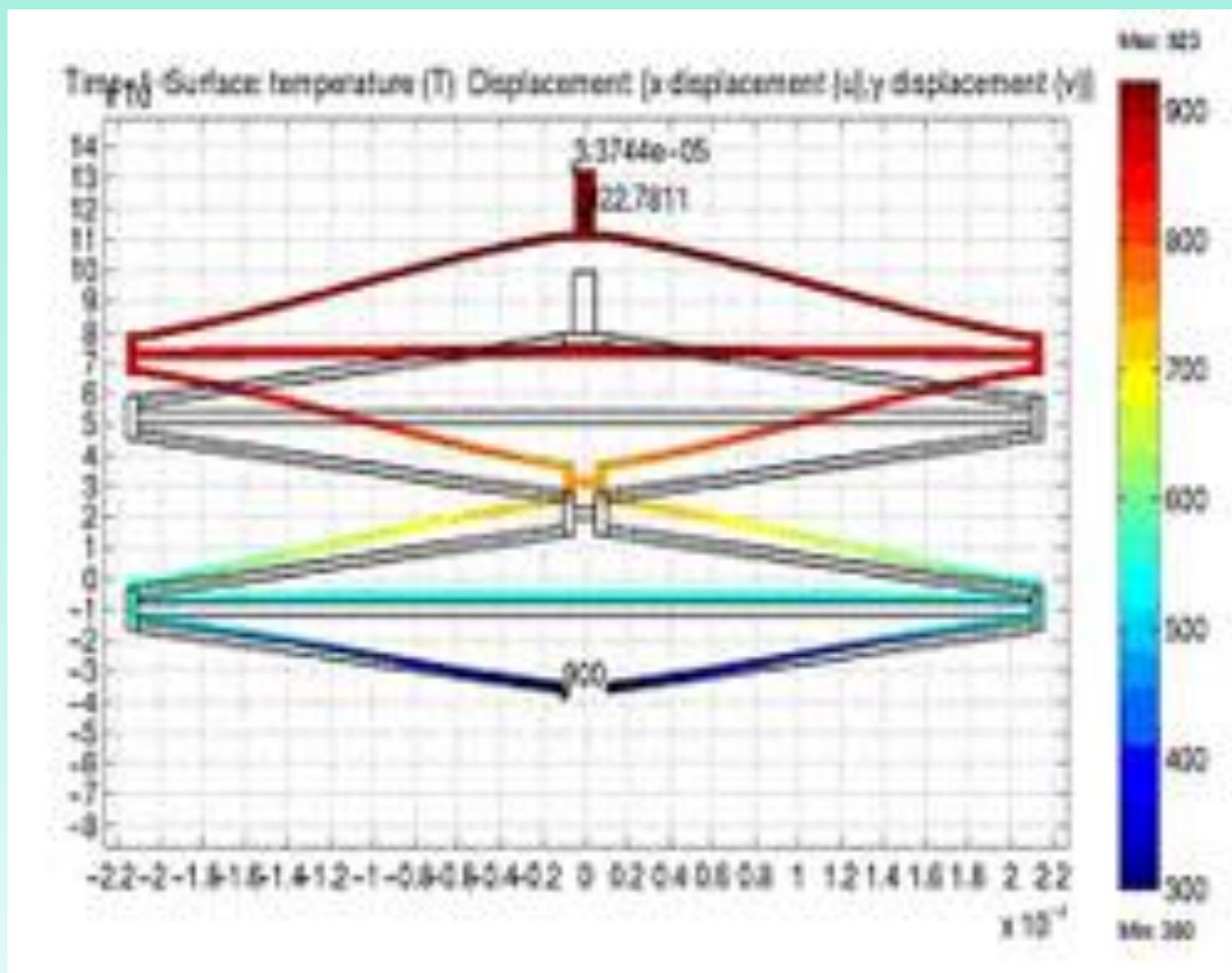
За да се получи голямо отклонение при шевронните термозадвижвания е необходимо да се използва устройство по-големи размери. Това обаче се ограничава от условието за изкълчване и големите размери.

**Пружините микрозадвижвания** позволяват да се постигне **по-голям ход** в сравнение с шевронните при по-малки размери. Тези задвижвания са съставени от няколко шевронни структури с изолираща греда закрепена в двата края. Изолиращите греди са с малък коефициент на термично разширение и се използват за образуване на кръстовидно звено като по този начин се ограничава движението в x-направлението. Нагряват се само наклонените греди което води температурно удължение само в y-направление. Чрез свързване на няколко шевронни секции е възможно да се получи **преместване до 100  $\mu\text{m}$**  за устройство с **обща дължина на гредите от 200  $\mu\text{m}$ , т.е. повече от 50%** от дължината на гредата.

Галванично нанесен Ni е използван като активен материал, а изолиращите греди са от  $\text{SiO}_2$ .



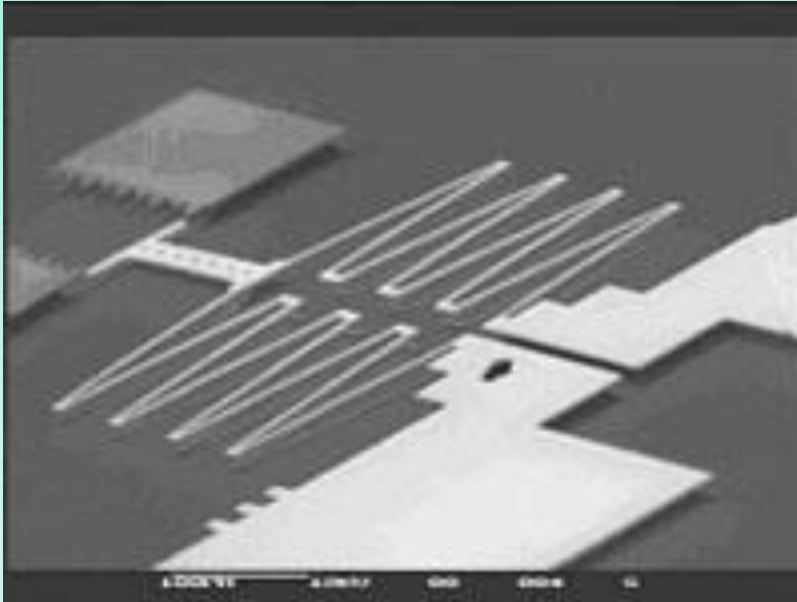
## V – образни термоактуатори



Симулация чрез МКЕ и резултата от 2 микропружинни термозадвижвания



## *V – образни термоактуатори*



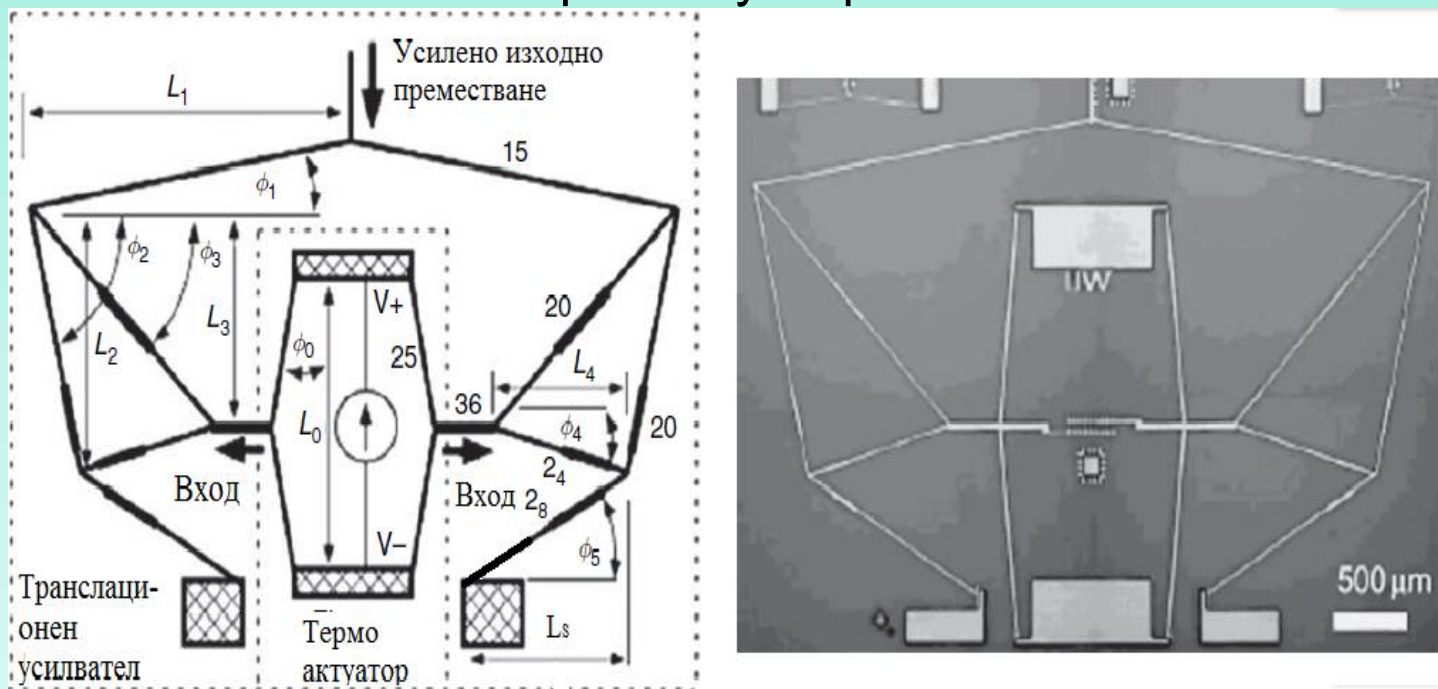
*Микро снимка на микропружинно задвижване с изолиращо-закрепващи греди.*



*Микроструктура с 8 шевронни секции свързани последователно в ненатоварено състояние.*

## V – образни термоактуатори

Еластичен механизъм за усиление на преместване на V – образни термоактуатори

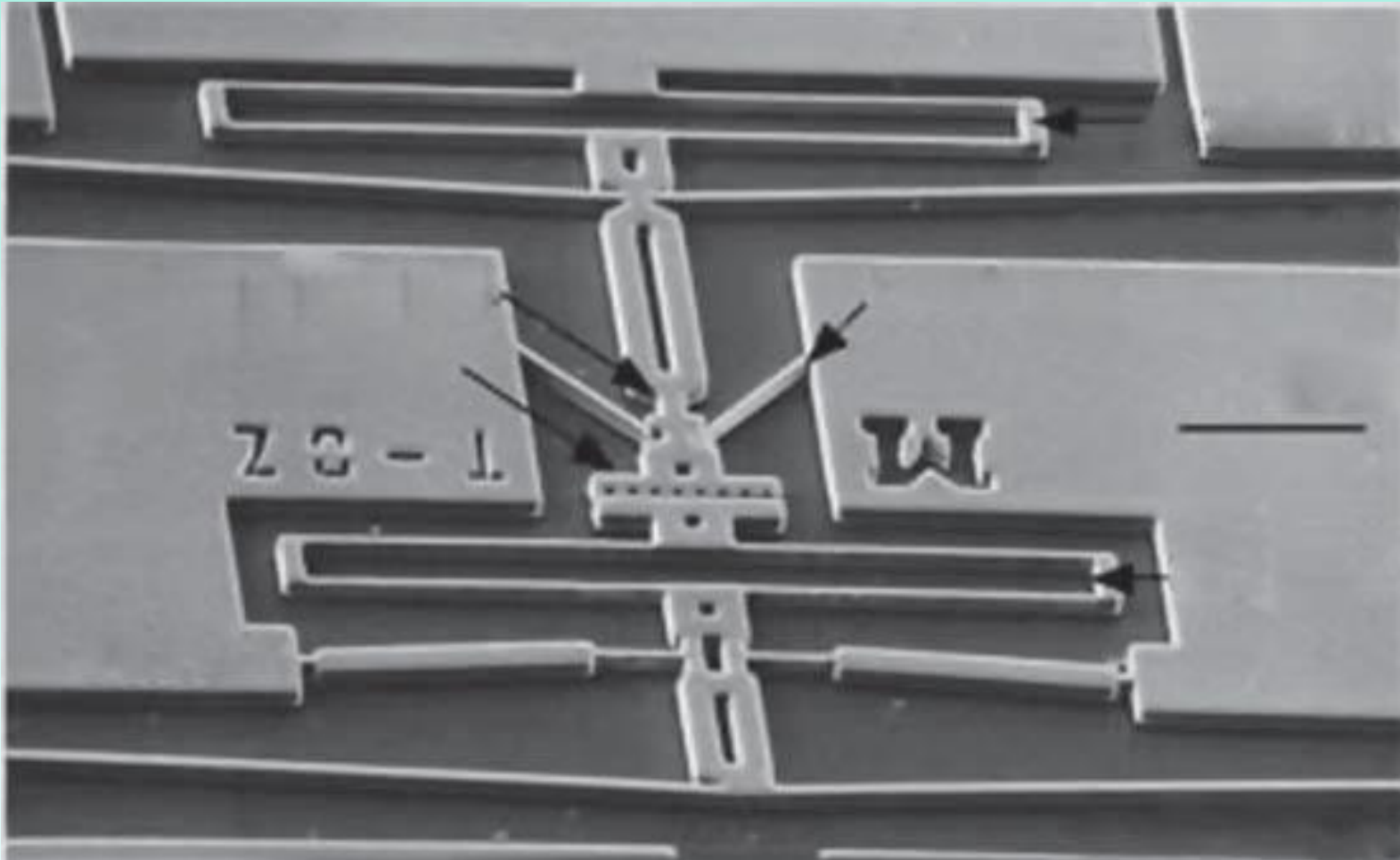


Размерите на звената са  $L_0=2450 \mu\text{m}$ ,  $L_1=2415 \mu\text{m}$ ,  $L_2=1750 \mu\text{m}$ ,  $L_3=1400 \mu\text{m}$ ,  $L_4=1000 \mu\text{m}$ ,  $L_5=1210 \mu\text{m}$ , Ширината на звената е  $w=70 \mu\text{m}$ , а дебелината е  $h=11.5 \mu\text{m}$ . Коефициентът на усиление е 17, а преместването е нерезонансно и достига  $100 \mu\text{m}$ . Коефициентът на усиление се изменя чрез промяна на дължините на звената



