



# 7.0 ТЕНЗОРЕЗИСТИВНО И ПИЕЗОРЕЗИСТИВНО ПРЕОБРАЗУВАНЕ В МЕМС

Проф. д-р Тодор Тодоров

ТУ-София

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

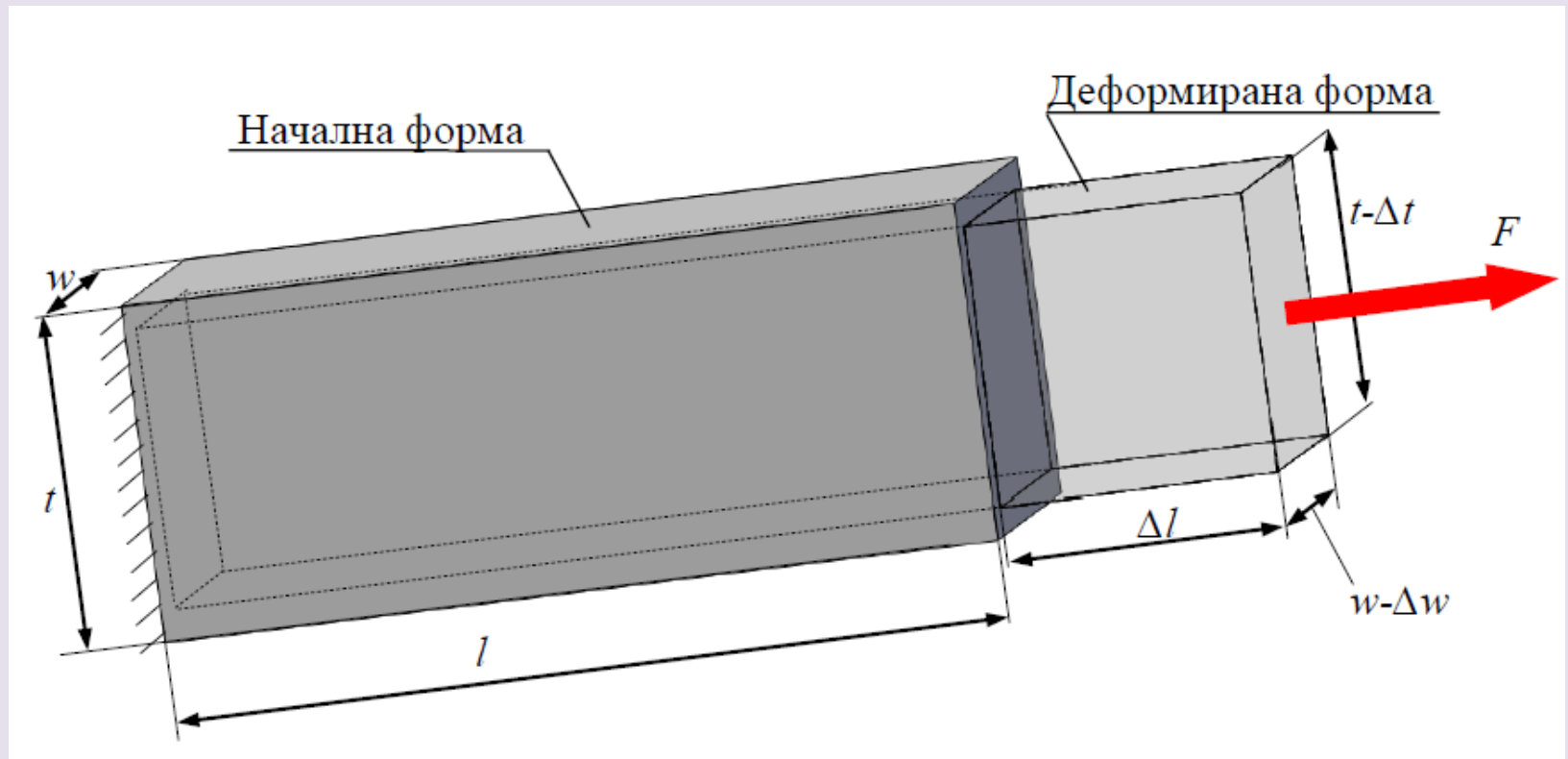
# Съдържание

- **Основни понятия и зависимости**
- **Конструкция и приложение на тензорезистори**
- **Теория на пиезорезистивните сензори**
- **Приложение на пиезорезистори в MEMS сензори за налягане, ускорение и нано сонди**

# Основни понятия и зависимости

Тензосъпротивителния (тензорезистивния) ефект е характерен за различни материали, притежаващи свойството да **променят електрическото си съпротивление след прилагане на механично напрежение**. Ефектът е отрит от Lord Kelvin през 1856 г. Чувствителността на тензосъпротивлението се определя чрез тензорезисторен коефициент

$$GF = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon}$$



$$R = \frac{\rho l}{A}$$

$$R = \frac{\rho l}{wt}$$

$$dR = \frac{l}{wt} d\rho + \frac{\rho}{wt} dl - \frac{\rho l}{w^2 t} dw - \frac{\rho l}{wt^2} dt$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dw}{w} - \frac{dt}{t}$$

$$\frac{dw}{w} = \varepsilon_w = -\nu \varepsilon_l \quad \text{and} \quad \frac{dt}{t} = \varepsilon_t = -\nu \varepsilon_l$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon_l + \nu\varepsilon_l + \nu\varepsilon_l$$

$$GF = \frac{dR/R}{\varepsilon_l} = \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_l} + (1 + 2\nu)$$

$((d\rho/\rho)/\varepsilon_l)$  - **пиезорезистивен ефект** силно изразен при полупроводниците

$1 + 2\nu$  - геометричен ефект, доминиращ при металите

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi\sigma = \pi E\varepsilon_l \Rightarrow GF = (1 + 2\nu + \pi E)\varepsilon_l$$

$\pi$  – коефициент на пиезорезистивност, пренебрежимо малък за метали за разлика от полупроводниците

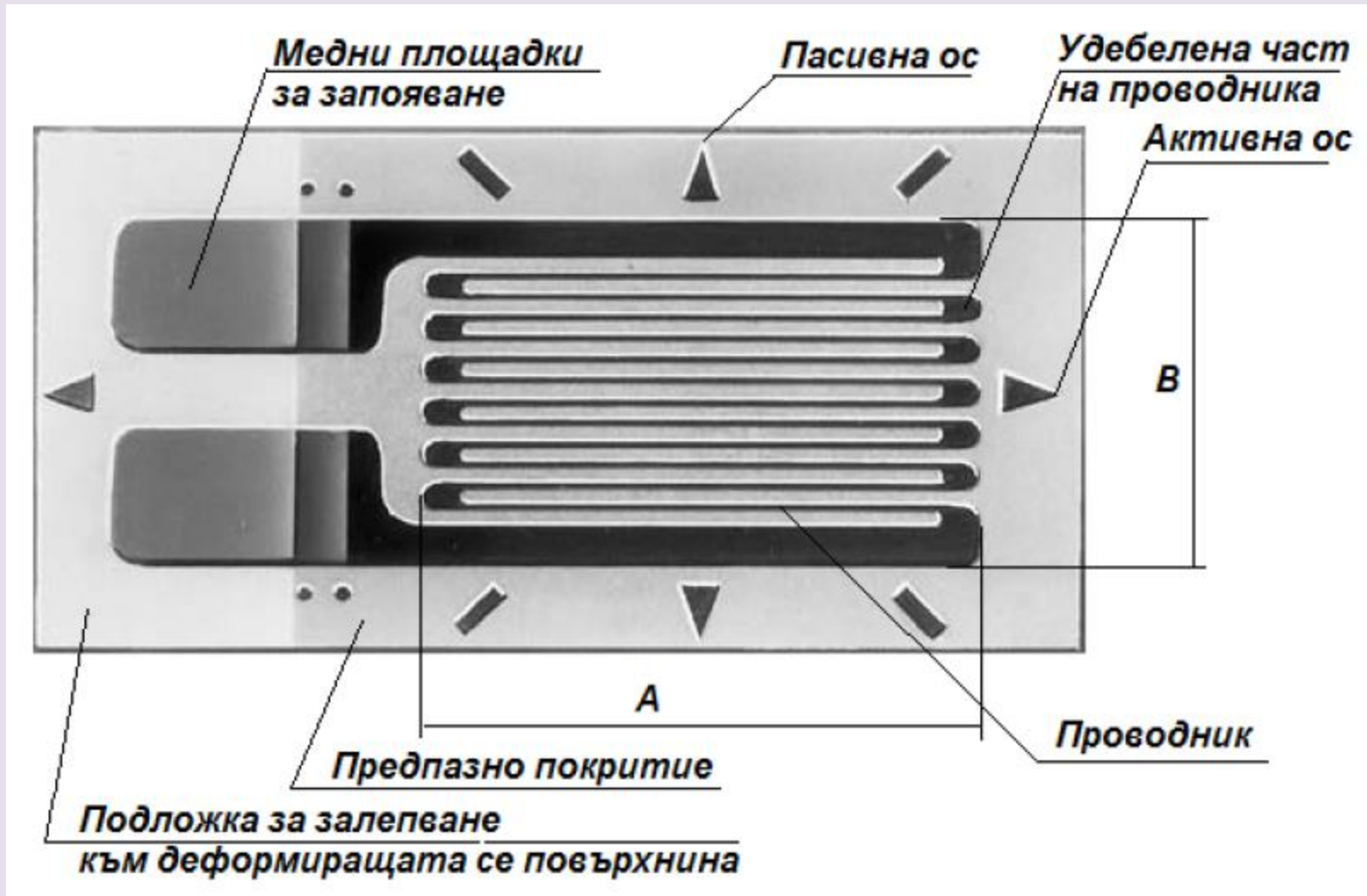
$$\nu = 0,2..0,5 \Rightarrow (1 + 2\nu) = 1,4..2$$

Ако преобладава пиезорезистивният ефект – **пиезорезистори**  
При по-изявен геометричен ефект - **тензорезистори**

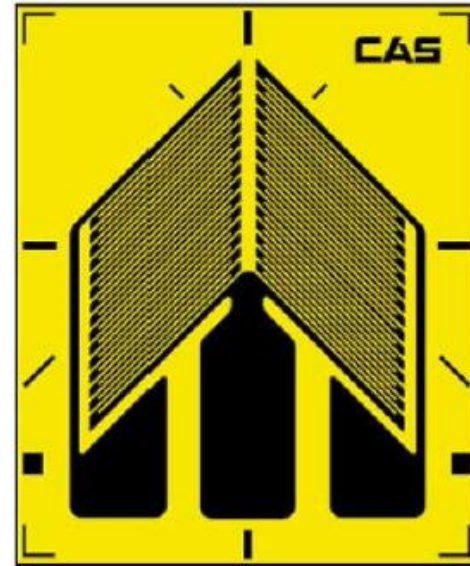
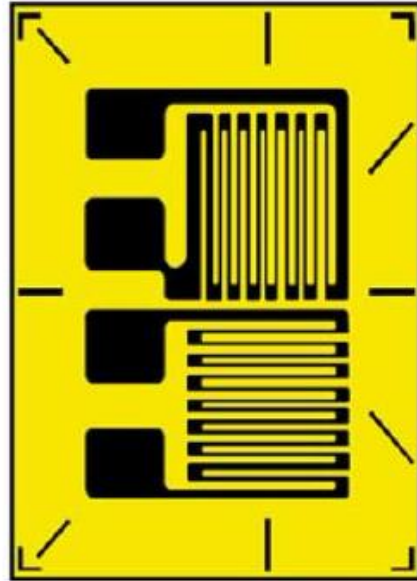
## **Коефициент на тензосъпротивление**

Материал	GF
Метален тензорезистор	2–5
Тънък метален филм	2
Кристален силиций	-125 to +200
Полисилиций	±30
Тънък резистивен филм	10

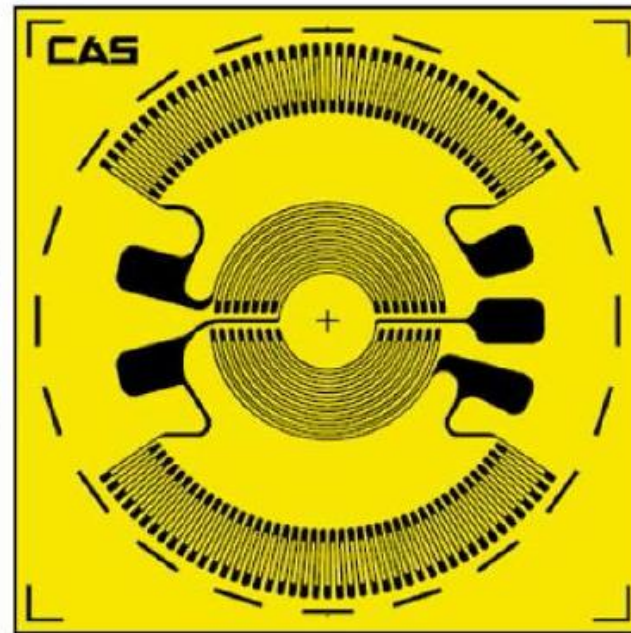
# Конструкция и приложение на тензорезистори