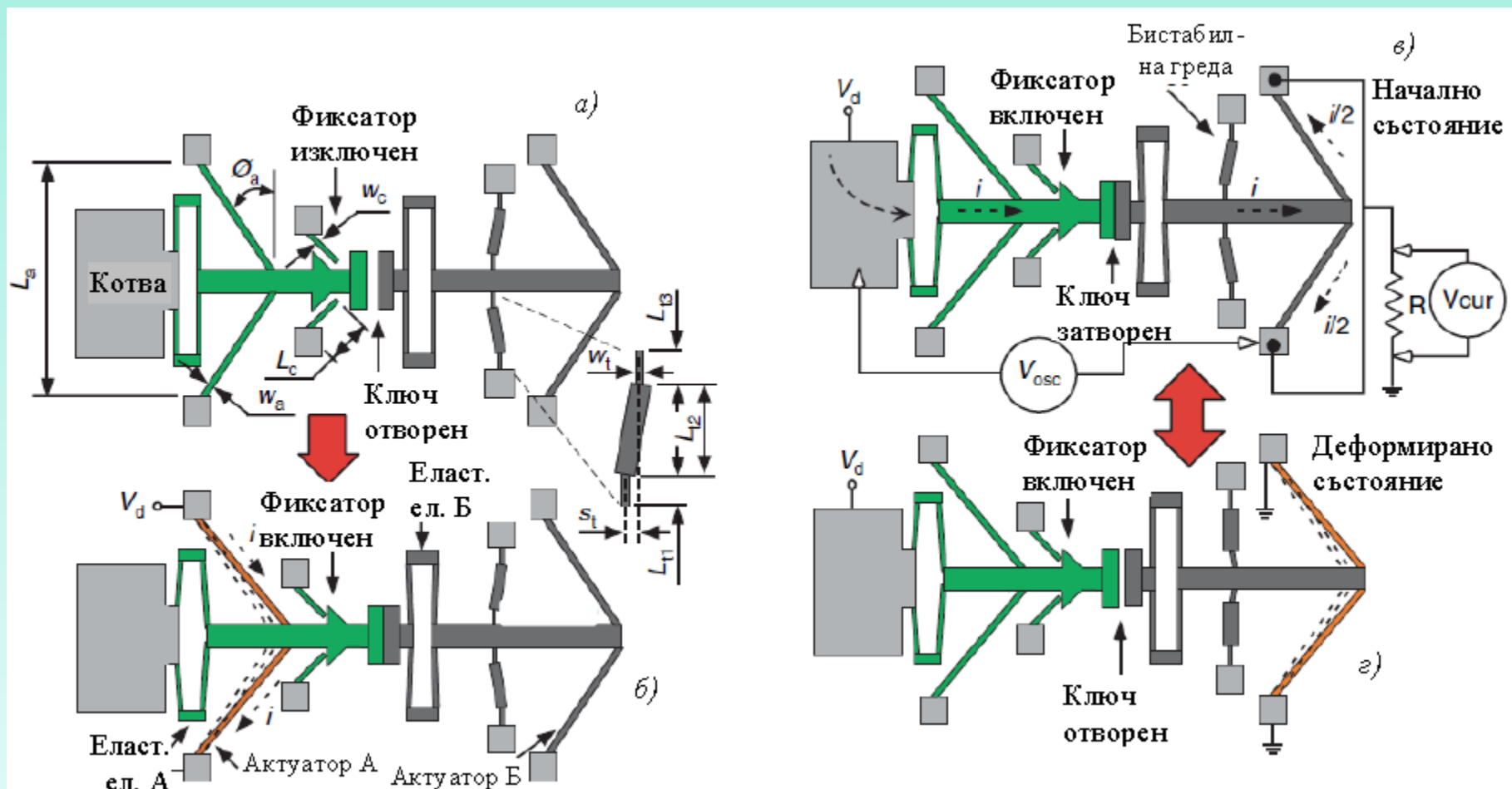
## *V – образни термоактуатори*

СЕМ на резонатор с два термоактуатора





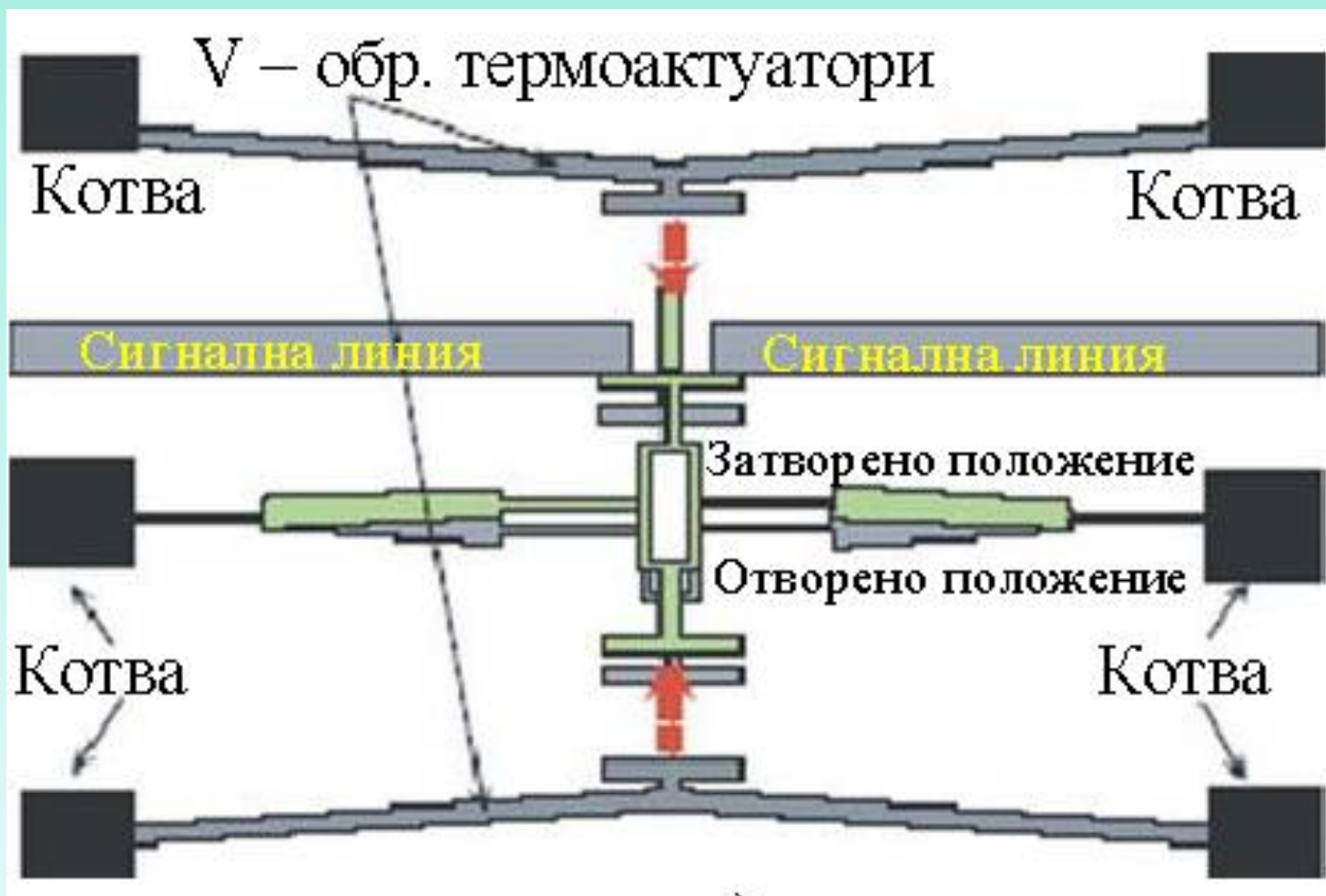
## V – образни термоактуатори





## V – образни термоактуатори

Радиочестотен ключ с би-стабилна гредка и два V-образни термоактуатора







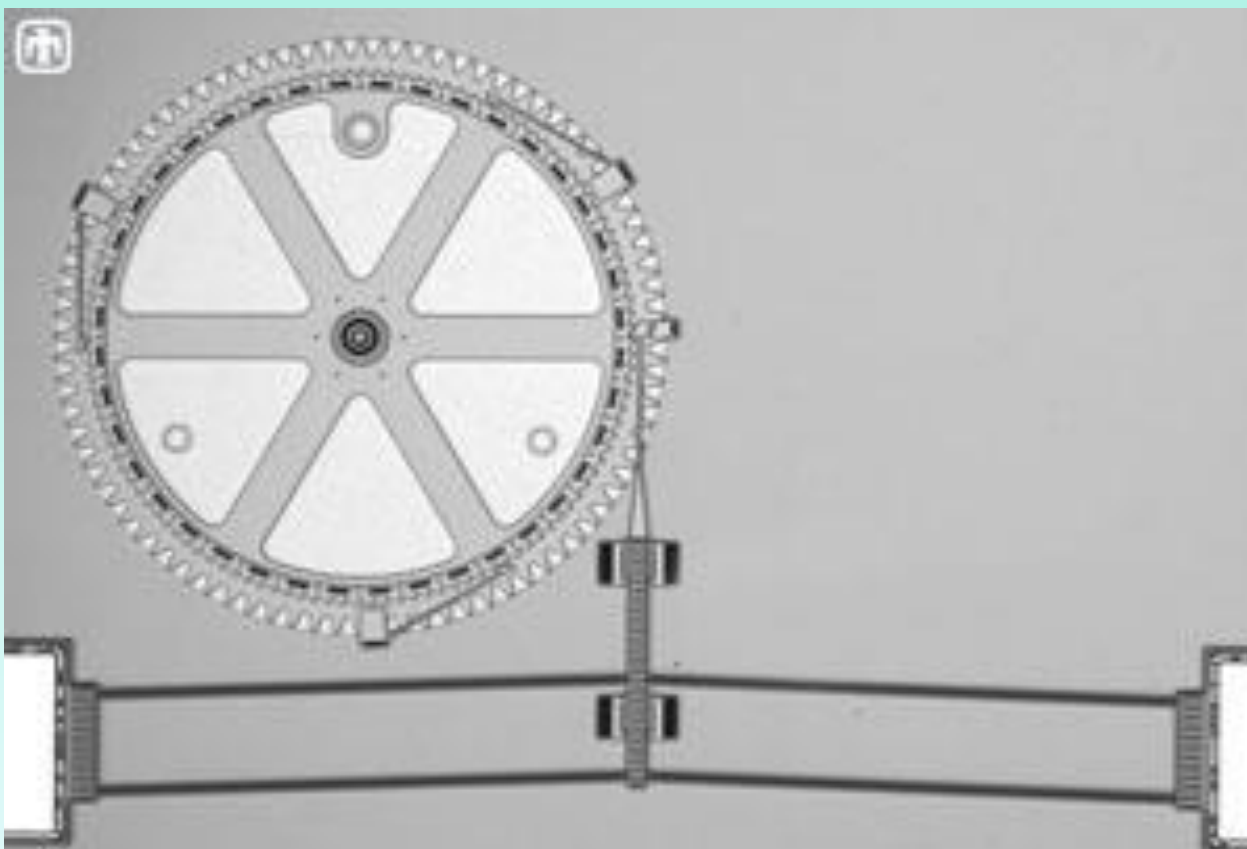
## *V – образни термоактуатори*





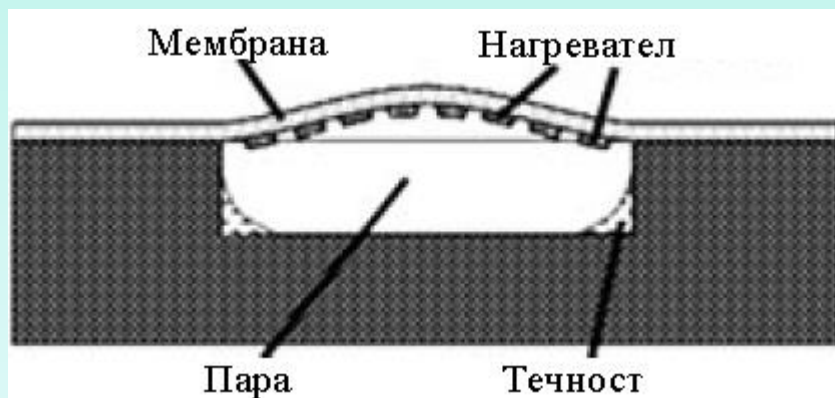
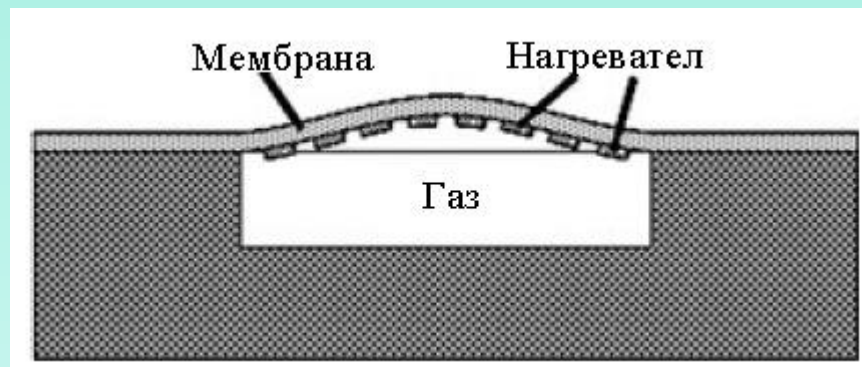
## *V – образни термоактуатори*

Термохрапово задвижване с V – образни термоактуатори





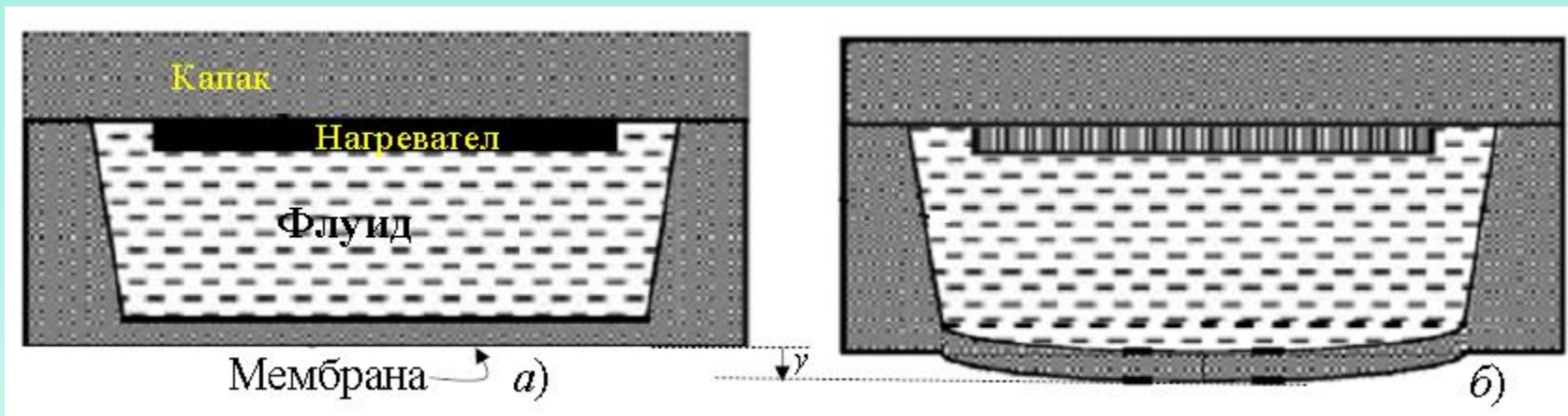
## Пневно- и хидротермоактуатори



Висок ход до 5  $\mu\text{m}$  при относително високи сили около 1 N. Възможностите за изработване на микропомпи и микроклапани без подвижни части е предпоставка за тяхната висока надеждност и продължителност на работа



## Пневно- и хидротермоактуатори

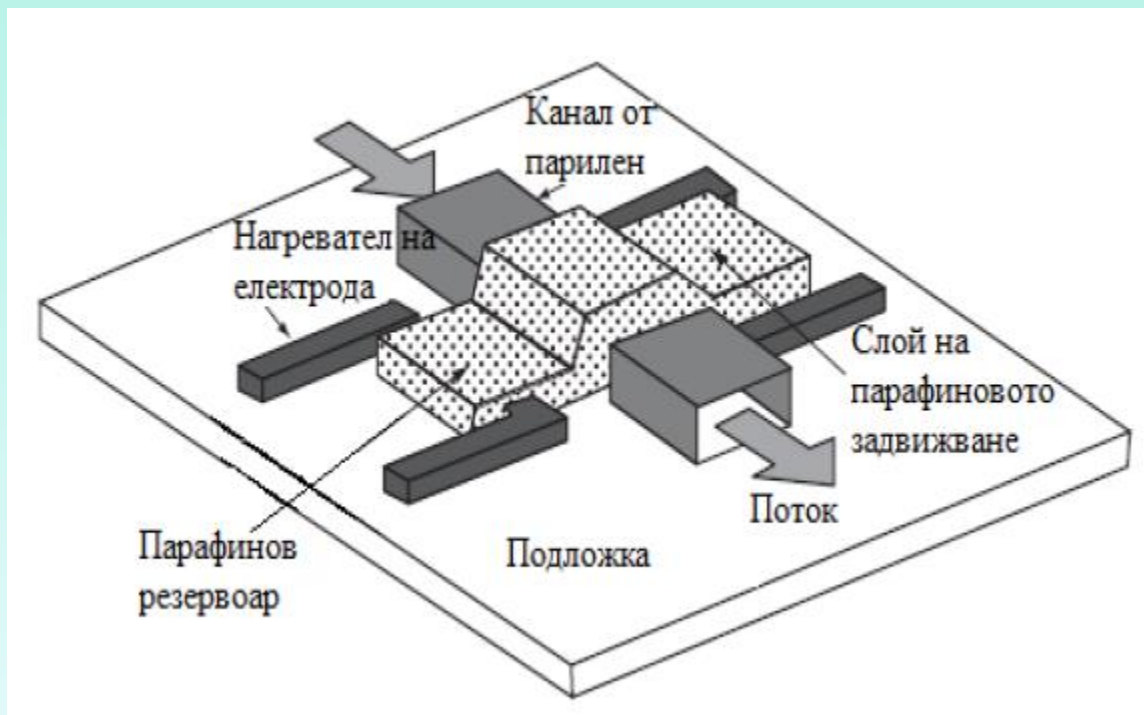


Работната субстанция на термоактуаторите с кухина и мембрана може да бъде не само газ или течност, но и твърдо вещество. Най-често се използват различни видове парафини и восък. Енергийна плътност е  $10^7$  J/m<sup>3</sup>, която е от най-високите за всички видове актуатори. Обемното температурно разширение при тези материали варира от 15 до 20% при преминаване от твърда в течна фаза и също така е едно от най-големите (Фиг. 4.38). Само при някои електроактивни полимери относителното температурно разширение достига до 30%, но се изискват високи напрежения, а генерираните сили са малки.



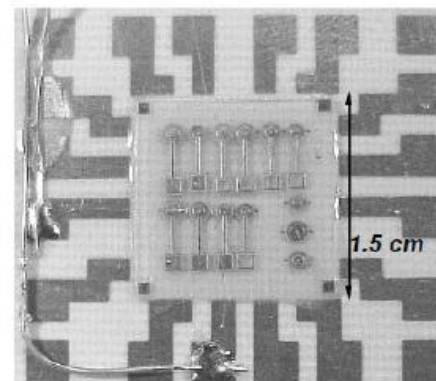
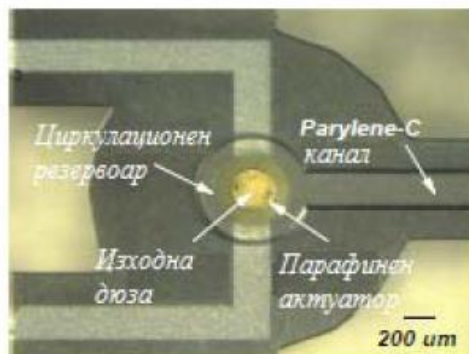
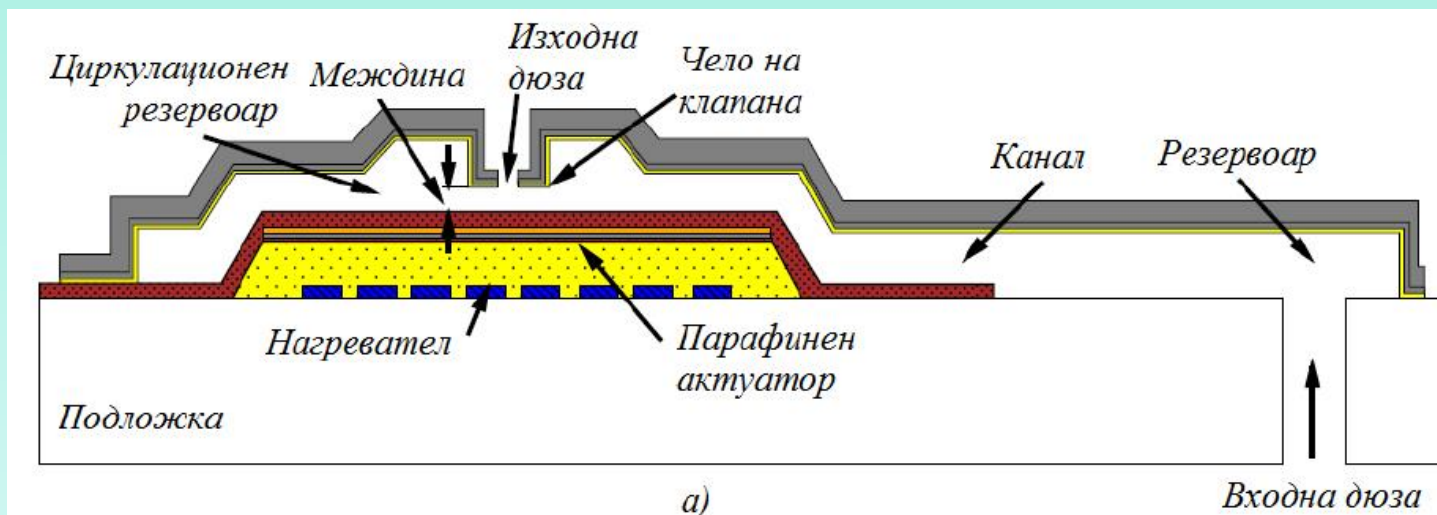
## Пневно- и хидротермоактуатори

### Парафинов микро клапан





## Пневно- и хидротермоактуатори



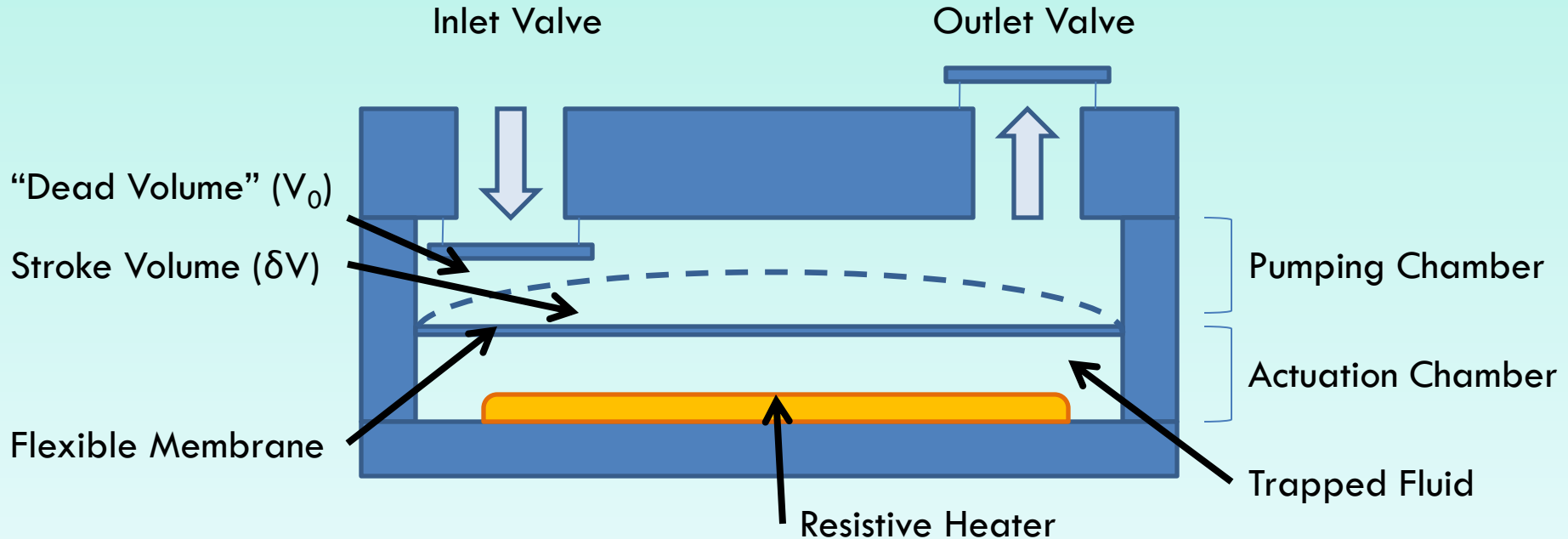
## Пневно- и хидротермоактуатори

### Термо-пневматични микропомпи

- Основен механизъм
  1. Резистивно загряване
  2. Въздушно разширение
  3. Деформиране на мембрана

Typical Voltage: 1-20 V  
Typical Pump Freq: 1-2 Hz

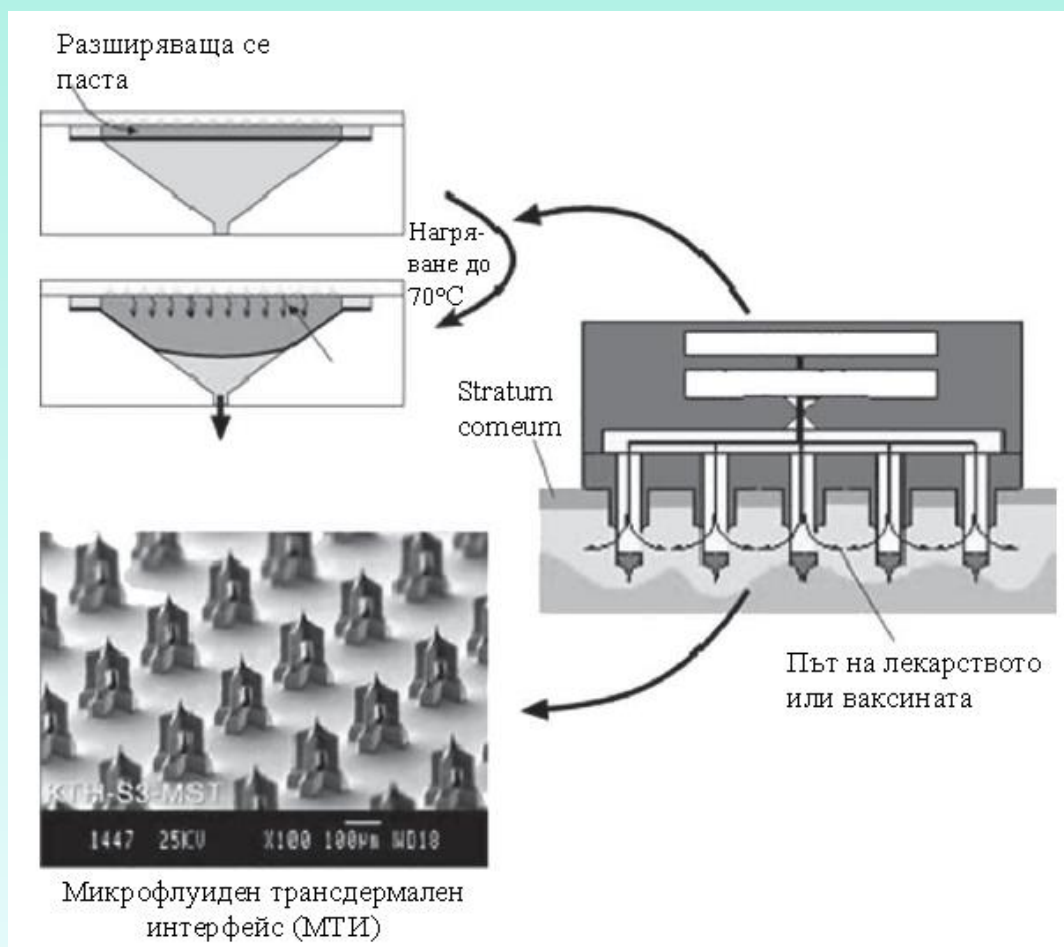
$$\varepsilon = \delta V / V_0 = \text{compression ratio}$$





## Пневно- и хидротермоактуатори

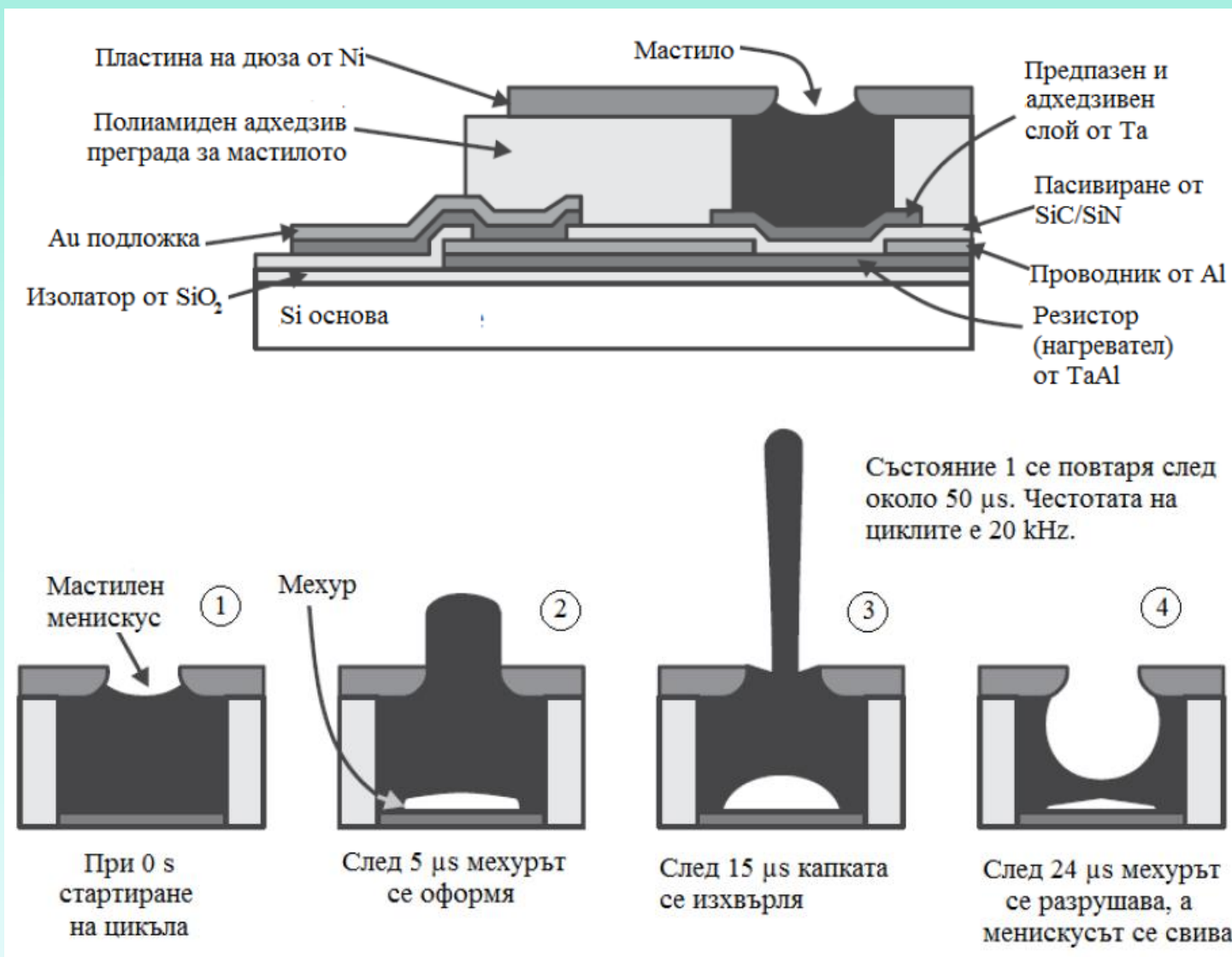
Микродиспенсер и микрограф на микрофлуиден трансдермален интерфейс