# Конструкция и приложение на тензорезистори



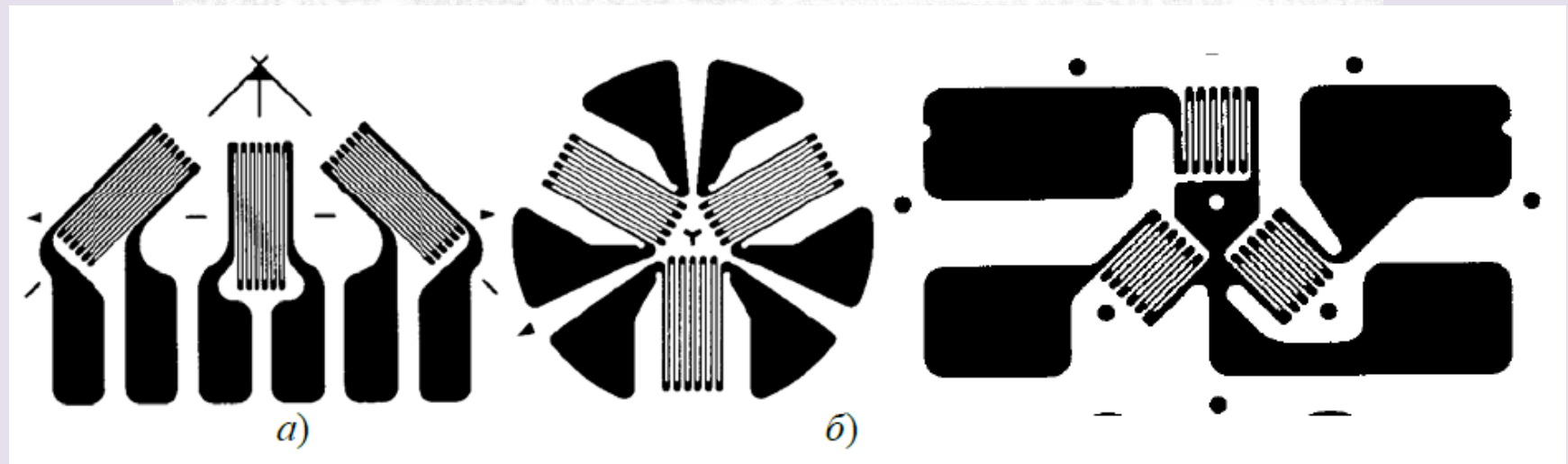
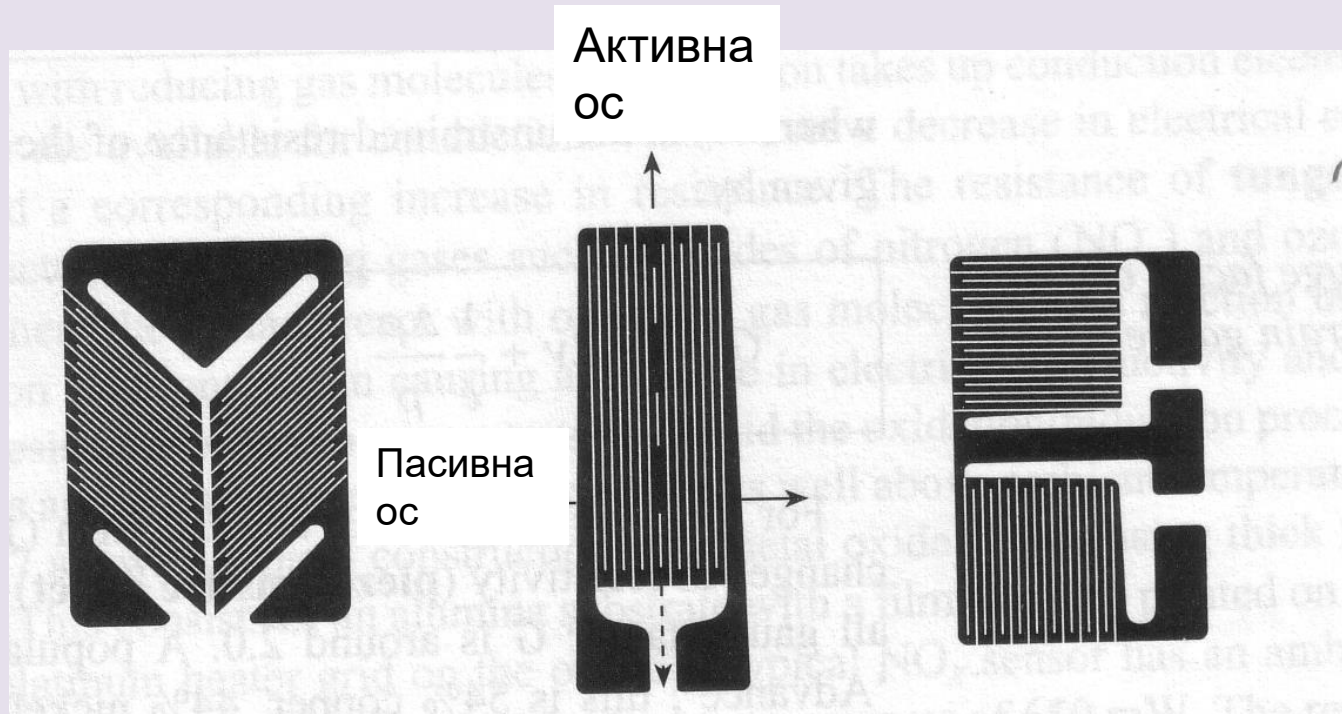
б)



в)



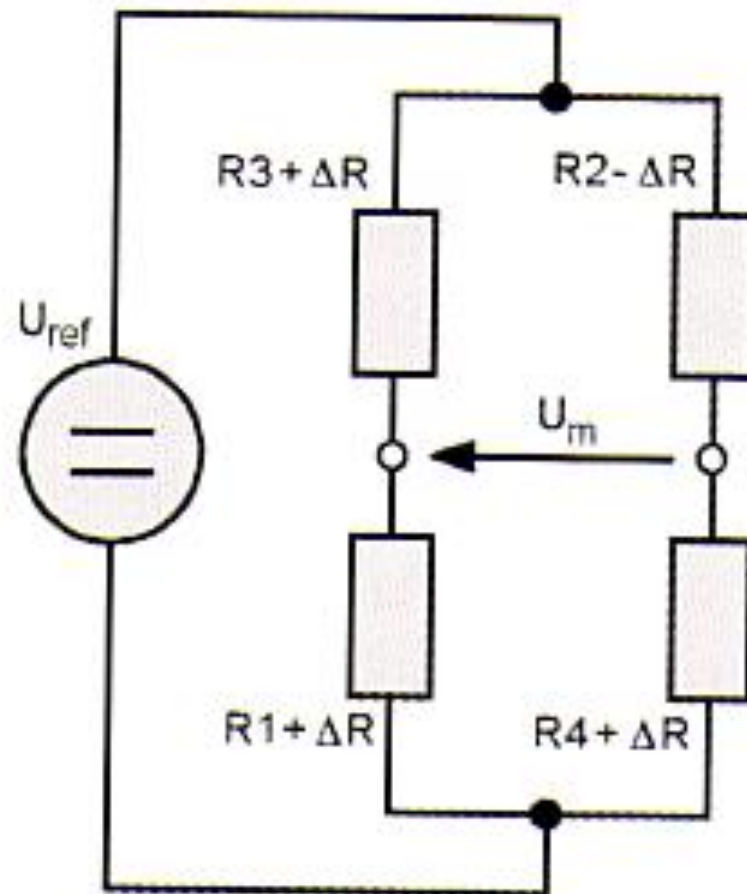
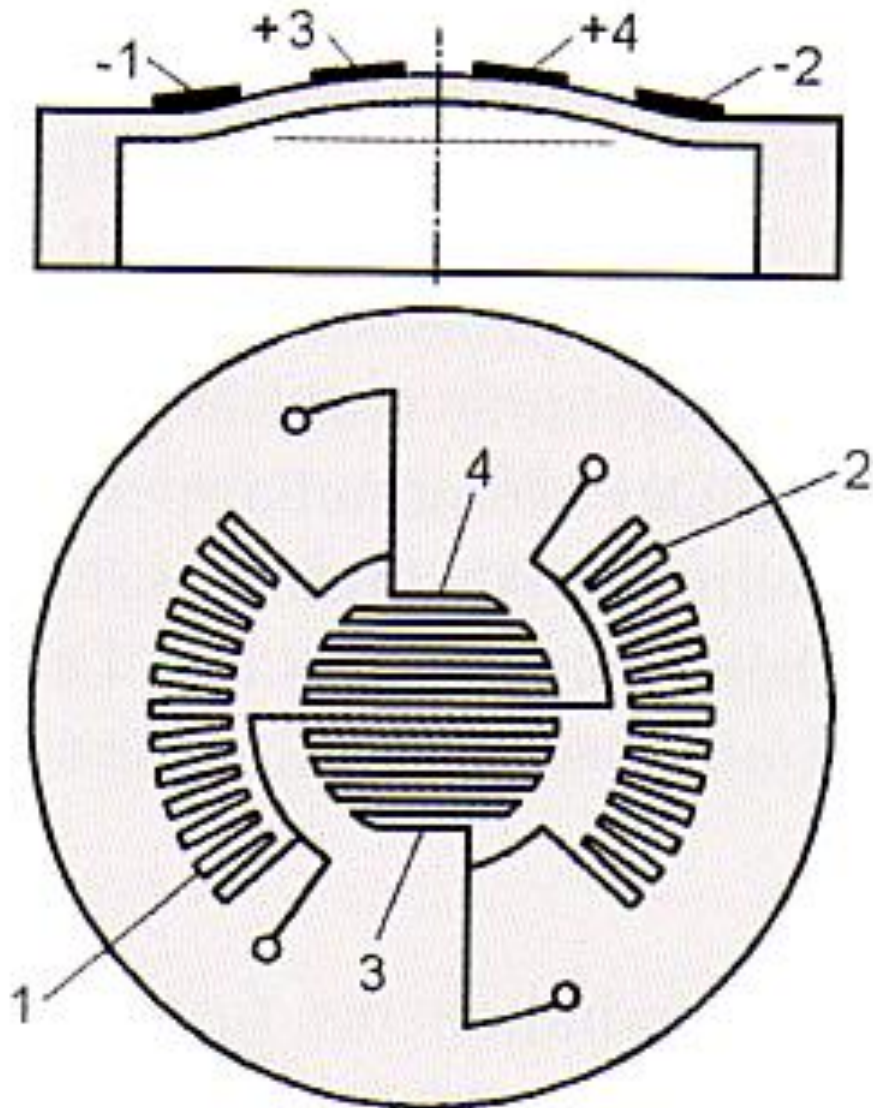
# Конструкция и приложение на тензорезистори



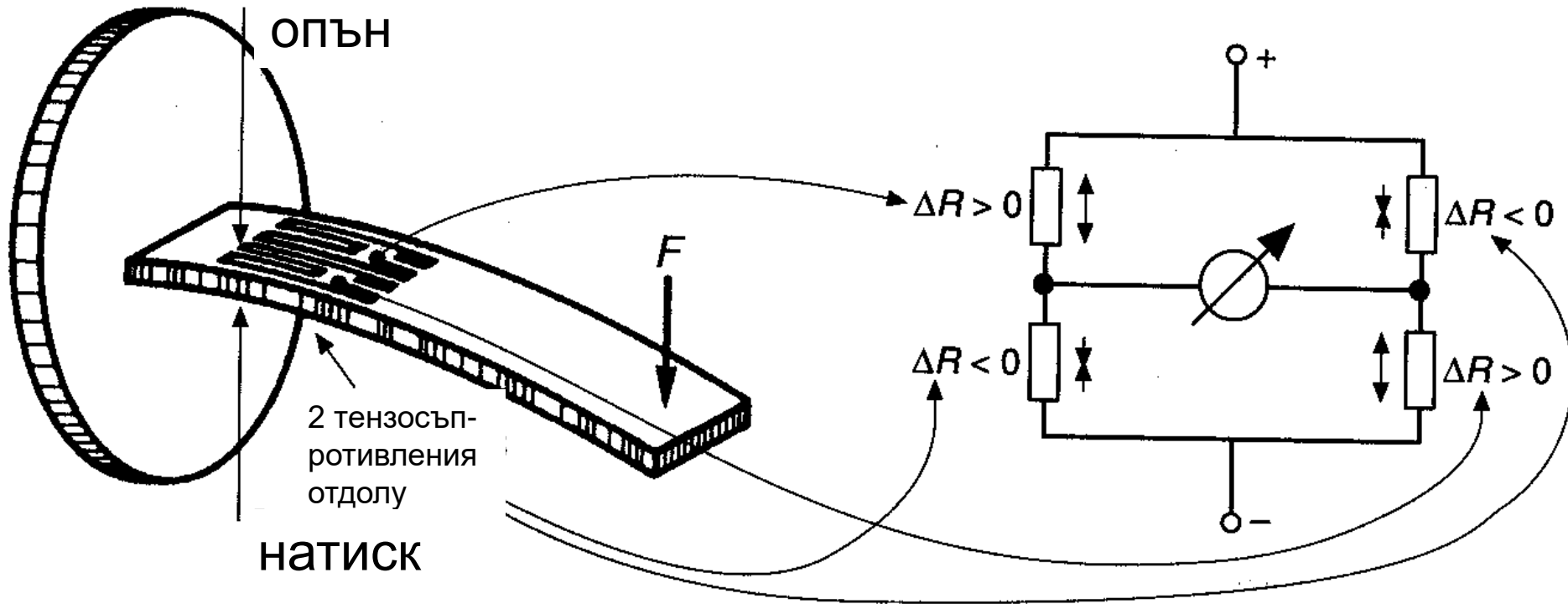
Тензосъпротивления изработени от тънко метално фолио (меандрови резистори)

# ИЗМЕРВАНЕ НА ДЕФОРМАЦИЯ НА МЕМБРАНА С МЕАНДРОВИ РЕЗИСТОРИ

1,2 –натиск 3,4 опън



# Схема за измерване на напрежение на огъване с Уитстонов мост



## Предимства и недостатъци на схемата:

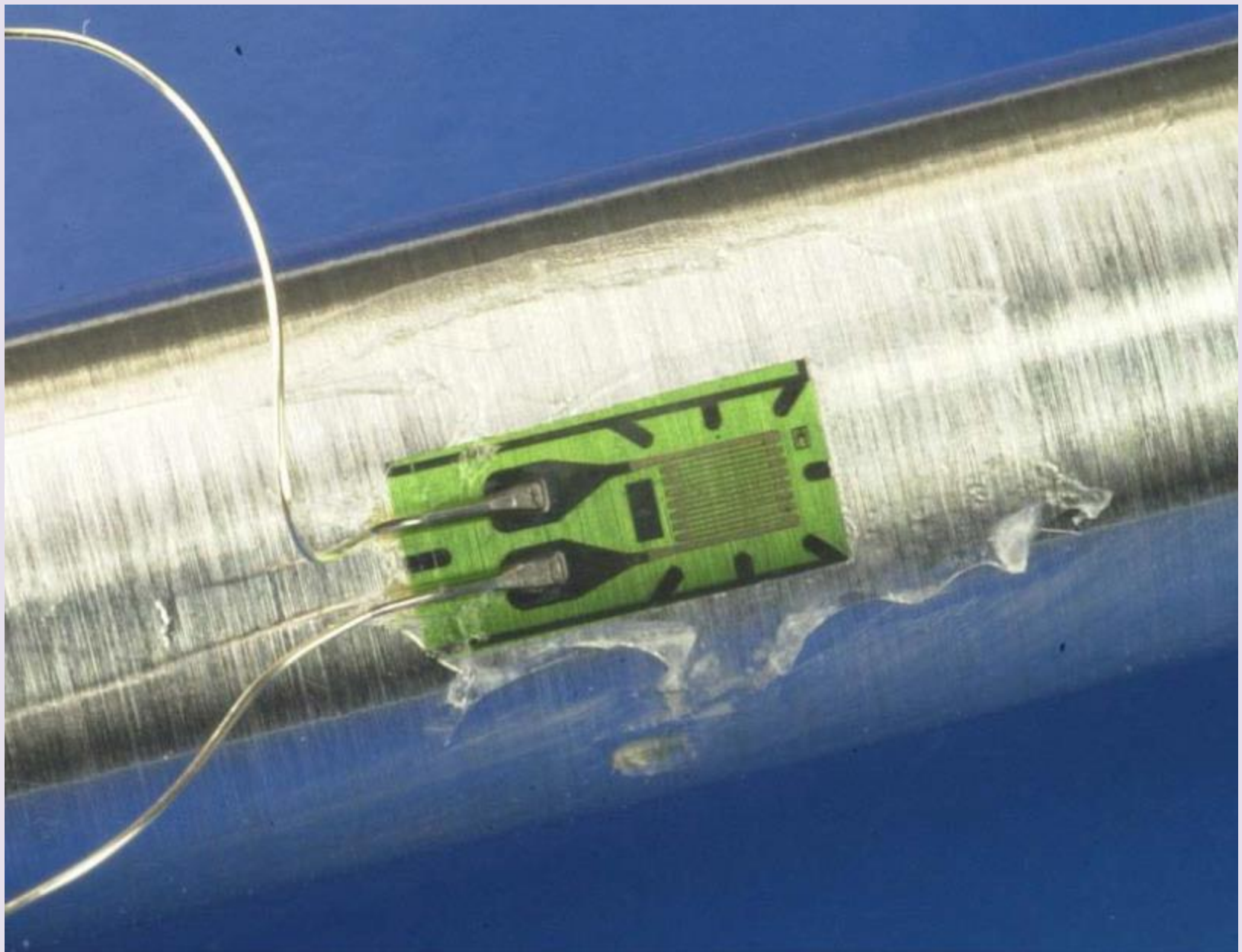
Добра резолюция -  $1:10^{-6}$  1 kg се измерва през 1 mg

Евтина, лесна употреба, различни приложения

$GF = 2$  – много ниско ниво на сигналите

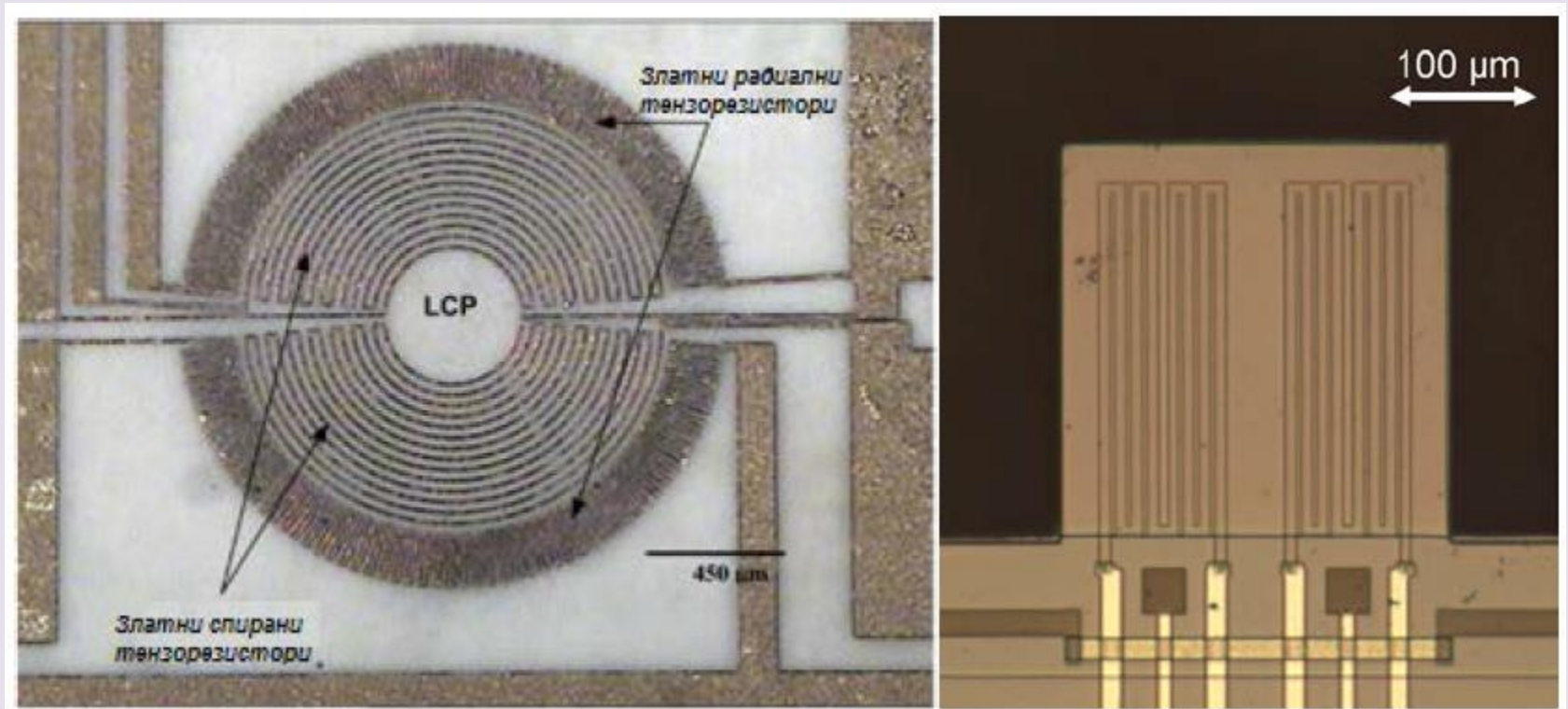
Меандровите резистори не позволяват локални измервания

# Конструкция и приложение на тензорезистори



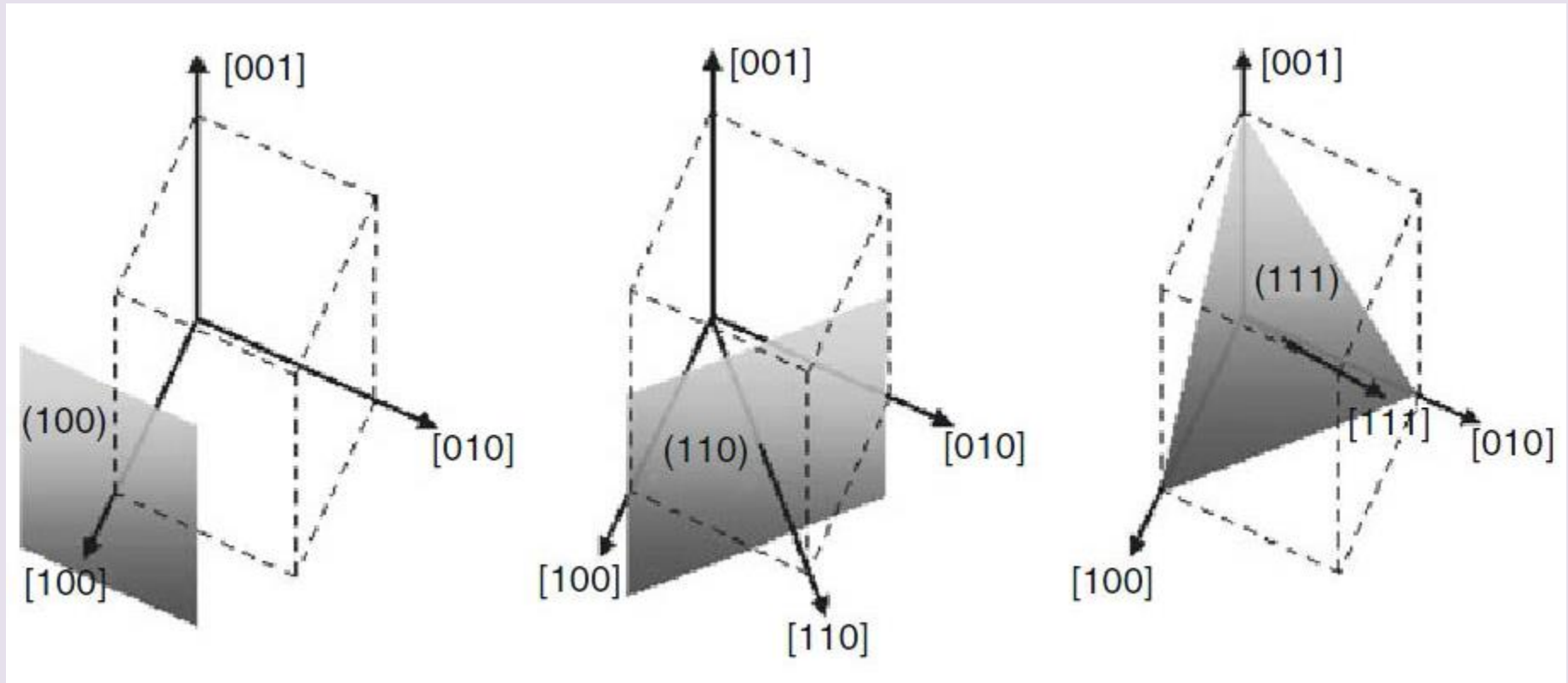


# Конструкция и приложение на тензорезистори



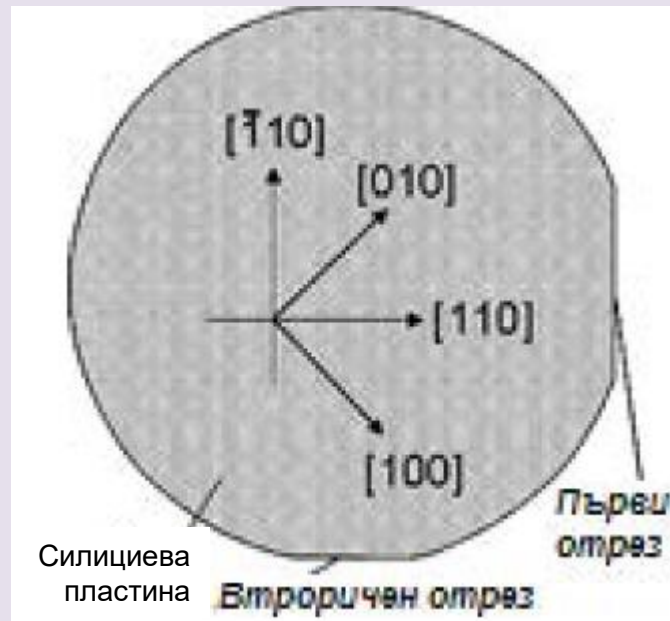
Меандрови пиезорезистивни резистори в MEMS: а) за измерване деформации на мембрана [14]; б) за анализ на химични или биологични разтвори [15].