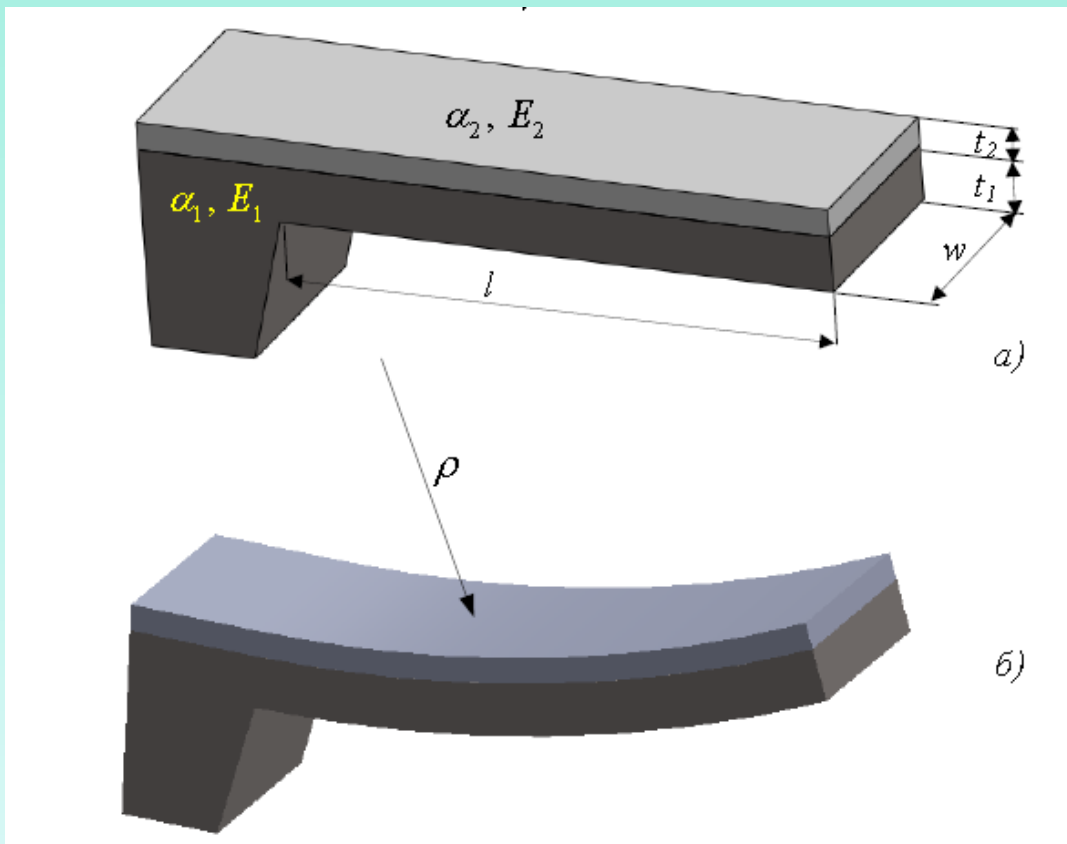
## Пневно- и хидротермоактуатори



Масилено струйна печатаща глава на Hewlett-Packard



## Двуслойни и многослойни микро термоактуатори



$$h = t_1 + t_2$$

$$H = \frac{t_1}{t_2}$$

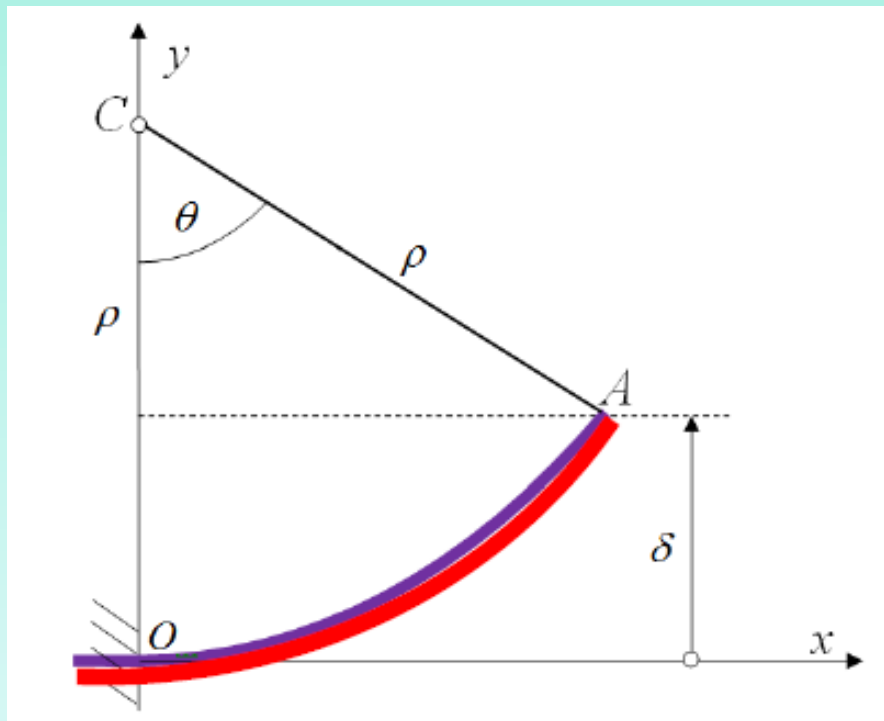
$$E = \frac{E_1}{E_2}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6(1+H)^2 (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T}{h \left[ 3(1+H)^2 + (1+HE)(H^2 + HE^{-1}) \right]}$$

$$\Delta T = T_2 - T_1$$



## Двуслойни и многослойни микро термоактуатори



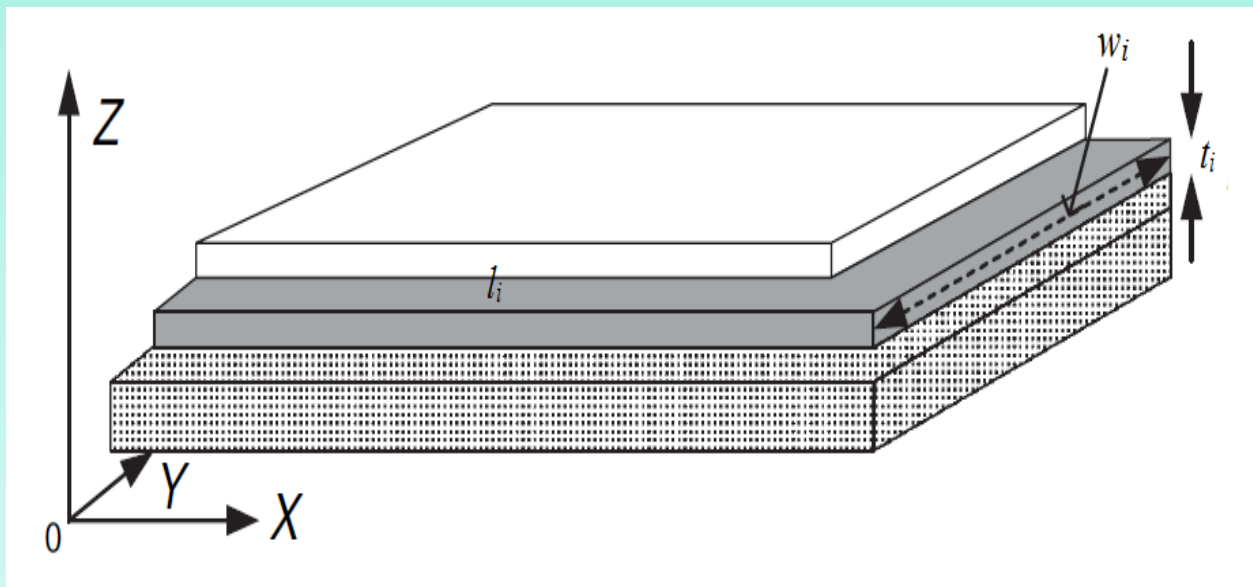
$$\theta = \frac{l}{\rho}$$

$$\delta = \rho(1 - \cos \theta).$$

Деформация на конзолна двуслойна греда

## Двуслойни и многослойни микро термоактуатори

Мултиморф - общ случай с различни дължини и ширини на слоевете



$$\delta = \frac{L_s^2}{8\rho}$$

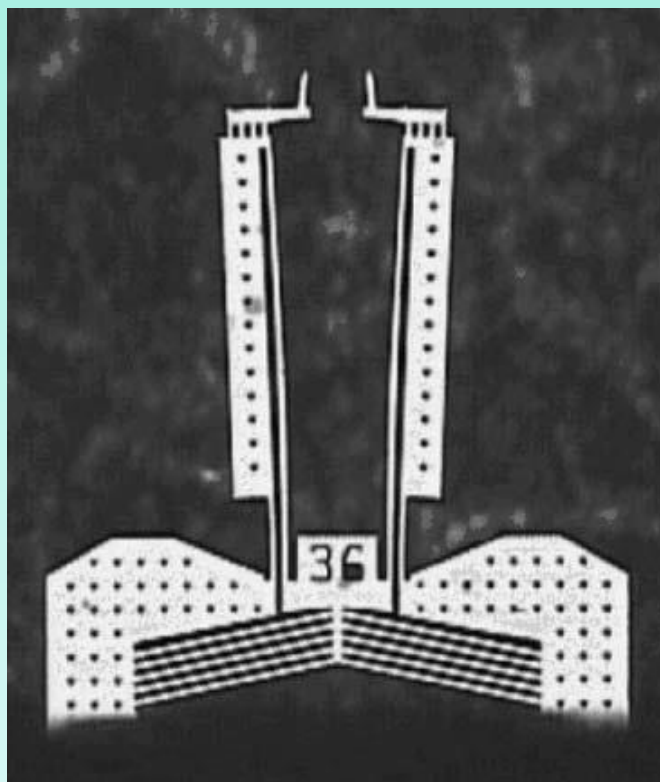
$$\eta_i = \sum_{k=1}^i t_k - t_i/2$$

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n E_i w_i t_i \eta_i}{\sum_{i=1}^n E_i w_i t_i}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{12 \sum_{i=1}^n E_i w_i (\eta_i - \eta) (\alpha_i - \alpha_s) (T_{f,i} - T_0)}{\sum_{i=1}^n E_i t_i w_i [t_i^2 + 12(\eta_i - \eta)^2]}$$



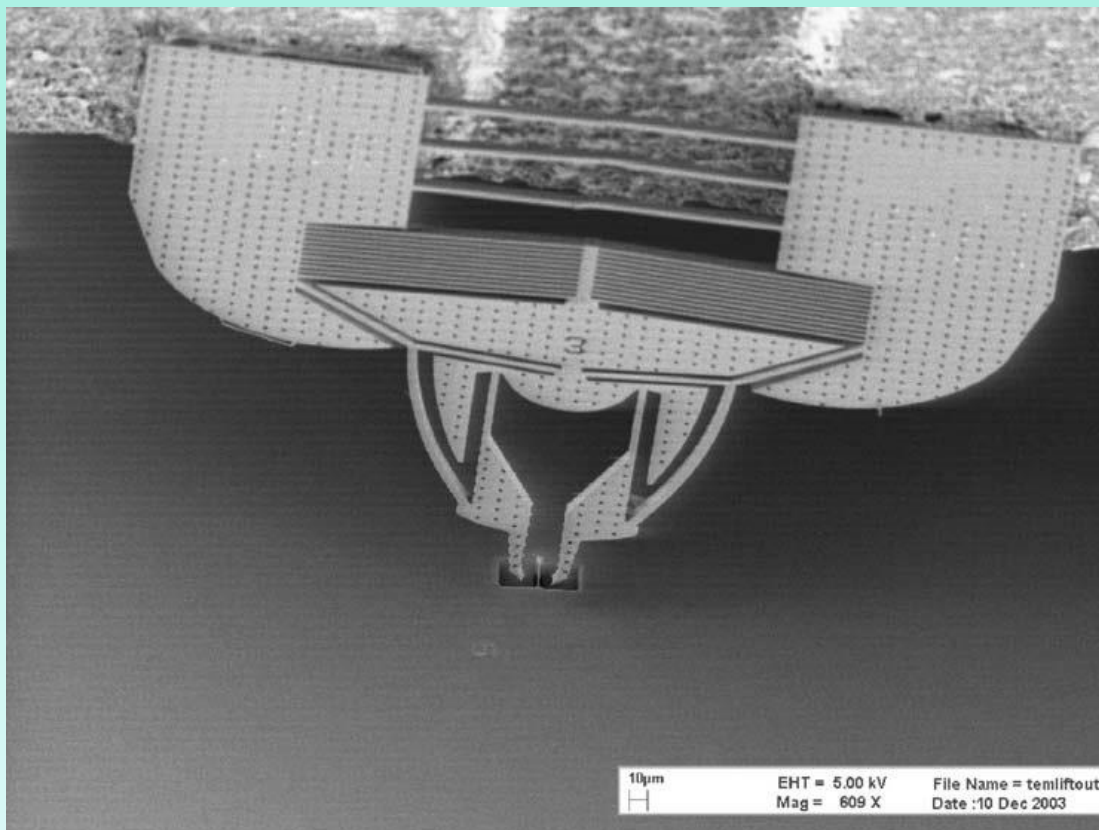
## Термомикрохващачи



Microgrippers designed using a cascaded arrangement of bent-beam actuator and pseudo bimorph. Grippers are 1.5 mm by 1 mm and power open 50  $\mu\text{m}$  at 6 V, with an in-plane arm stiffness of 22  $\mu\text{N}/\mu\text{m}$  [21].