# Теория на пьезорезистивните сензори



Ориентация на равнините в кубична кристална решетка по Милър [16]

# Теория на пиезорезистивните сензори



Направления върху повърхнината на (100) силициева пластина [16].

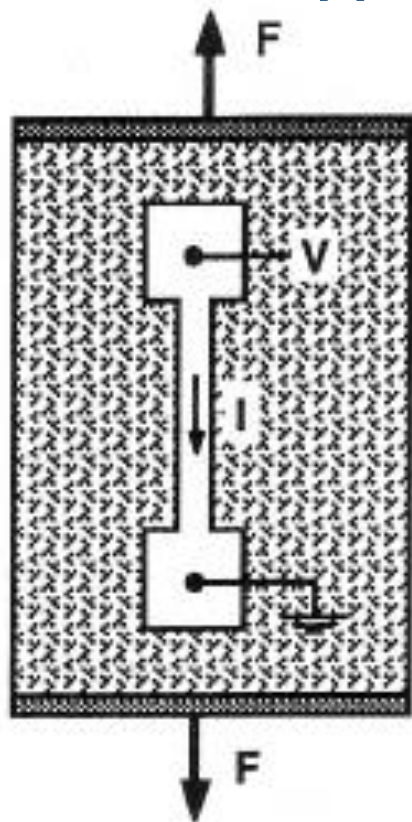
**(S. C. Smith, 1954)** Промяната на съпротивлението на опъната силициева или германиева нишка е много по-голямо от това на металните тензорезистори. Смит открива, че промяната на съпротивлението при полупроводниците се дължи предимно на изменението на съпротивлението на материала, а не на промяната на геометричните размери. Този ефект е наречен **пиезорезистивен**. Въпреки, че привидно ефектът е почти еднакъв на тензорезисторния при металите, той има някои съществени разлики като:

(a) Ефектът на металните тензосъпротивления е следствие на геометричната деформация, докато пиезорезистивността се дължи на **промяната на съпротивлението на материала**. В резултат на това ефектът на пиезорезистивността може да даде с два порядъка по-голямо изменение на съпротивлението в сравнение с това на тензорезистивния ефект при същите условия.

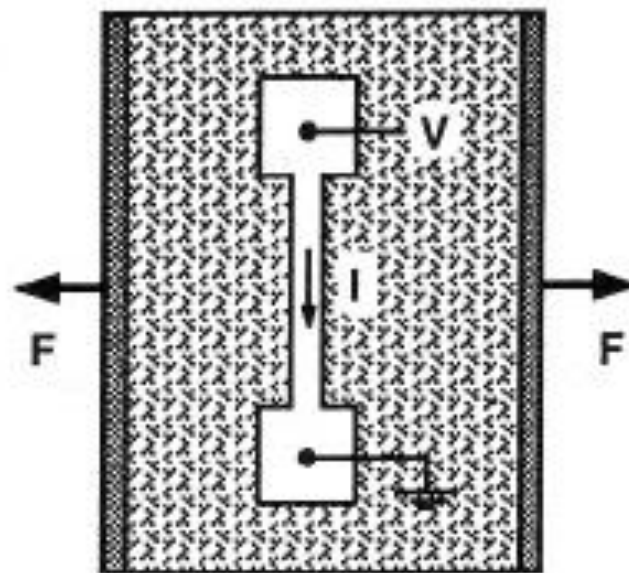
(b) Ефектът на металните тензосъпротивления е изотропен, докато **ефектът пиезорезистивност е обикновено анизотропен**. Това означава, че връзката между деформацията и съпротивлението се изразява математически чрез тензорни уравнения.



# ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ПИЕЗОРЕЗИСТОРИ



надлъжен  
пиезорезистивен  
коэффициент



напречен  
пиезорезистивен  
коэффициент

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t$$

За направление [110] и температура 25°

$$\begin{aligned} \text{n-type: } \pi_l &= -31.2 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1} & \pi_t &= -17.6 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1} \\ \text{p-type: } \pi_l &= 71.8 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1} & \pi_t &= -66.2 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1} \end{aligned}$$

## ОБЩО УРАВНЕНИЕ НА ПИЕЗОРЕЗИСТИВНИЯ ЕФЕКТ В ПОЛУПРОВОДНИЦИТЕ

Относително  
съпротивление

Пиезорезистивен тензор

4-ти ранк

Плътност на  
електрическия  
ток

$$\underline{E} = (\underline{\rho} + \underline{\Pi} \underline{\sigma}) \underline{J}$$

Електрическо  
поле

Тензор на  
напреженията 2-ри  
ранк

# Закон на Ом за анизотропните материали

$$\begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} & \rho_{zx} \\ \rho_{xy} & \rho_{yy} & \rho_{yz} \\ \rho_{zx} & \rho_{yz} & \rho_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{Bmatrix}$$

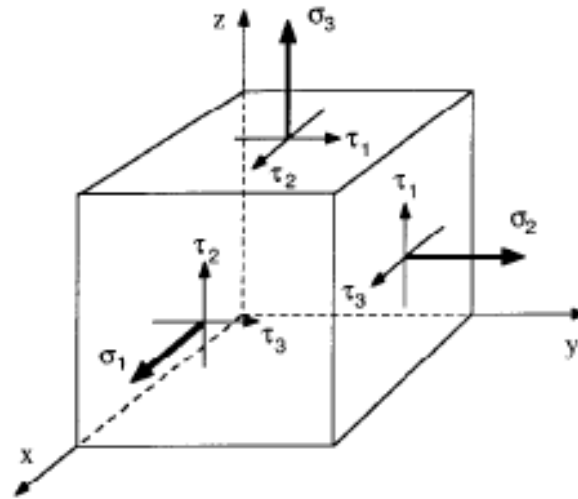


Съпротивлението се влияе от напрежението  $\rho = \rho_{no\ stress} + \Delta\rho(\sigma, \tau)$

За кубични кристали  
**(Si, Ge)**

$$\frac{1}{\rho} \begin{Bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \Delta\rho_3 \\ \Delta\rho_4 \\ \Delta\rho_5 \\ \Delta\rho_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{Bmatrix}$$

## Пиезорезистивност в силиций



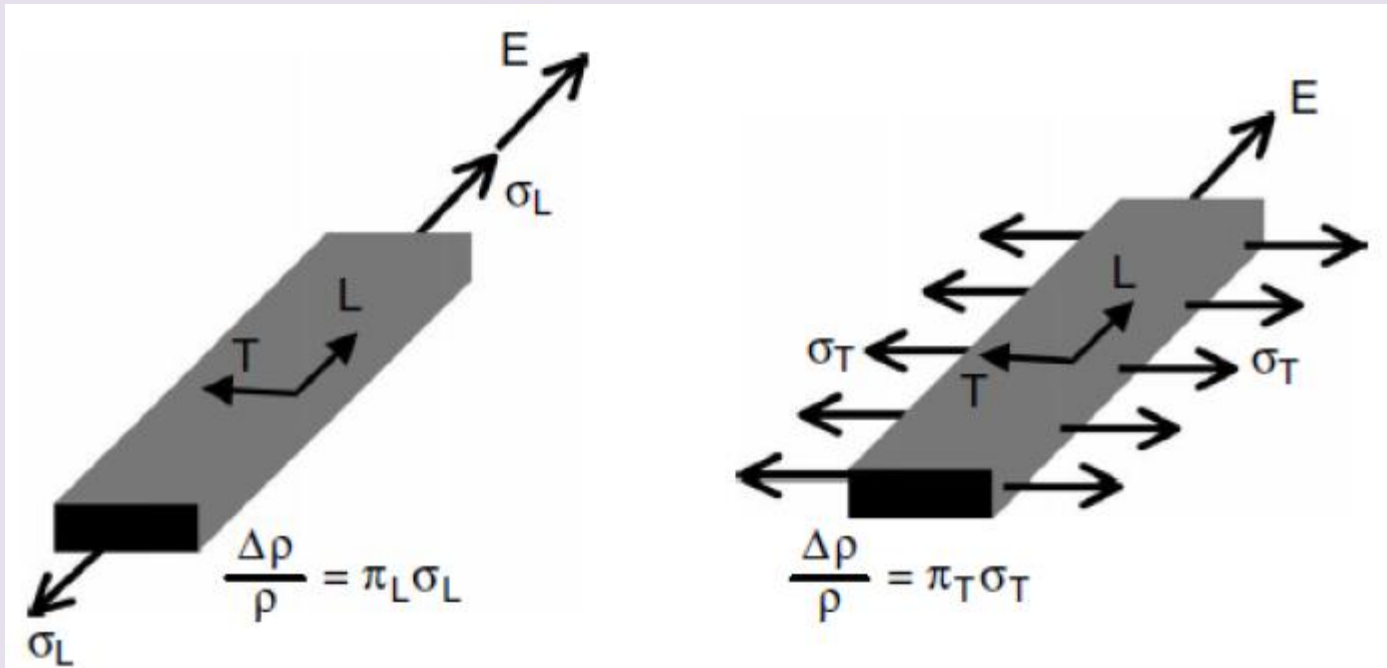
$$E_1 = \rho \cdot i_1 + \rho \pi_{11} \sigma_1 \cdot i_1 + \rho \pi_{12} (\sigma_2 + \sigma_3) \cdot i_1 + \rho \pi_{44} (i_2 \tau_3 + i_3 \tau_2)$$

$$E_2 = \rho \cdot i_2 + \rho \pi_{11} \sigma_2 \cdot i_2 + \rho \pi_{12} (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot i_2 + \rho \pi_{44} (i_1 \tau_3 + i_3 \tau_1)$$

$$E_3 = \rho \cdot i_3 + \rho \pi_{11} \sigma_3 \cdot i_3 + \rho \pi_{12} (\sigma_1 + \sigma_2) \cdot i_3 + \rho \pi_{44} (i_1 \tau_2 + i_2 \tau_1)$$

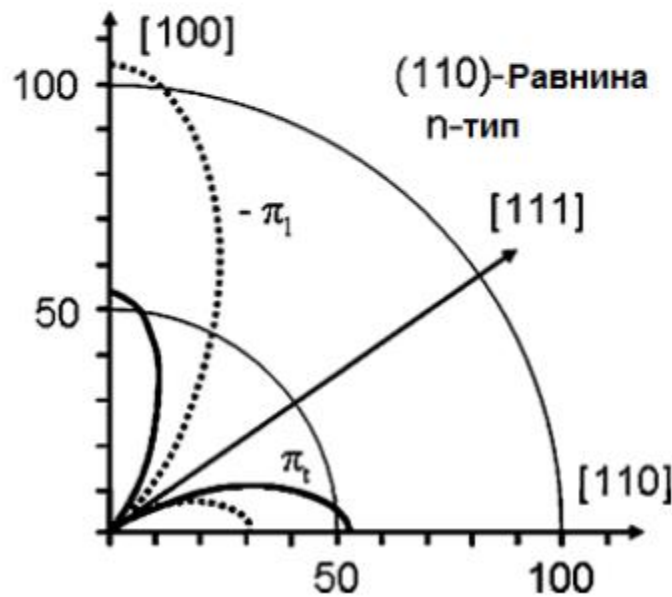
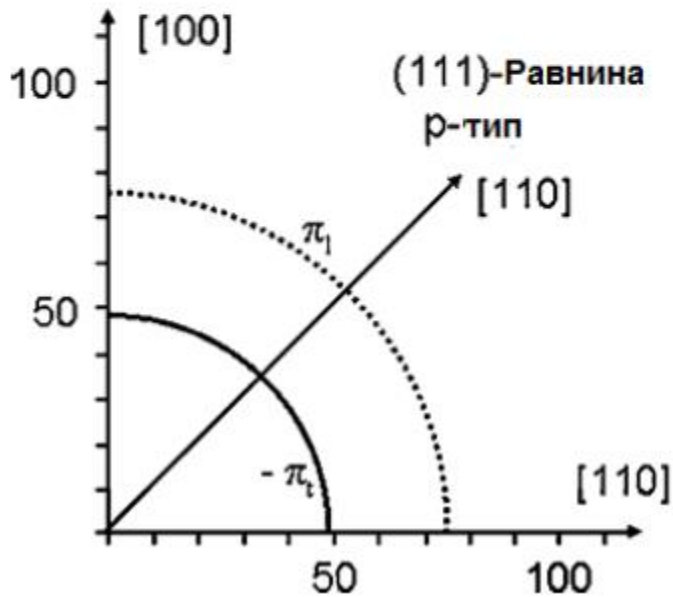
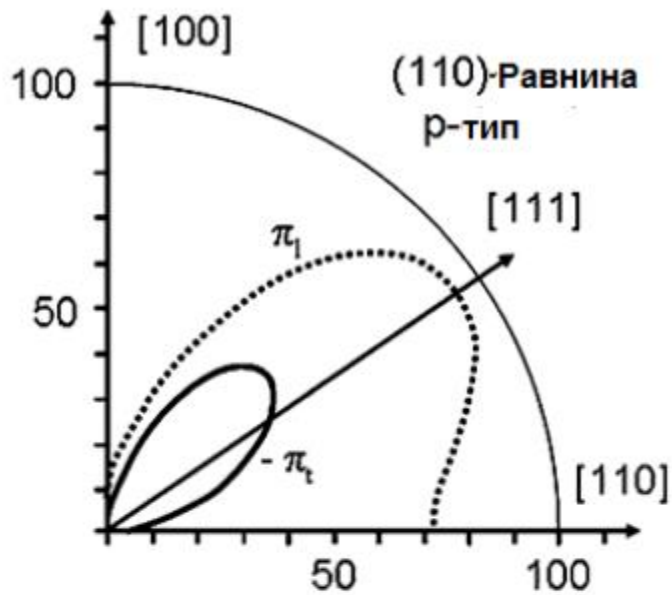
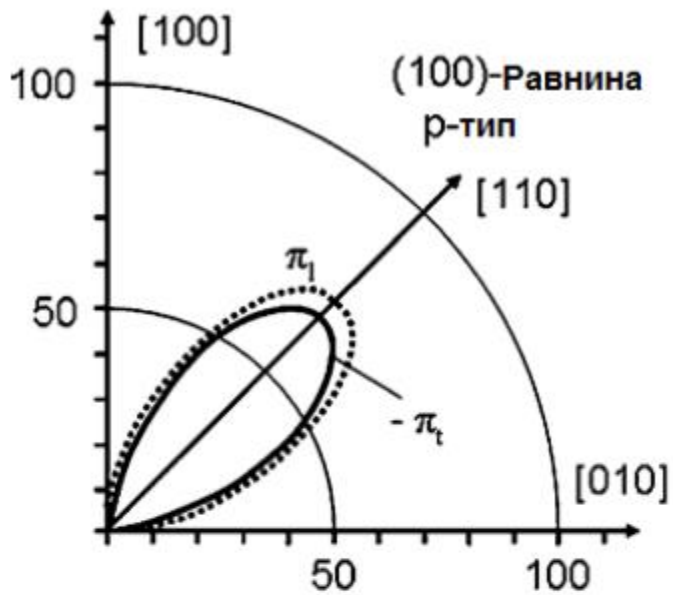
Изразите са валидни за обемен силиций

За устройства с малки размери трябва да се добави влиянието на промените на размерите чрез коефициентите на Поасон



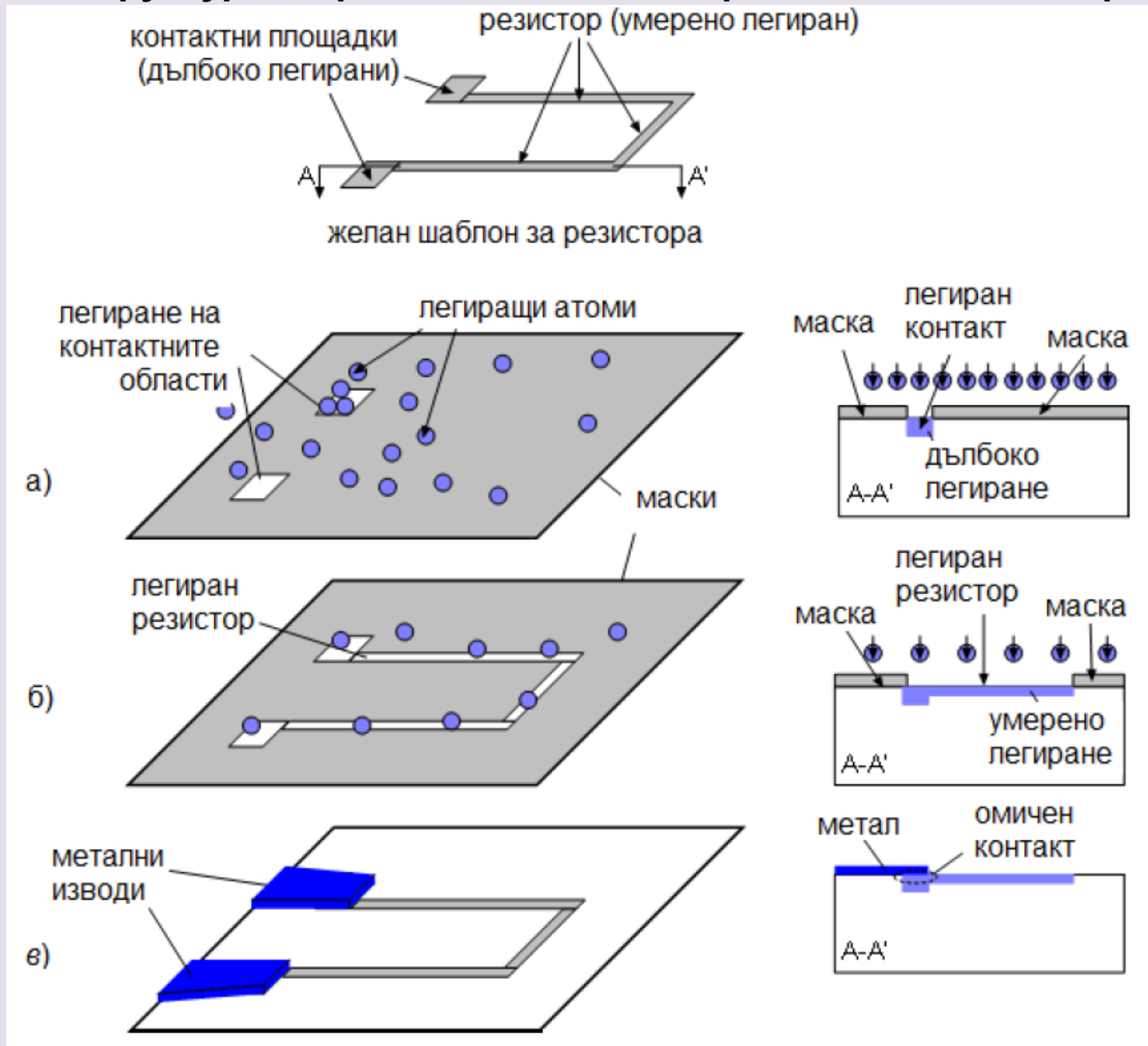
Тип	Ориентация	$\pi_l \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$	$\pi_t \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$
p	$\langle 100 \rangle$	6.6	-1.1
p	$\langle 110 \rangle$	72	-66
n	$\langle 100 \rangle$	-102.2	53.4
n	$\langle 110 \rangle$	-31	-18

Надлъжно и напречно напрегнат анизотропен материал [18]



Пиезорезистивни коефициенти за (100), (110) и (111) пластини във функция на типа и ориентацията на силициевата пластина

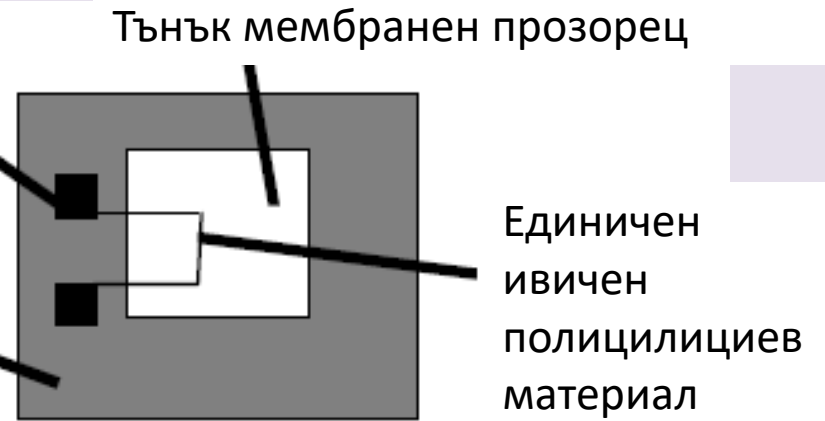
# Структура и приложение на пьезорезистивните сензори



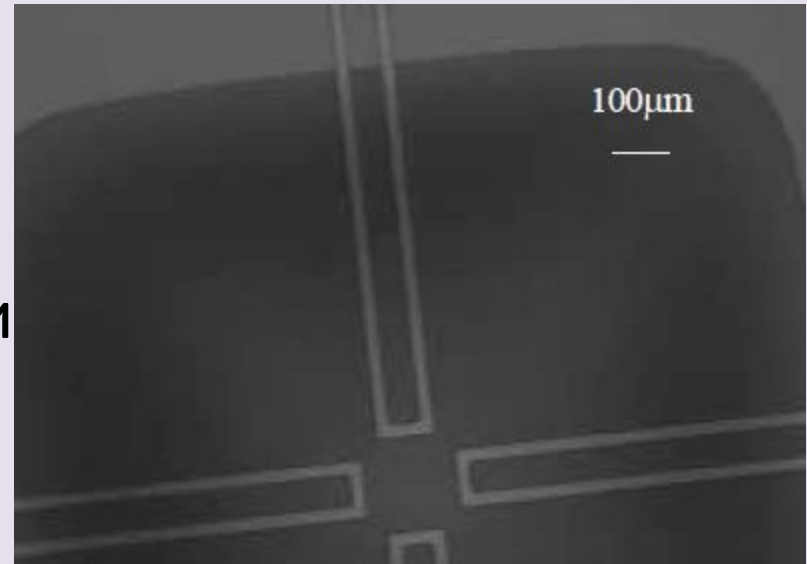
Изглед на  
единичен ивичен  
тензорезистор в  
прозорец