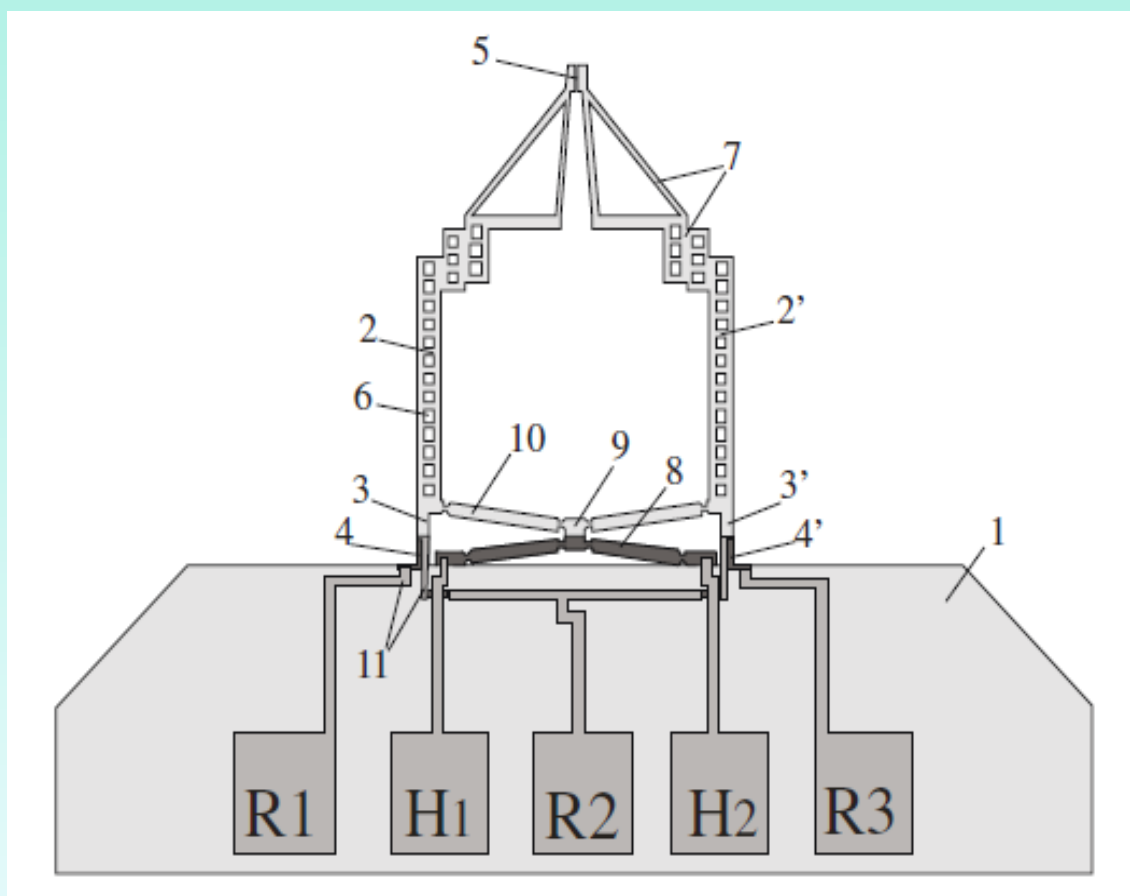
## Термомикрохващачи



. Microgripper used for TEM sample coupon liftout, fabricated from 5 µm thick SOI, removed from the substrate and attached to microgripper mount. This design is 0.5 × 0.5 mm<sup>2</sup> and 5 µm thick and powers close 16 µm at 6 V with gripper arm in-plane stiffness of 27 µN/µm

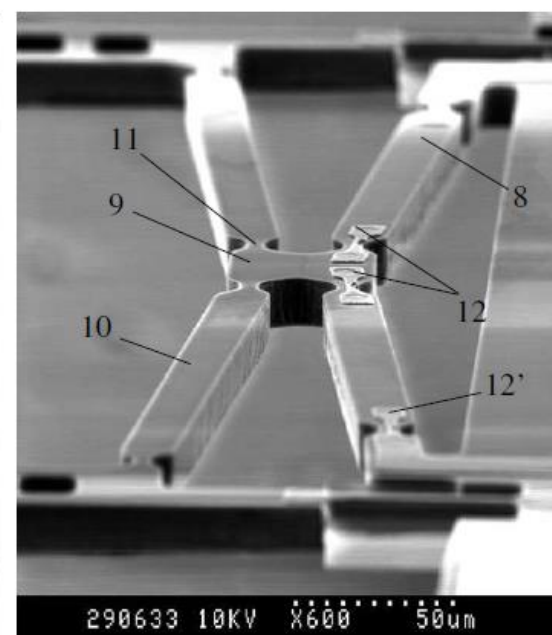
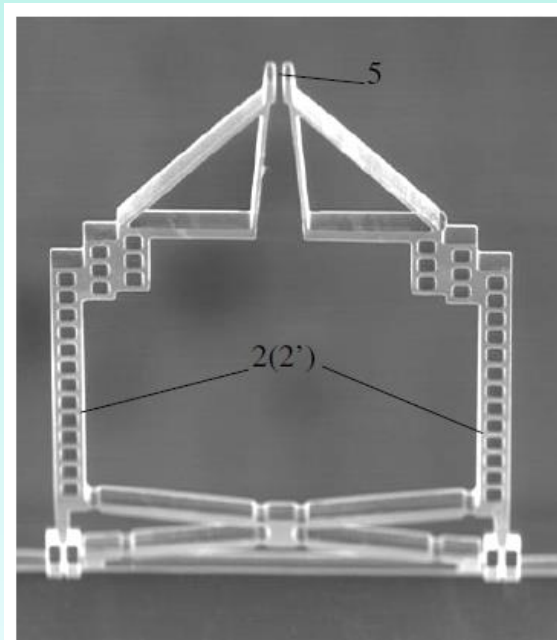
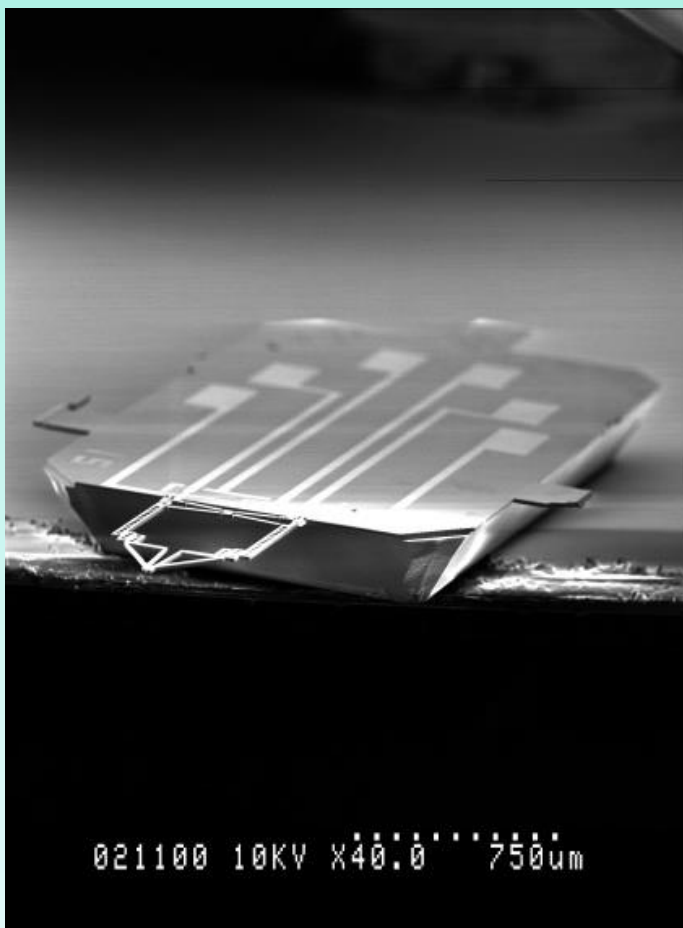


## Термомикрохващачи





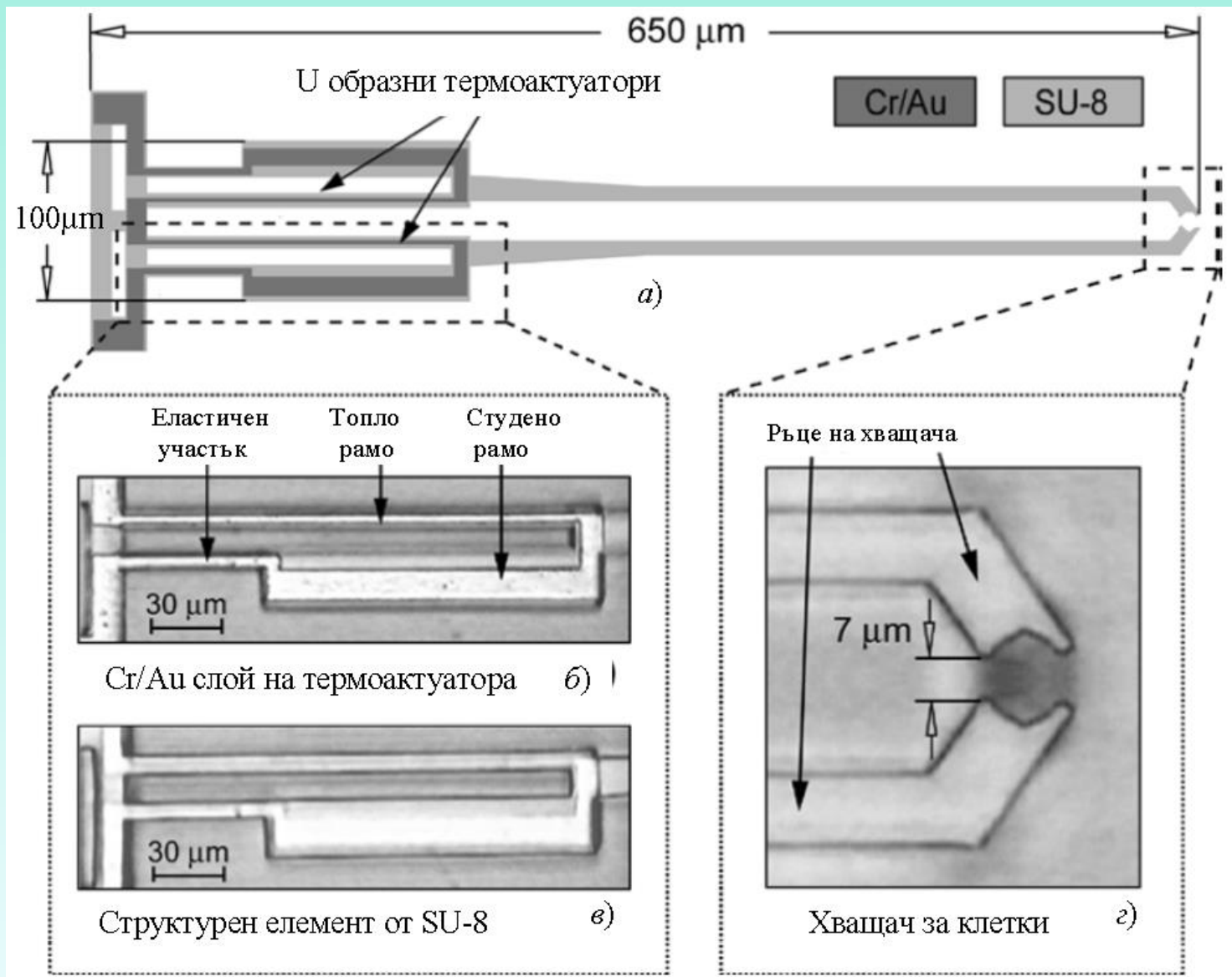
## Термомикрохващачи





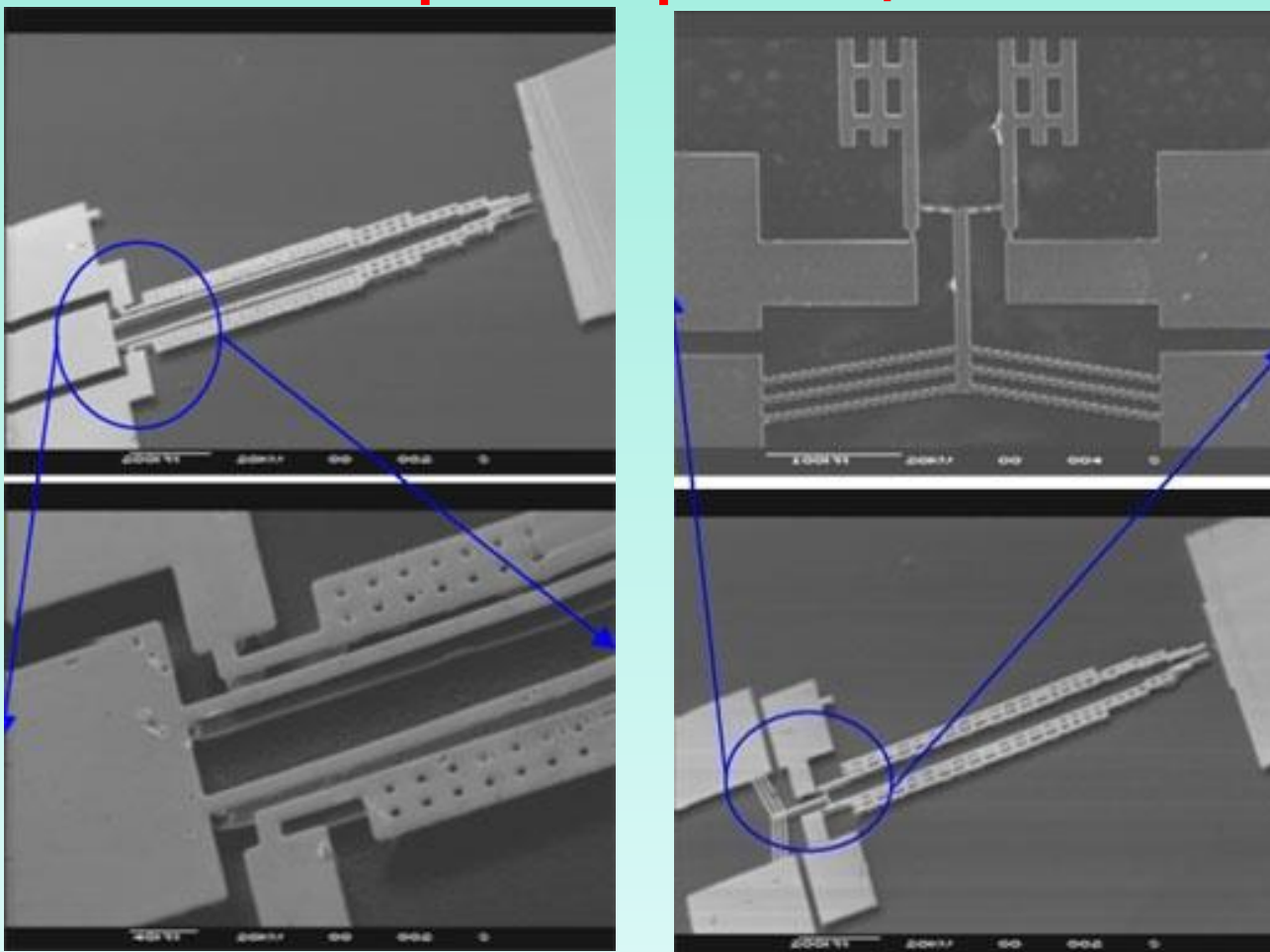


## Термомикрохващачи





## Термомикрохващачи



SEM снимки на микрохващачи. Увеличени са задвижващите механизми. За обработване отделяне и транспортиране микро клетки и частици, или изпълняване на локализирани дисекции сондиране и измерване.



## Термомикрохващачи

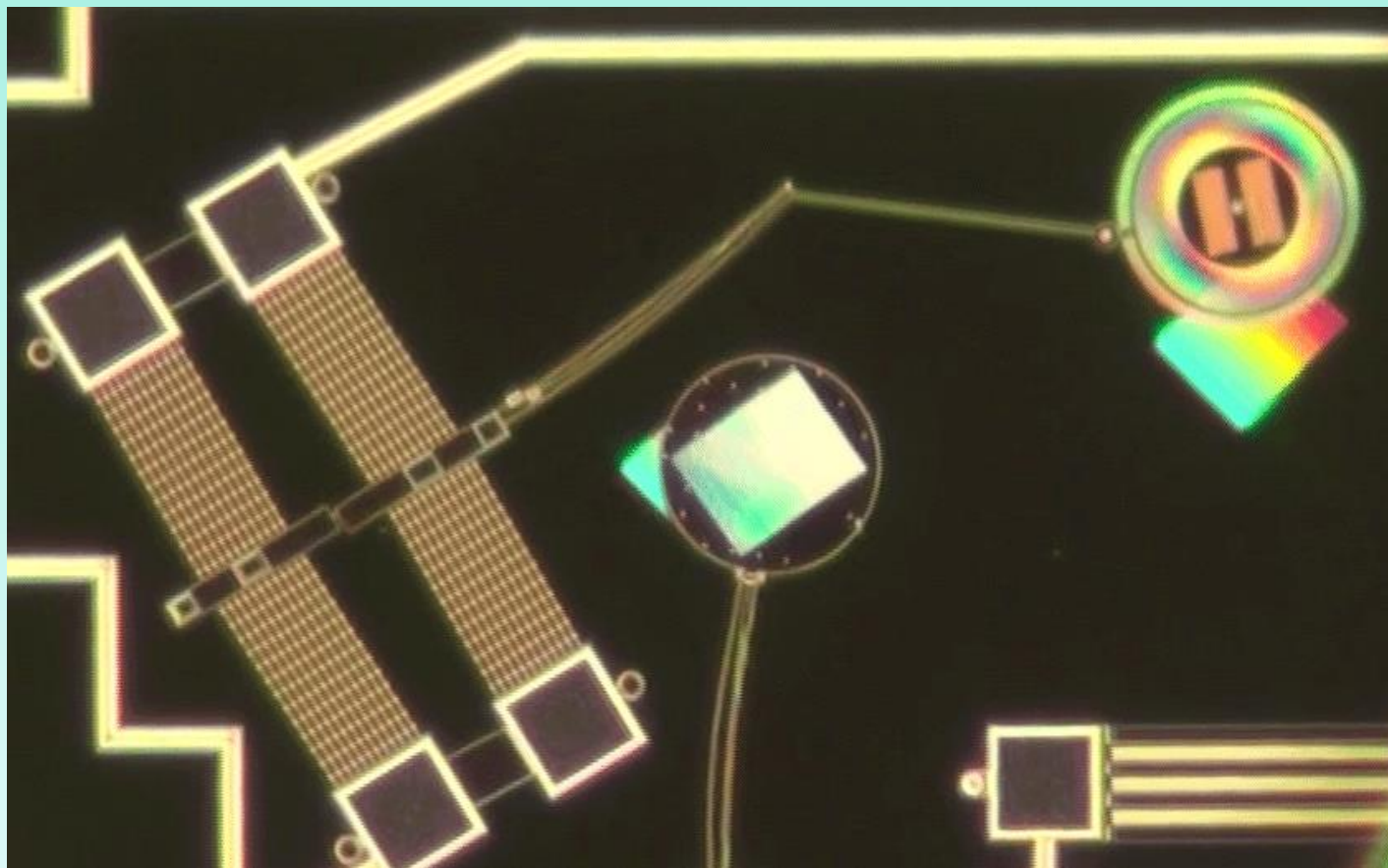
Термо задвижванията разсейват значителна мощност. Тя може да достигне **няколко вата** при сила 100 mN и преместване 100  $\mu\text{m}$ . Коефициентът на полезно действие обикновено е под 0.1%, по-голямата част от мощността се разсейва като топлина, която трябва да се отнеме от подложката и корпуса. В този смисъл температурните проблеми са сходни на тези при електронните интегрални схеми.

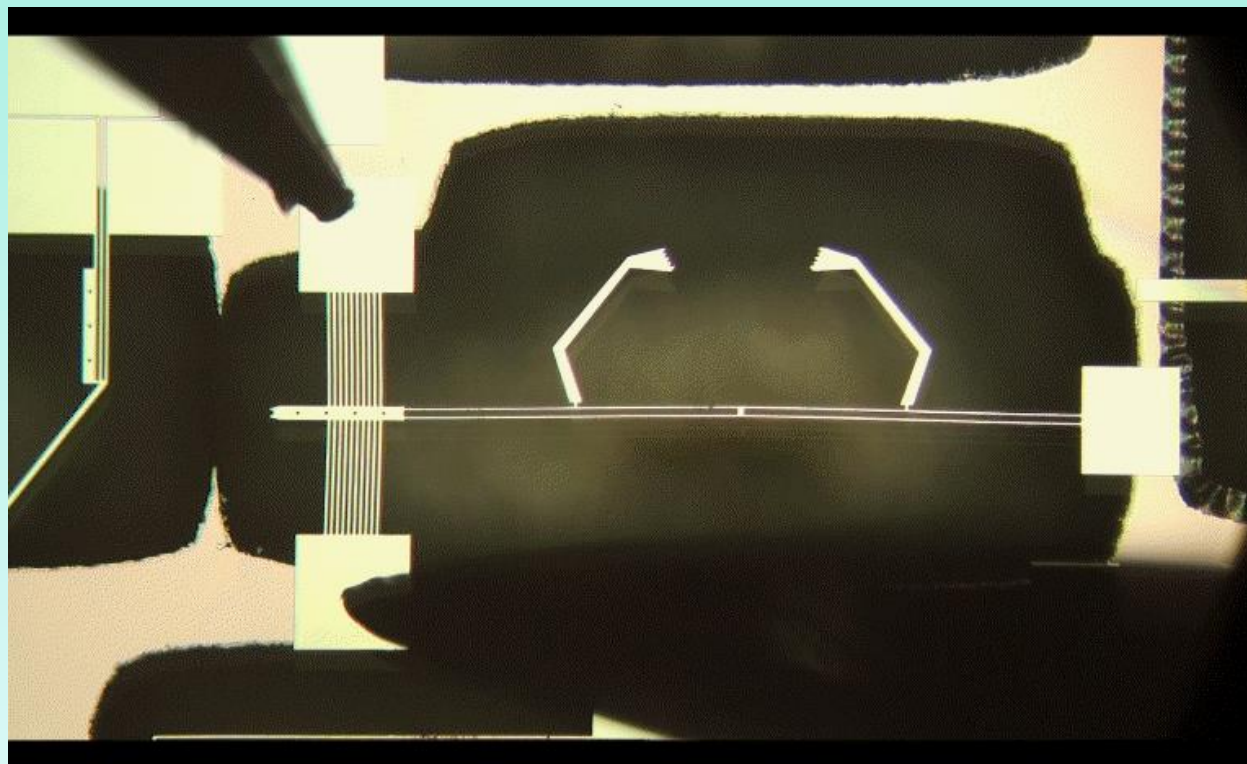


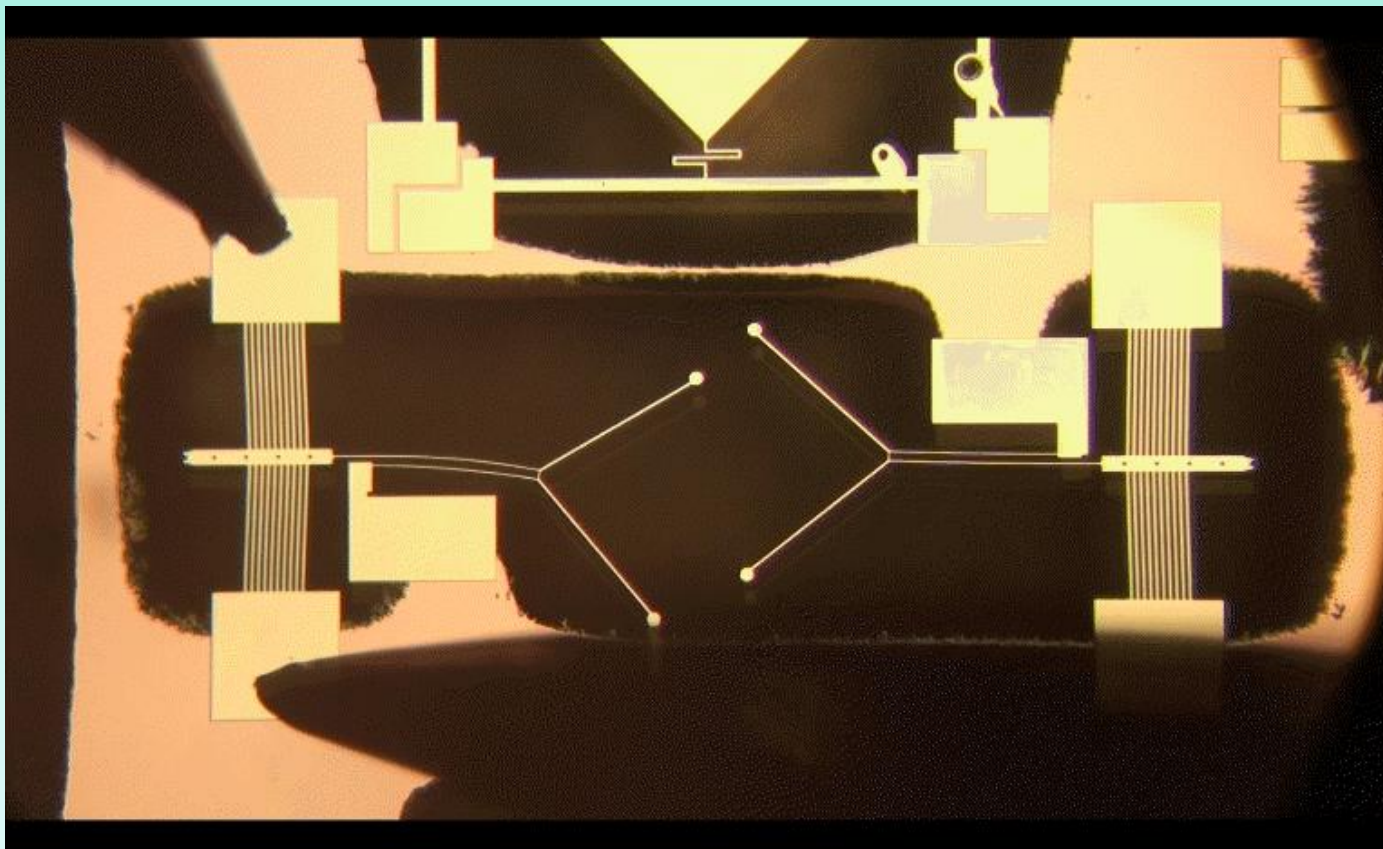
Технически университет - София  
Ние успяваме!