Площадка за изводи

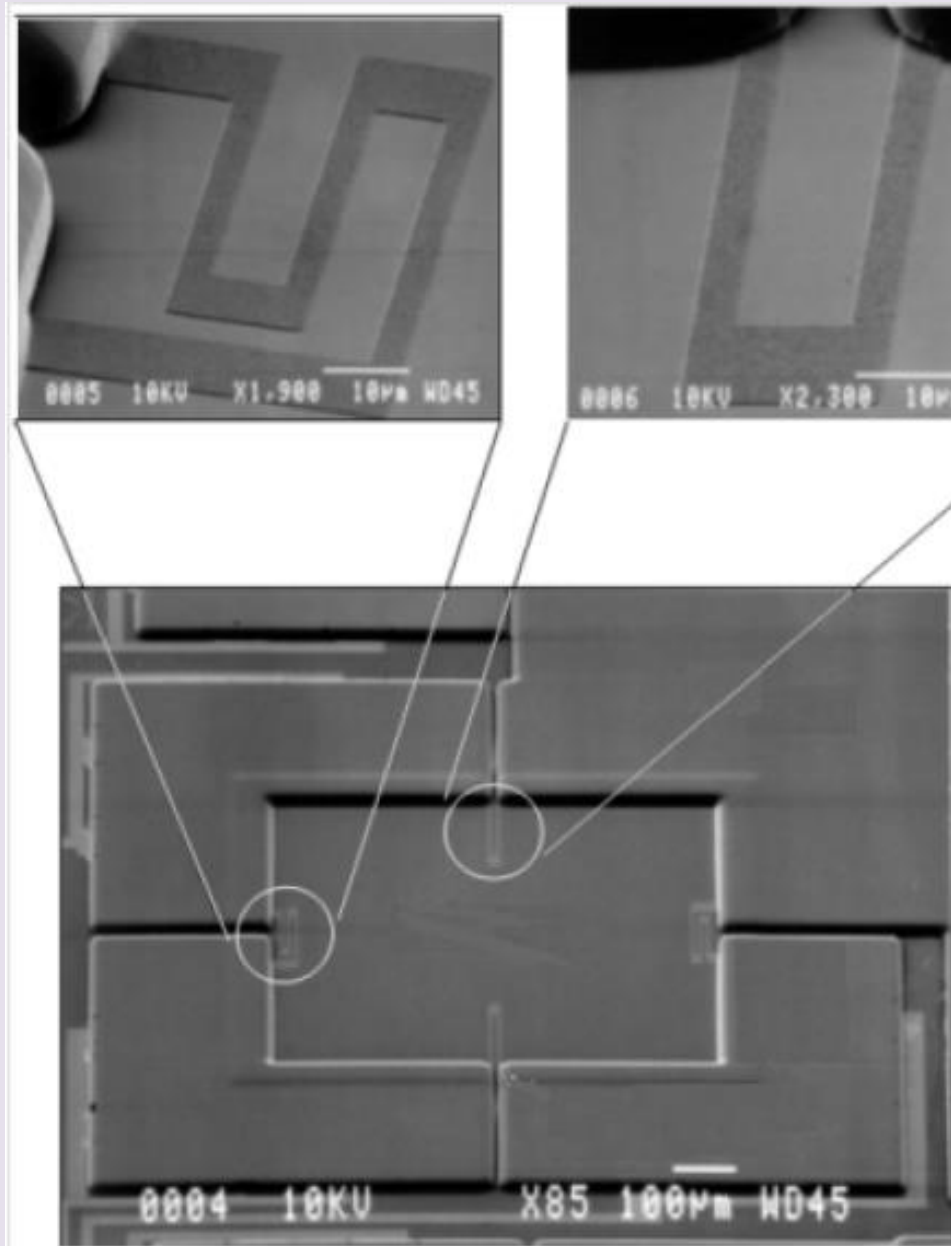
Полисилициева  
рамка



СЕМ на изработени с шаблон  
полисилициеви ивични  
тензорезистори ориентирани  
на  $90^\circ$ .

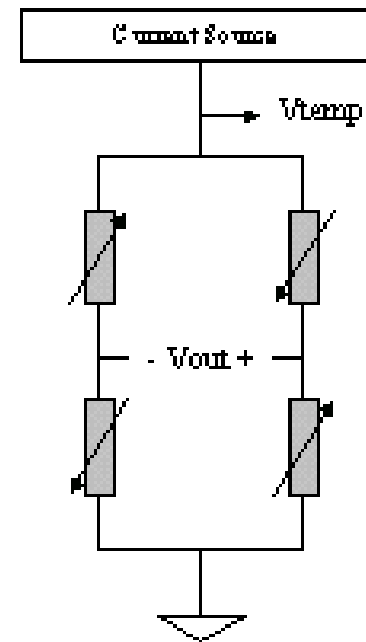
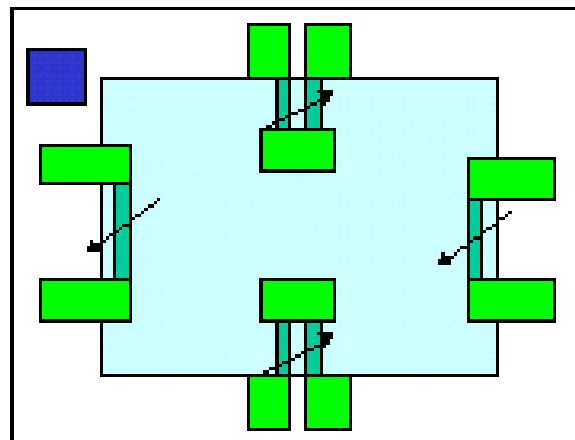
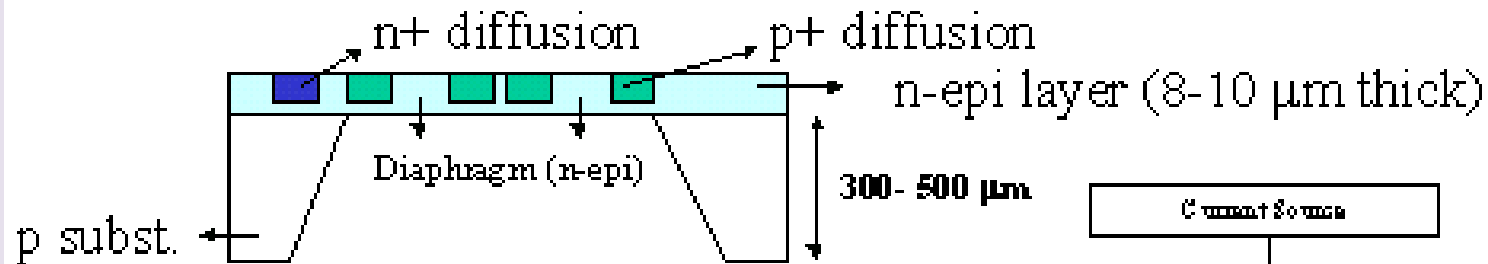


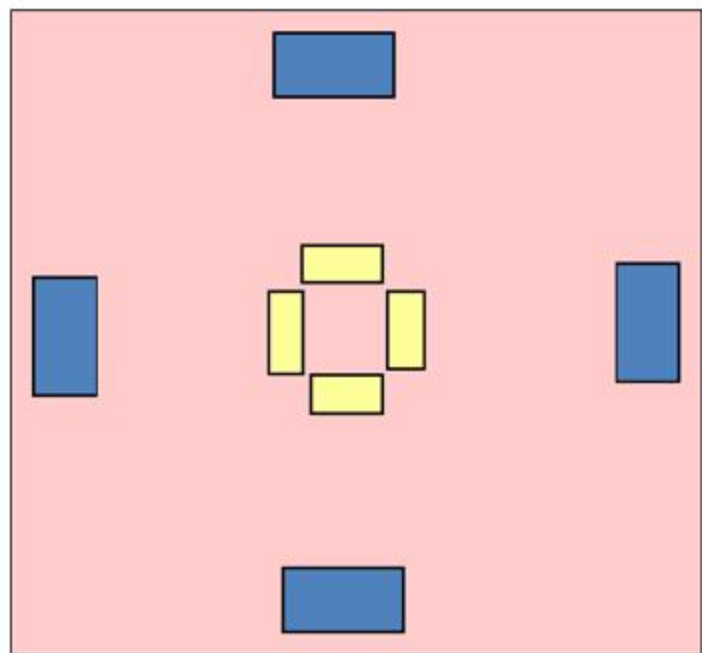




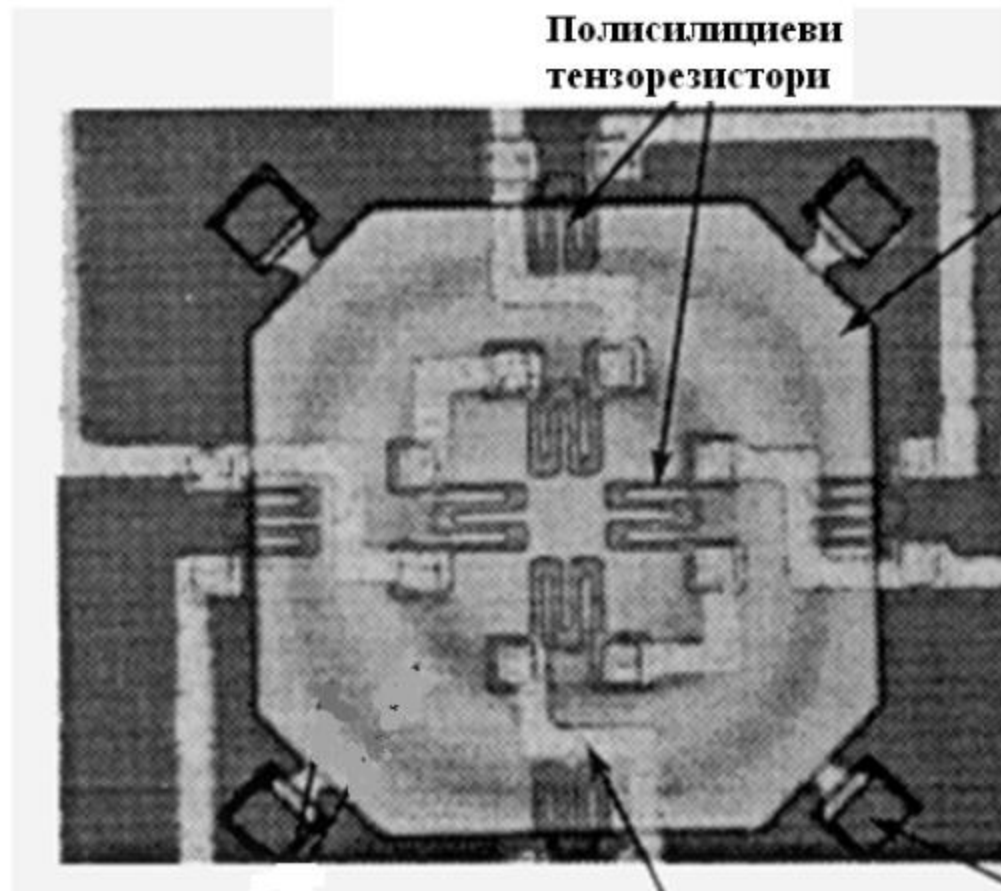
Мембрана на MEMS микрофон с пиезорезистивни сензори

# Basic Structure





а)

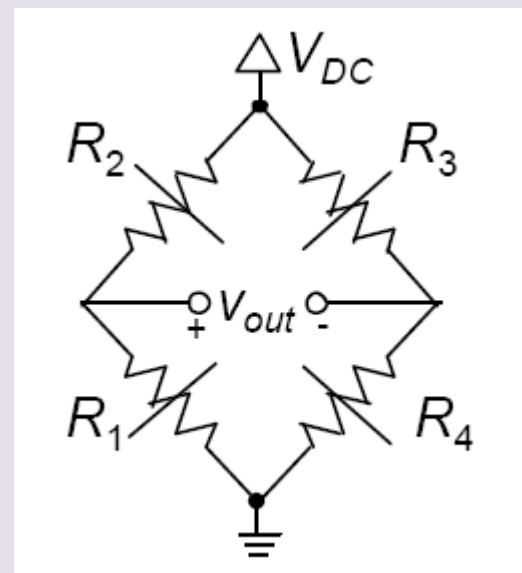
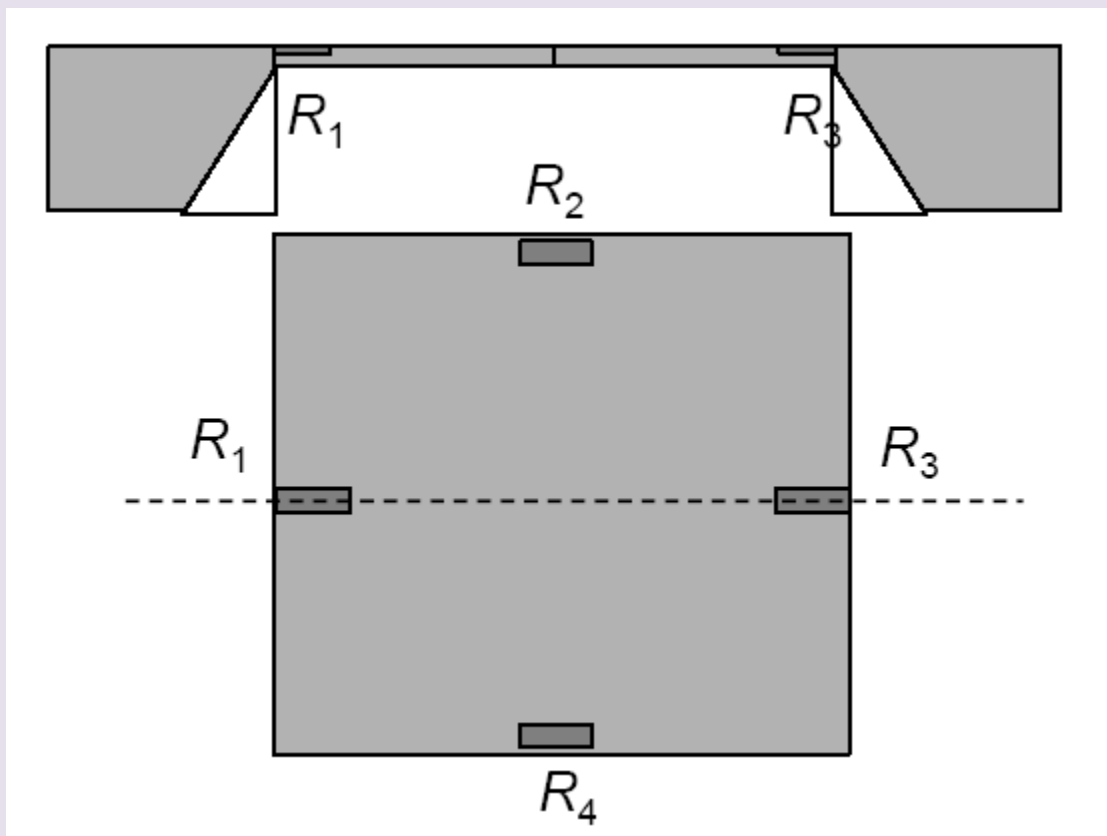


Алуминиева лента

б)

Разполагане на пиезорезисторите при измерване на деформации и напрежения на мембрани: а) области на максимални напрежения с обратни знаци; б) реализирана схема на измерване с осем пиезорезистора [13].