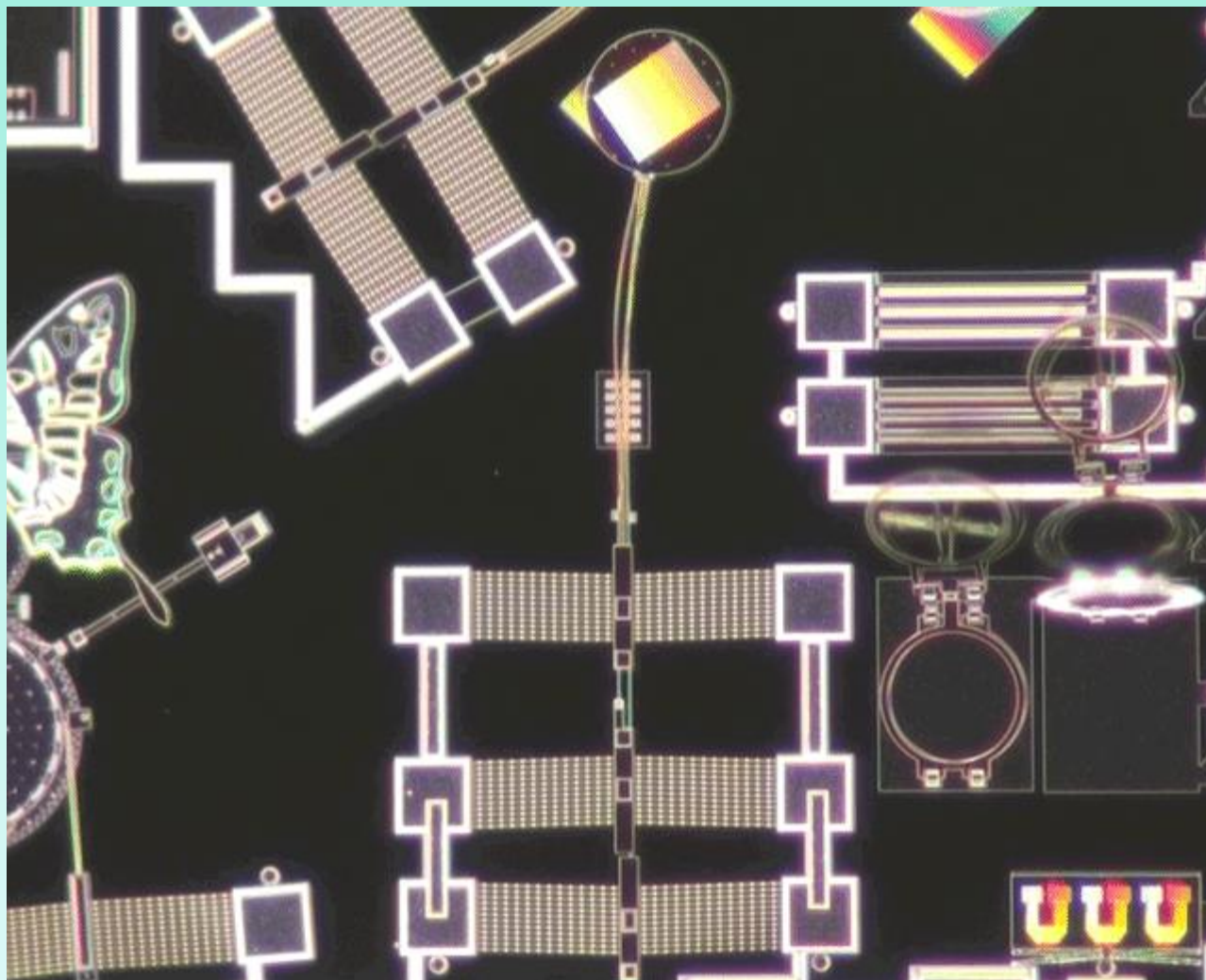


**МТФ**  
СИЛАТА НА ТЕХНОЛОГИИТЕ











Технически университет - София  
Ние **успяваме!**



**МТФ**  
СИЛАТА НА ТЕХНОЛОГИИТЕ



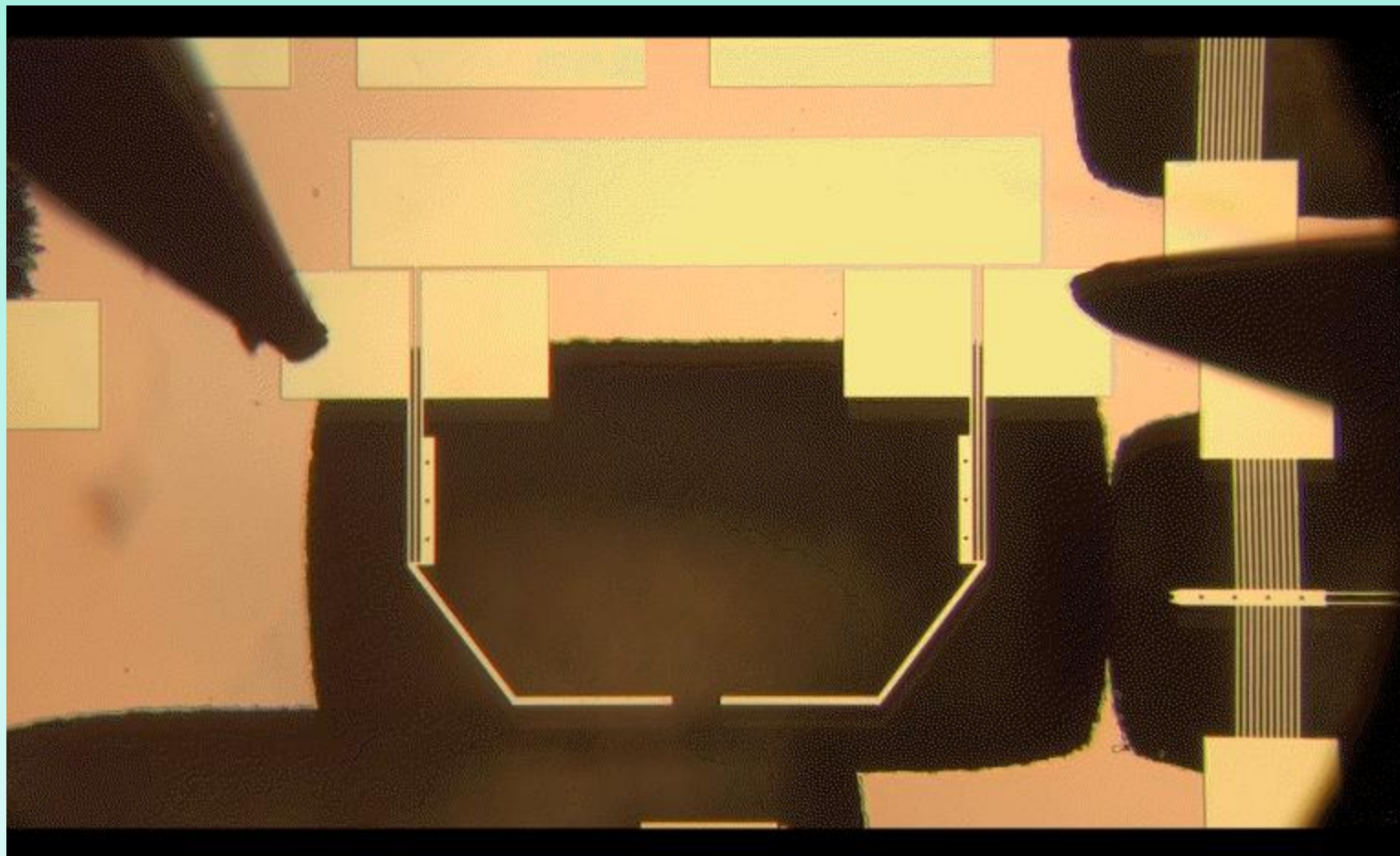




Технически университет - София  
Ние **успяваме!**



**МТФ**  
СИЛАТА НА ТЕХНОЛОГИИТЕ

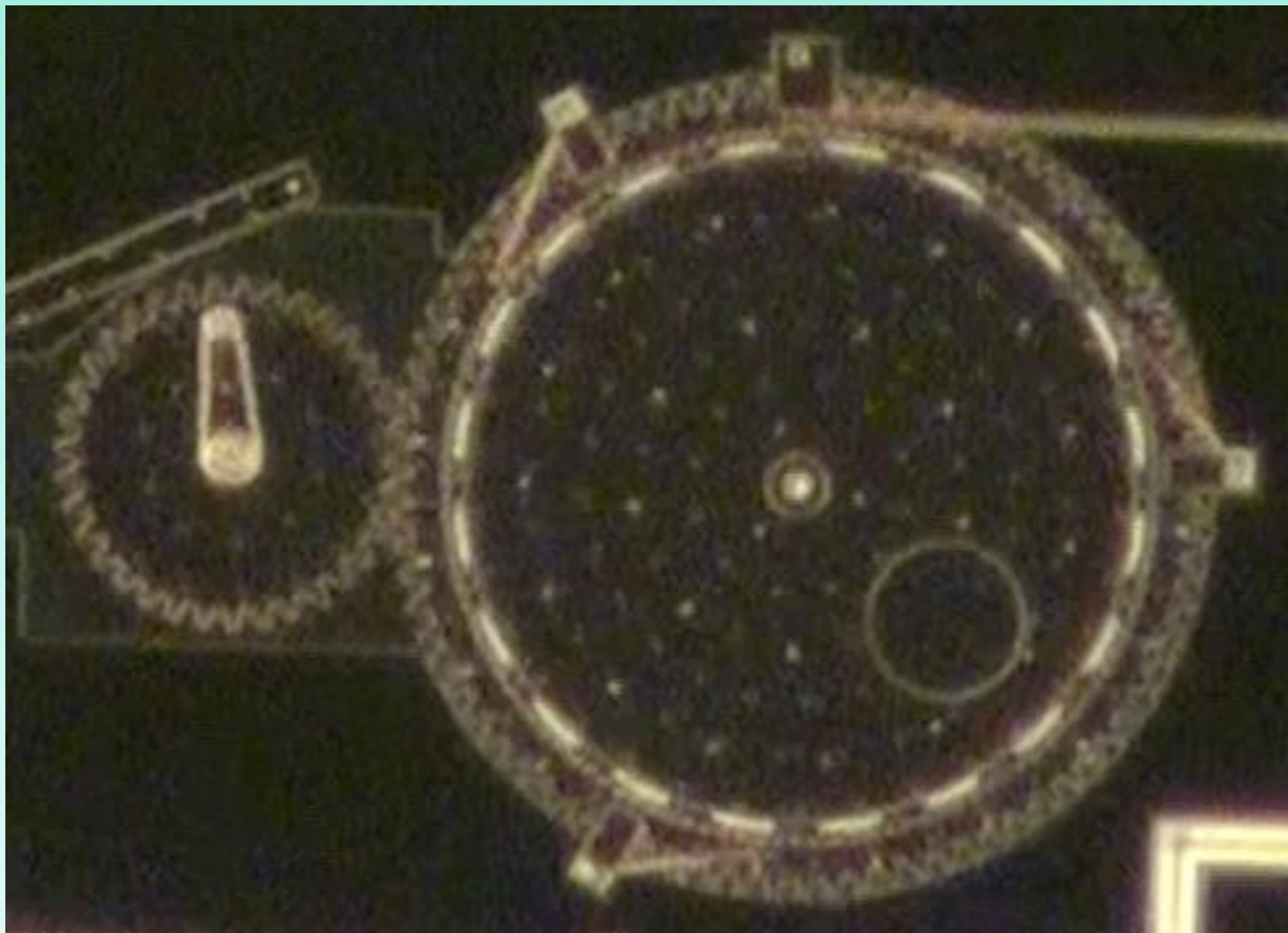


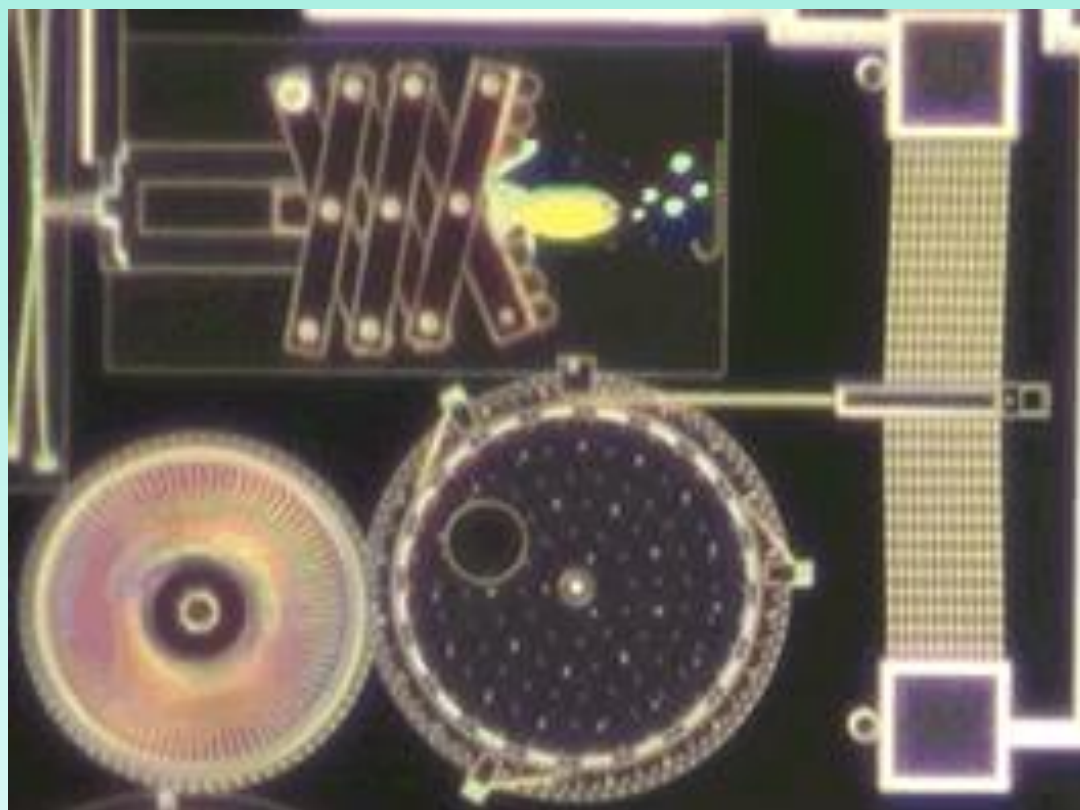
$V_{act} = 0V$

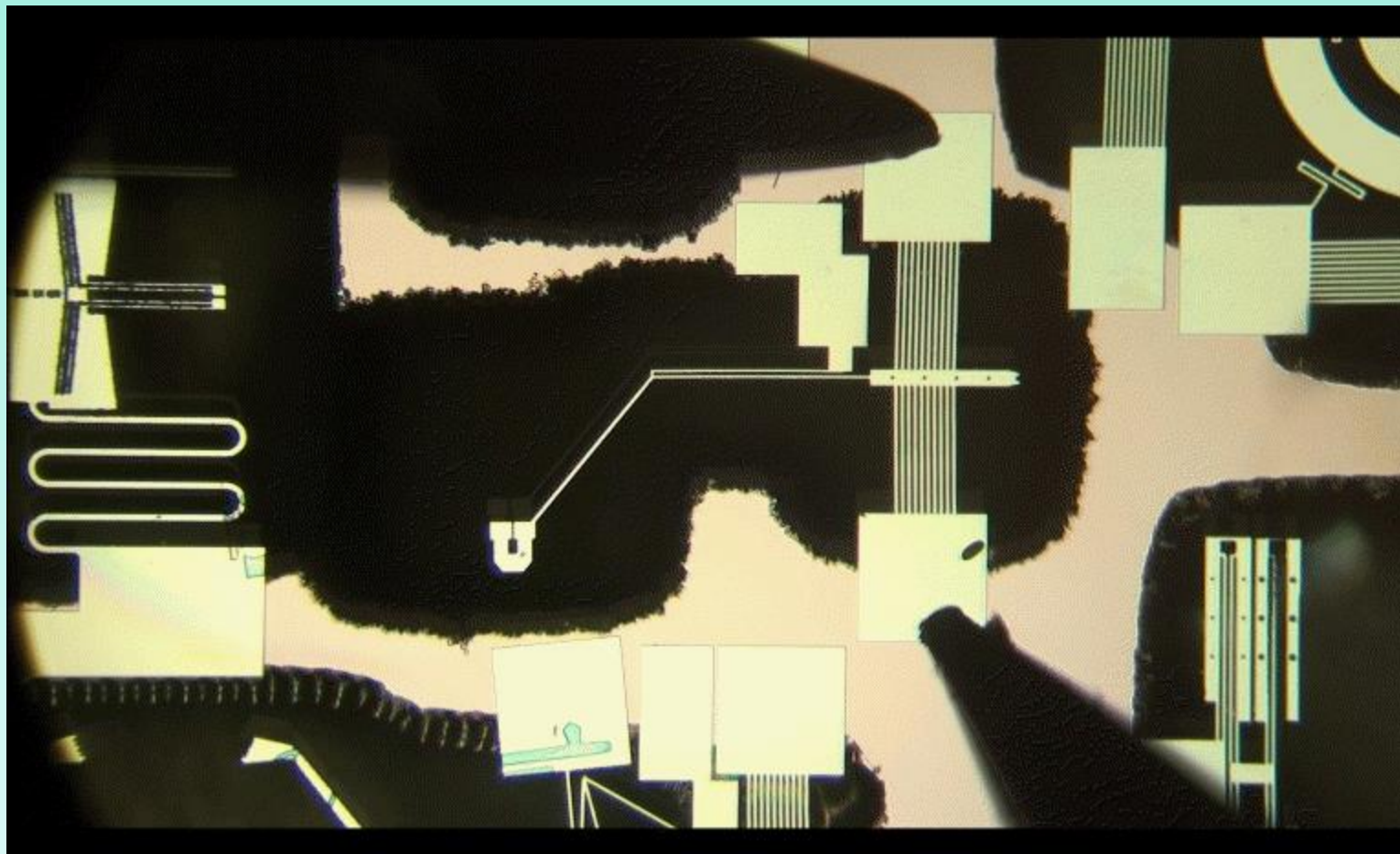
$l = 2.856\mu m$   
 $d_l = 0.0nm$

400nm

This is a scanning electron microscope (SEM) image of a nanowire. The nanowire is a thin, horizontal line extending across the center of the frame. It is connected to larger, more complex structures on both the left and right sides, which appear to be electrodes or contact pads. The background is dark, and the nanowire and its connections are light gray. A white horizontal line with vertical end caps is drawn across the nanowire, indicating its length. In the bottom left corner, there is a white scale bar labeled '400nm'. At the top of the image, there is a light blue header with some icons and text, including 'Vact = 0V', 'l = 2.856µm', and 'dl = 0.0nm'. The text 'l = 2.856µm' and 'dl = 0.0nm' is positioned above the nanowire, and the scale bar is below it.

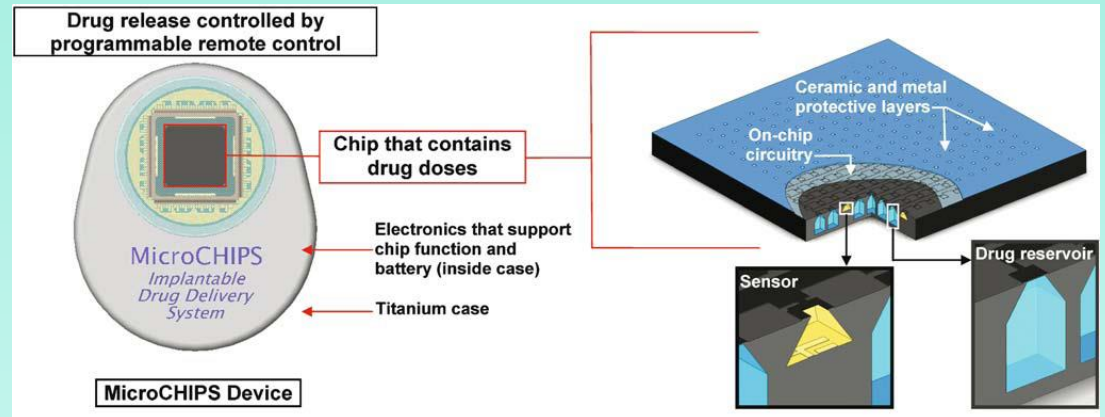




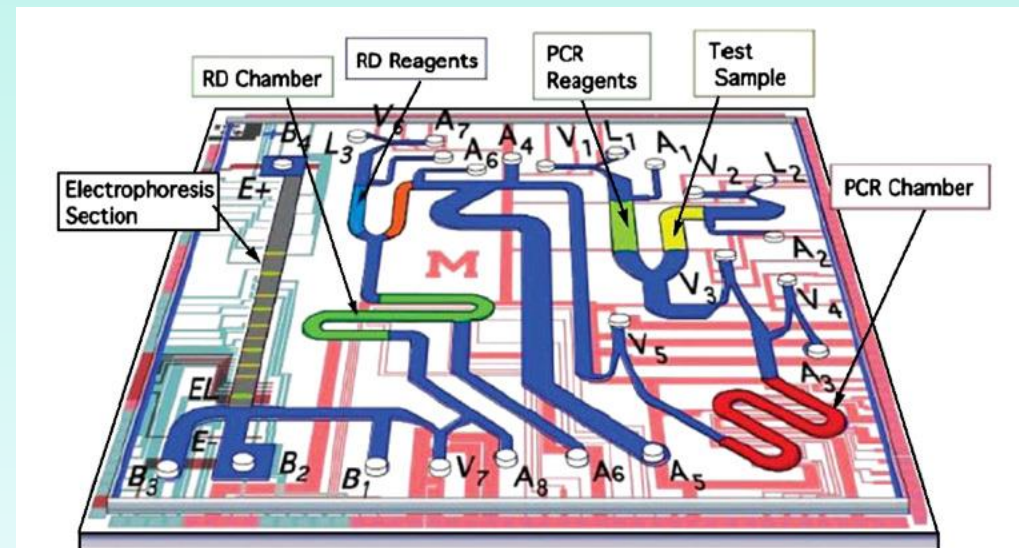


## Микропомпи

- Системи за доставка на лекарства (DDS)
  - Имплантирани
  - Подкожни
- Micro Total Analysis System ( $\mu$ -TAS)  
 “lab on a chip”



Staples M; Daniel K; Cima M; Langer R. *Pharmaceutical Research* **2006**, 23, 847-863



Zhang C; Xing D; Li Y. *Biotechnology Advances* **2007**, 25, 483-514



**Задача:** Греда с дължина 100- $\mu\text{m}$  е закрепена в двата си края неподвижно към основата. Температурата на греда се е повишила с 300°C. Гредата е 2.5  $\mu\text{m}$  дебела и 4  $\mu\text{m}$  широка и е изработена от полисилиций (приемете  $E = 160 \text{ GPa}$  и  $\alpha_T = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ). (a) Пресметнете относителното удължение и нормалното напрежение в гредата. (b) изчислете силата и преместването предизвикано в гредата. (c) възможно ли е гредата да се изкълчи?

**Решение:**

$$\begin{aligned} \text{(a) } \varepsilon &= \alpha_T \Delta T = (2,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}) (300^\circ\text{C}) = 750 \text{ } \mu\text{-strain} \\ \sigma &= E \alpha_T \Delta T = (1,6 \times 10^{11} \text{ Pa}) (2,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}) (300^\circ\text{C}) = 120 \times 10^6 \text{ Pa} \\ F &= A E \alpha_T \Delta T \\ &= (2,5 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m})(4 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m})(1,6 \times 10^{11} \text{ Pa}) (2,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}) (300^\circ\text{C}) \\ &= 1200 \text{ } \mu\text{N} \\ \Delta L &= L \varepsilon = (100 \text{ } \mu\text{m}) (0,000750) = 0,075 \text{ } \mu\text{m} \\ I &= w t^3/12 = (4 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}) (2,5 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m})^3/12 = 5,21 \times 10^{-24} \text{ } \mu\text{m}^4 \\ F_{cr} &= C \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I / L^2 = 1,2 \cdot \pi^2 \cdot (1,6 \times 10^{11} \text{ Pa}) \cdot (5,21 \times 10^{-24} \text{ } \mu\text{m}^4) / \\ &\quad (100 \times 10^6 \text{ } \mu\text{m})^2 = 987 \text{ } \mu\text{N} \text{ Гредата се изкълчва!} \end{aligned}$$



## ЛИТЕРАТУРА

- Allen, J., Micro electro mechanical system design, Taylor & Francis Group, LLC, 2005.
- Gianchandani Y. B., Tabata O., Zappe H P, Comprehensive microsystems, Vol. 2, Elsevier, 2008, pp. 6-100.
- Кисъов И. Д., Съпротивление на материалите, V изд. Д.И. „Техника”, 1978.
- Тимошенко С. П., Сопротивление материалов, т. 2., М., Наука, 1965.
- Lott C. D., McLain T. W., Harb J. N., Howell L. L., Modeling the thermal behavior of a surface micromachining linear displacement thermomechanical microactuators, Sensors Actuators, Vol. 101, pp. 239-250.
- Guckel H, Klein J, Christenson T, Skrobis K, Laudon M, Lovell E G, Thermomagnetic flexure actuator Tech. Dig. Solid State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, SC, USA, 1992, pp. 73–5.
- Pan C S, Hsu W., An electro-thermally and laterally driven polysilicon microactuator. J. Micromech. Microeng., Vol. 7, 1997, pp. 7-13.
- Burns D M, Bright V. M., Design and performance of a double hot arm polysilicon thermal actuator, PI SPIE, Vol. 3224, . 1997, pp. 296—306.
- <http://www.swri.org/4org/d10/bioeng/bioeng/mems.htm>.
- U.S. Patent No. 6,607,714.
- Luo J. K., Zhu Y., Fu Y. Q., Flewitt A. J., Spearing S. M., Miao J. M., Milne W. I., Development of thermal actuators with multi-locking positions, *J. Phys.: Conf. Ser.* 34 2006 p.794.
- Miller V., Conceptual mems devices for a redeployable antenna, MSc Thesis, Air Force Institute of Technology, 2007, pp. 12-33.



## ЛИТЕРАТУРА

- Comtois, J. H. Bright V. M., Applications for Surface-Micromachined Polysilicon Thermal Actuators and Arrays, *Sensors and Actuators*, vol. 58, 1997, pp19-25.
- Baker, M.S., Plass, R.A., Headley, T.J. and Walraven, J.A., "Final Report: Compliant Thermo-Mechanical MEMS Actuators LDRD #52553," *Sandia Report SAND2004-6635*, printed December 2004.
- Que L., Park J., Gianchandani Y., Bent-beam electro-thermal actuators for high force applications, *Proc. IEEE MEMS '99*, , 1999. pp. 31–36.
- Shannon Zelinski Design of Vertical-Lateral Thermal Actuators for MEMS, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.133.3255>, 2001.
- Nilesh D Mankame and G K Ananthasuresh, Comprehensive thermal modelling and characterization of an electro-thermal-compliant microactuator, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 11, 2001, pp. 452-463.
- Henry Helvajian Microengineering Aerospace Systems, Bright V. M. Surface micromachined optical devices, The Aerospace Corporation, 1999, pp. 485-504.
- R. L.Clark, J. R. Karpinsky, J. A. Hammer, R. Anderson, R. Lindsey, D. Brown, and P. Merrit, Micro-Opto-Electro-Mechanical, (MOEM), Adaptive Optic System, *Proceedings SPIE*, Vol. 3008, 1997, pp. 12-24.
- Hoffmann, Martin: MEMS/NEMS handbook - techniques and applications / Cornelius T. Leondes (Editor), Springer Verlag, Vol. 5: Medical applications and MOEMS, 2006, p.238.
- Lobontiu N., Garcia E., *Mechanics of Microelectromechanical Systems* Springer Science + Business Media, Inc., 2005, pp. 186-192.
- Jha A.R., MEMS and nanotechnology-based sensors and devices for communications, medical and aerospace applications, Taylor & Francis Group, LLC, 2008, pp. 133-140.



## ЛИТЕРАТУРА

- Chu L, Hetrick J, Gianchandani Y B, High amplification compliant microtransmissions for rectilinear electrothermal actuators, *Sens. Actuators, A* 97–98, 2002, pp. 776–783.
- Udeshi K, Gianchandani Y. A., DC-powered, tunable, fully mechanical oscillator using in-plane electrothermal actuator, *Proc. IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems*, Maastricht, The Netherlands, 2004, pp. 502–505.
- Que L., Udeshi K., Park J., Gianchandani Y. B., A bi-stable electrothermal RF switch for high force applications. *Proc. IEEE Int. Conf. on Microelectromech. Systs.* Maastricht, The Netherlands, 2004, pp. 797–800.
- Baker, M S. Design and Reliability of a MEMS Thermal Rotary Actuator, *TEXMEMS IX*, Texas Tech University, Lubbock TX, September 17, 2007.
- Luo J. K., Flewitt A. J., Spearing S. M., Fleck N. A. Milne W. I., Three types of planar structure microspring electro-thermal actuators with insulating beam constraints, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, 2005, pp. 1527–1535.
- Schomburg W. K., *Introduction to Microsystem Design*, Springer-Verlag, 2011, pp. 159-177.
- Banks D., *Microengineering, MEMS, and Interfacing A Practical Guide* Taylor & Francis Group, LLC, 2006, pp. 151-160.
- Selvaganapathy P, Carlen E, Mastrangelo C. H., Electrothermally actuated inline microfluidic valve, *Sens. Actuators, A* 104, 2003, pp. 275–82.
- Roxhed N, Rydholm S, Samel B, van der Wijngaart W, Griss P, Stemme G 2004 Low cost device for precise microliter range liquid dispensing. *Tech. Dig. 17th IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems*, Maastricht, The Netherlands, pp. 326–329.
- Aden, J. S., et al., “The Third Generation HP Thermal InkJet Printhead,” *Hewlett-Packard Journal*, Vol. 45, No. 1, February 1994, pp. 41–45.



## ЛИТЕРАТУРА

- Beatty, C. C., "A Chronology of Thermal Ink-Jet Structures," Tech. Digest Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, June 3–6, 1996, pp. 200–204.
- Nadim M, Williams K., An Introduction to microelectromechanical systems engineering–2nd ed., Artech House, 2004, pp.122-150.
- Allen, R. R., J. D. Meyer, and W. R. Knight, "Thermodynamics and Hydrodynamics of Thermal Ink Jets," Hewlett-Packard Journal, Vol. 36, No. 5, May 1985, pp. 21–26.
- Askeland, R. A., W. D. Childers, and W. R. Sperry, "The Second-Generation Thermal Ink-Jet Structure," Hewlett-Packard Journal, Vol. 39, No. 4, August 1988, pp. 28–31.
- Carlen E. T., Mastrangelo C. H., Simple, high actuation power, thermally activated paraffin microactuator, Proc of Transducers'99 Conference, Sendai, Japan, June 7-10, 1999.
- Carlen E. T., Mastrangelo C. H., Paraffin actuated surface micromachined valves, Micro Electro Mechanical Systems, IEEE, 2000, pp. 381 – 385.
- Timoshenko S. P., Analysis of bi-metal thermostats, Journal of the Optical Society of America, Vol. 11, Issue 3, 1925, pp. 233-255.
- Lim J. H., Han M. H., Lee J., Earmme Y. Y., Lee S., Im S., A study on the thermomechanical behavior of semiconductor chips on thin silicon substrate, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol., 22, 2008, pp. 1483-1489.
- Stavrov V, Tomerov E, Hardalov C., Danchev D., Kostadinov K., Stavreva G, Apostolov E., Shulev A., Andonova A., Al-Wahab M., Low Voltage Thermo-mechanically Driven Monolithic Microgripper with Piezoresistive Feedback, Precision Assembly Technologies and Systems IFIP Advances in Information and Communication Technology ,Vol. 315, 2010, pp 207-214.



## ЛИТЕРАТУРА

- Chronis N., Lee L. P., Electrothermally Activated SU-8 Microgripper for Single Cell Manipulation in Solution, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 14, 2005. pp. 857 – 863.
- Fantner G. E., Schumann W., Barbero R. J., Deutschinger A., Todorov V., Gray D. S., Belcher A. M., Rangelow I. W. Youcef-Toumi K., Use of self-actuating and self-sensing cantilevers for imaging biological samples in fluid Nanotechnology Vol. 20, 2009, 434003 (10pp).
- Daraktchiev I. S., Stavrov V. T., High-precision integrated semiconductor piezoresistive detector devices and methods using the same, US Patent number: 6457360, 2002.
- Stavrov V., Sensors for scanning probe microscopy, method for three-dimensional measurement and method for manufacturing such sensors, Patent BG2010/000016, 2011.



Технически университет - София  
Ние **успяваме!**



**МТФ**  
СИЛАТА НА ТЕХНОЛОГИИТЕ

**Благодаря за вниманието!**