## Мембрана получена чрез обемна микро-машинна обработка



След деформиране на диафрагмата се получава ефект от две почти равни и противоположни по големина съпротивления

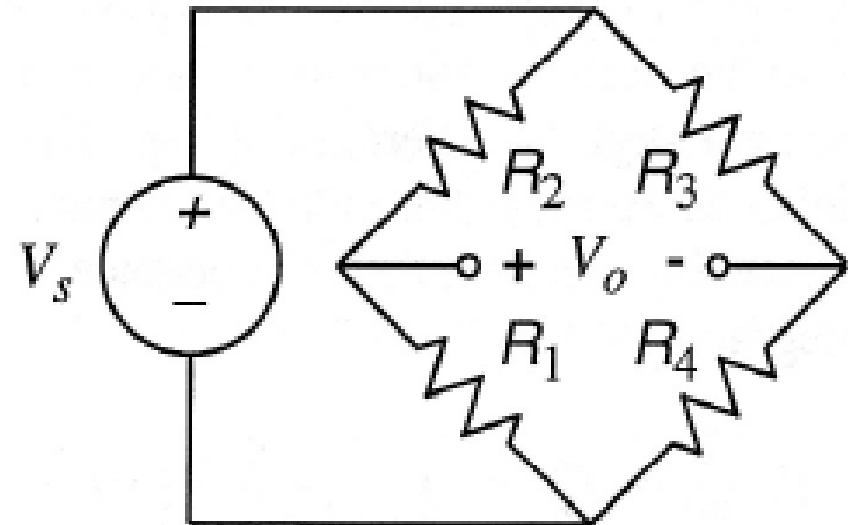
$$\Delta R_1 / R_1 = \pi_l \sigma_l + \pi_t \nu \sigma_l = (\pi_l + \nu \pi_t) \sigma_l = 67.6 \times 10^{-11} \sigma_l$$

$$\Delta R_2 / R_2 = \pi_t \sigma_l + \pi_l \nu \sigma_l = (\pi_t + \nu \pi_l) \sigma_l = -61.7 \times 10^{-11} \sigma_l$$

$$\alpha_1 = (\pi_l + \nu\pi_t)\sigma_l = (67.7 \times 10^{-11})\sigma_l$$

$$\alpha_2 = (\pi_t + \nu\pi_l)\sigma_l = (61.7 \times 10^{-11})\sigma_l$$

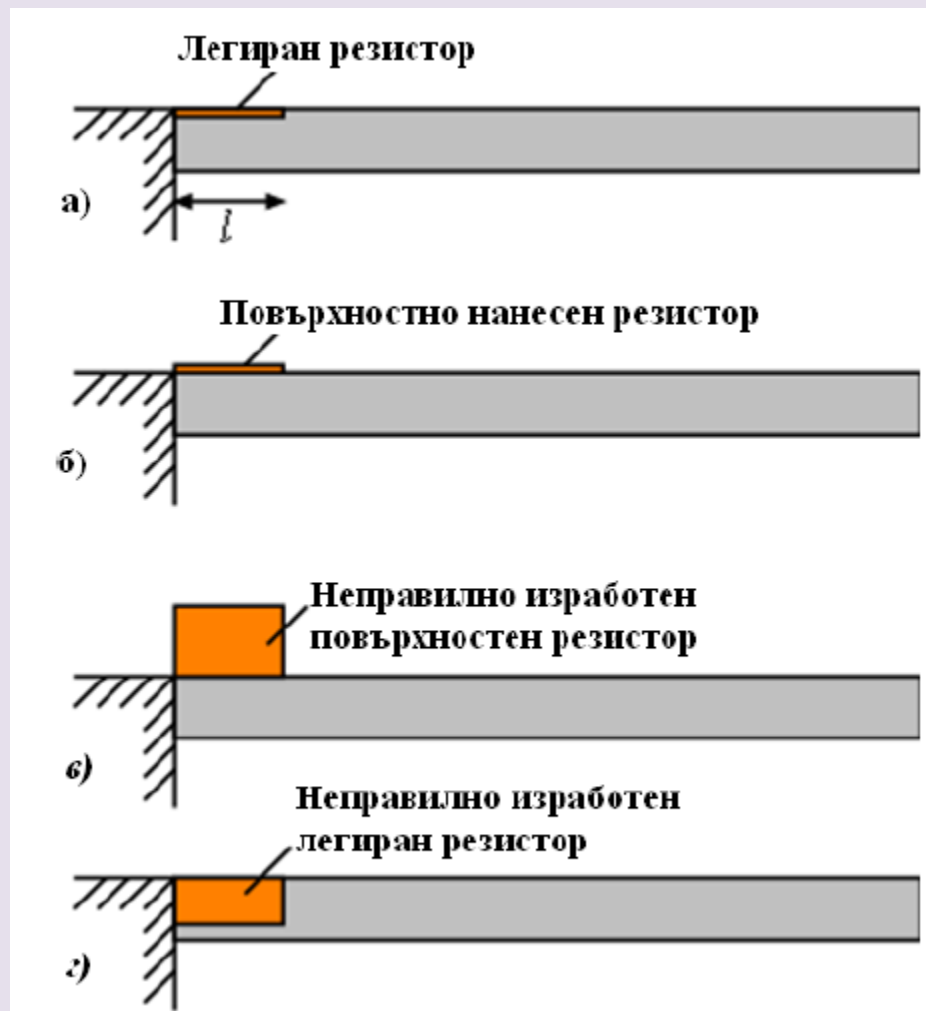
Коефициентът на Поасон има минимум при [110]  $\sim 0,064$



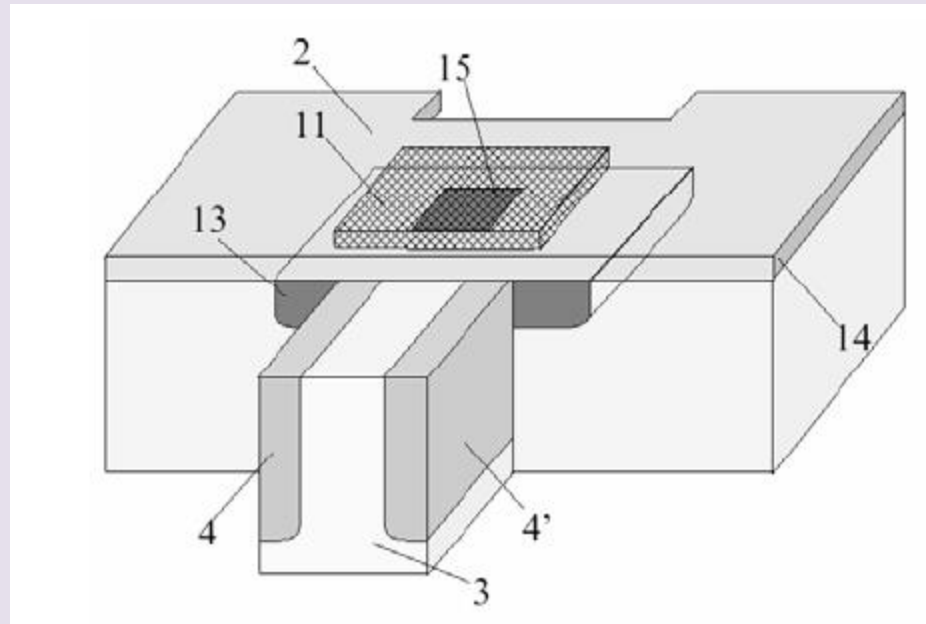
$$R_1 = R_3 = (1 + \alpha_1)R_0$$

$$R_2 = R_4 = (1 - \alpha_2)R_0$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \approx \frac{2(\alpha_1 + \alpha_2)}{1 + \alpha_1 - \alpha_2}$$

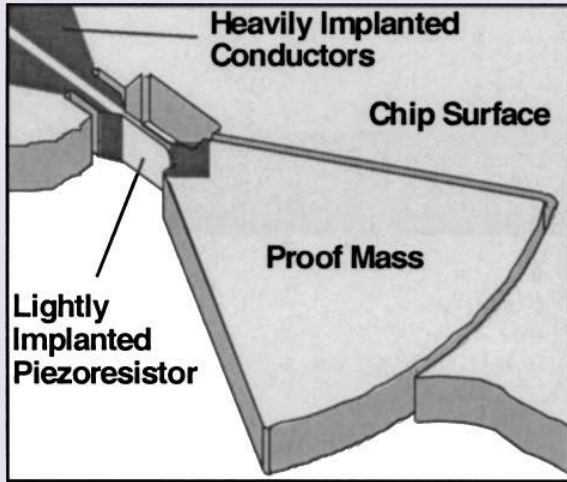


Геометрични пропорции между размерите на гредата и резистора: а) легиран резистор с правилни пропорции б) изработен чрез повърхностна технология метален резистор с правилни пропорции; в) неподходящи размери на метален резистор г) легиран резистор с недопустимо голяма дебелина [13].

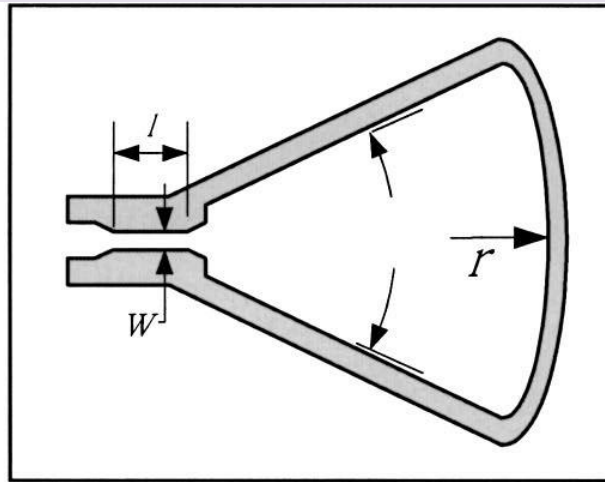


Странично разположени пиезорезистори за измерване на деформации в хоризонталната равнина: 3. Ръка на хващача; 4. Пиезорезистори; 13. Легирана p+ област с висока концентрация, 14. Изолатор от  $\text{SiO}_2$ ; 15. Контактен отвор; 11. Метална пътека [22].

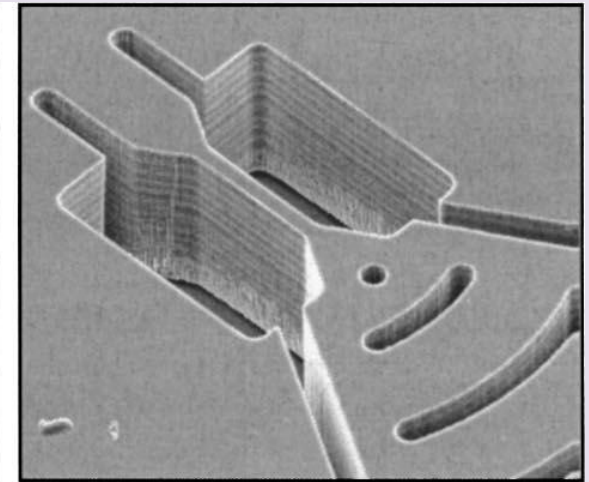
# Piezoresistive MEMS-Based Accelerometer



(a)



(b)

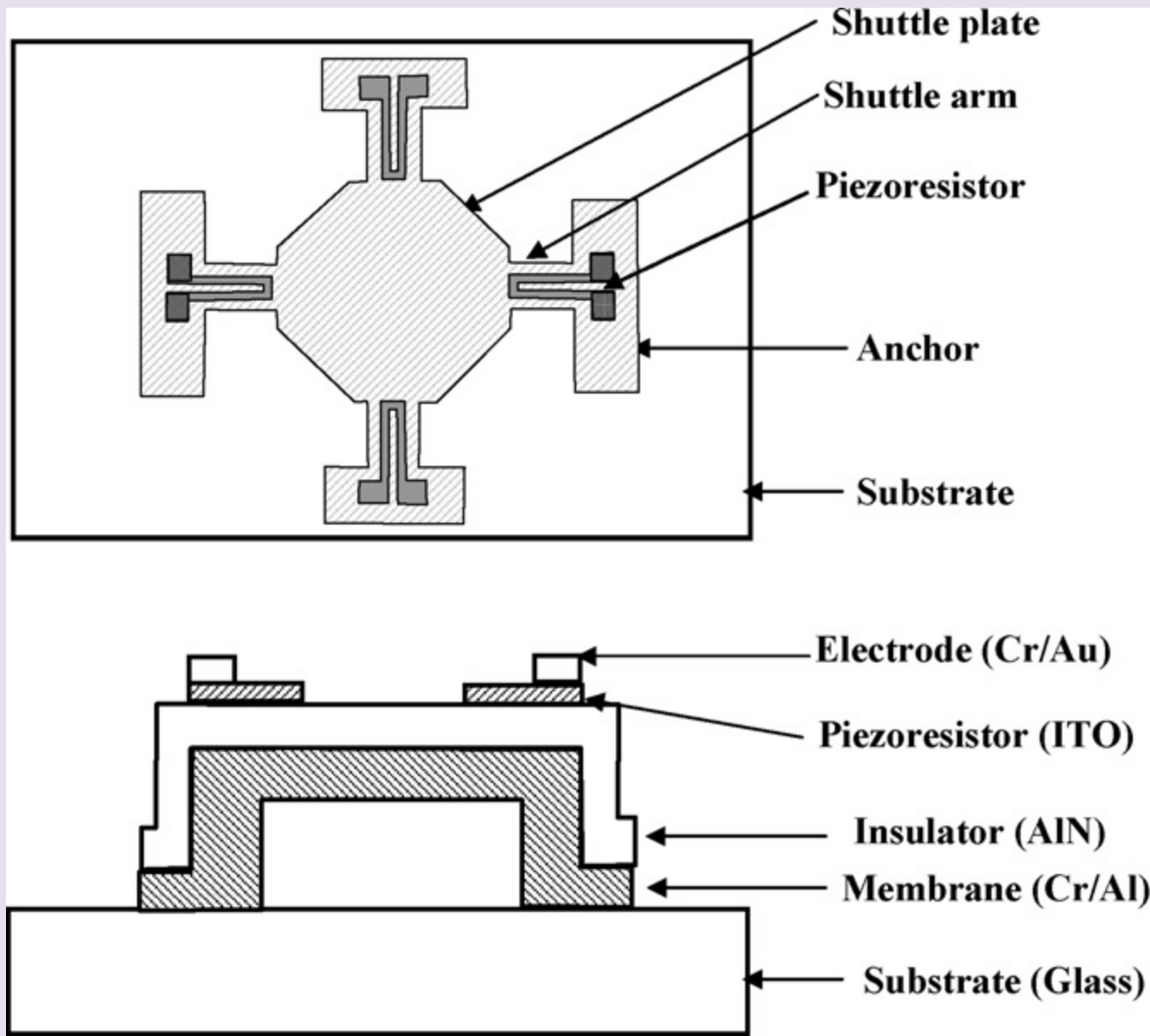


(c)

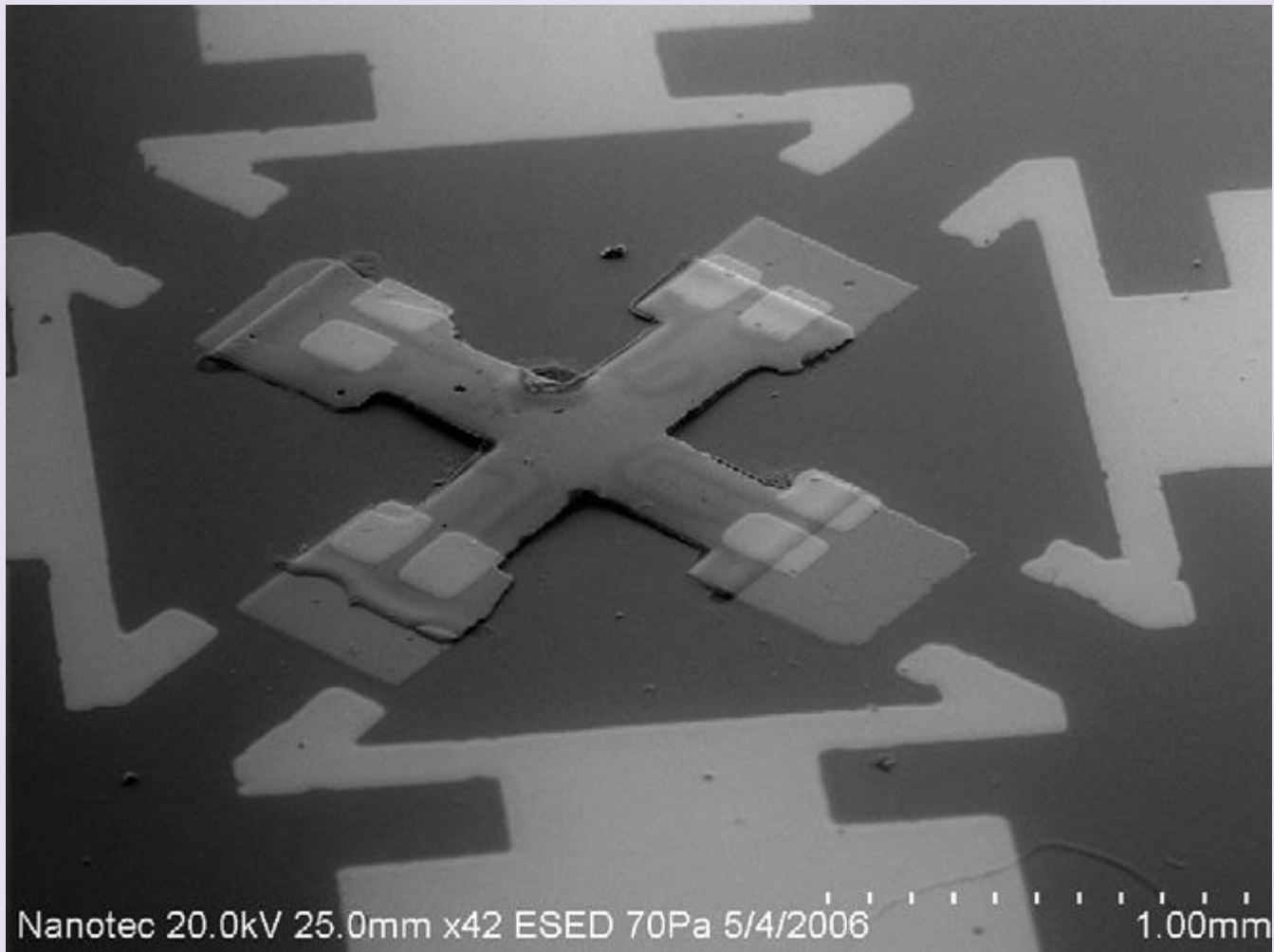
## Характеристики

Accelerometer property	Theoretical
Flexural length, $l$	30 mm
Flexural width, $w$	5 mm
Thickness, $t$	30 mm
Proof mass radius, $r$	1 mm
Proof mass angle, $f$	60°
Range	10 g
Bandwidth	1.6 kHz



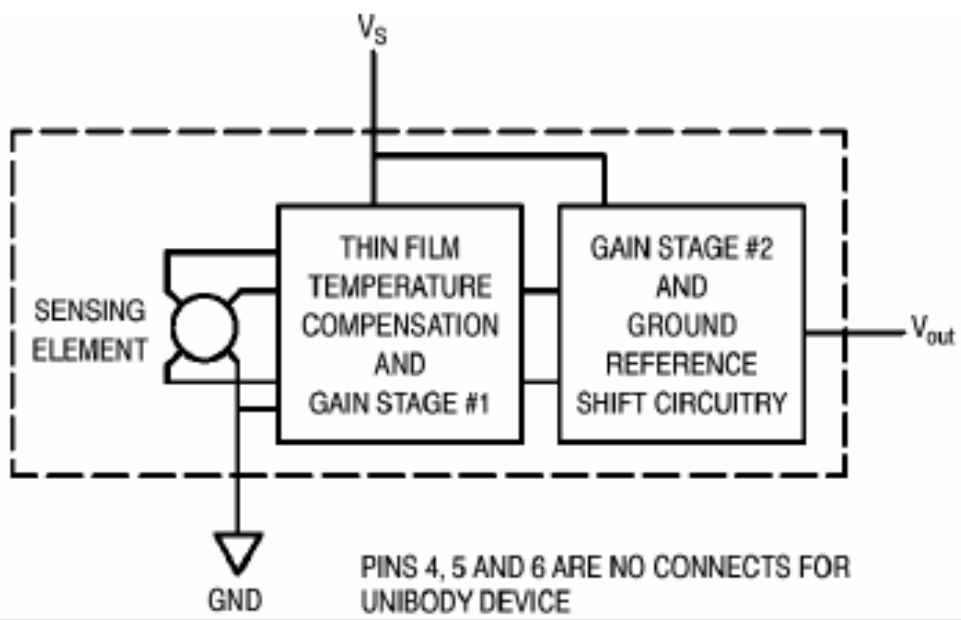
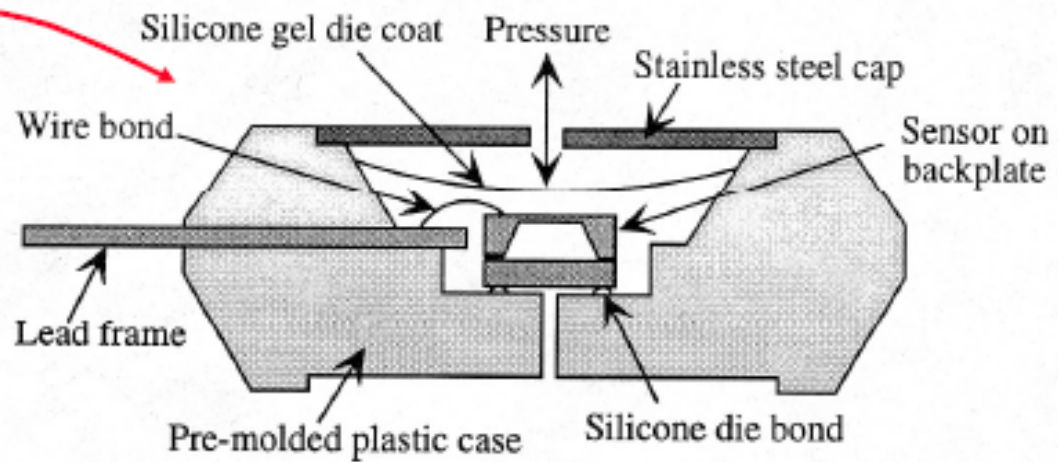
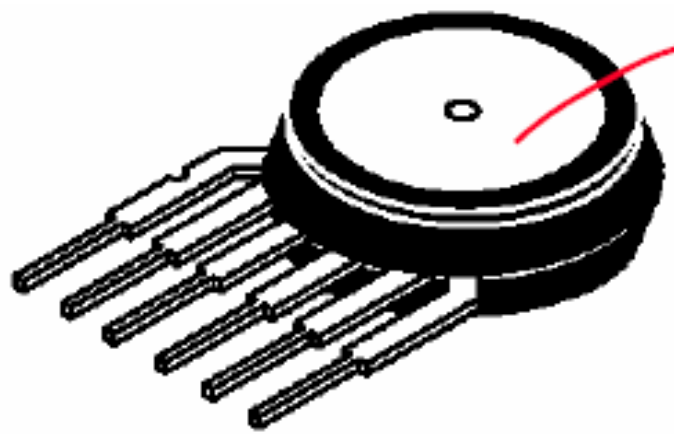


Structure of MEMS tactile sensor.

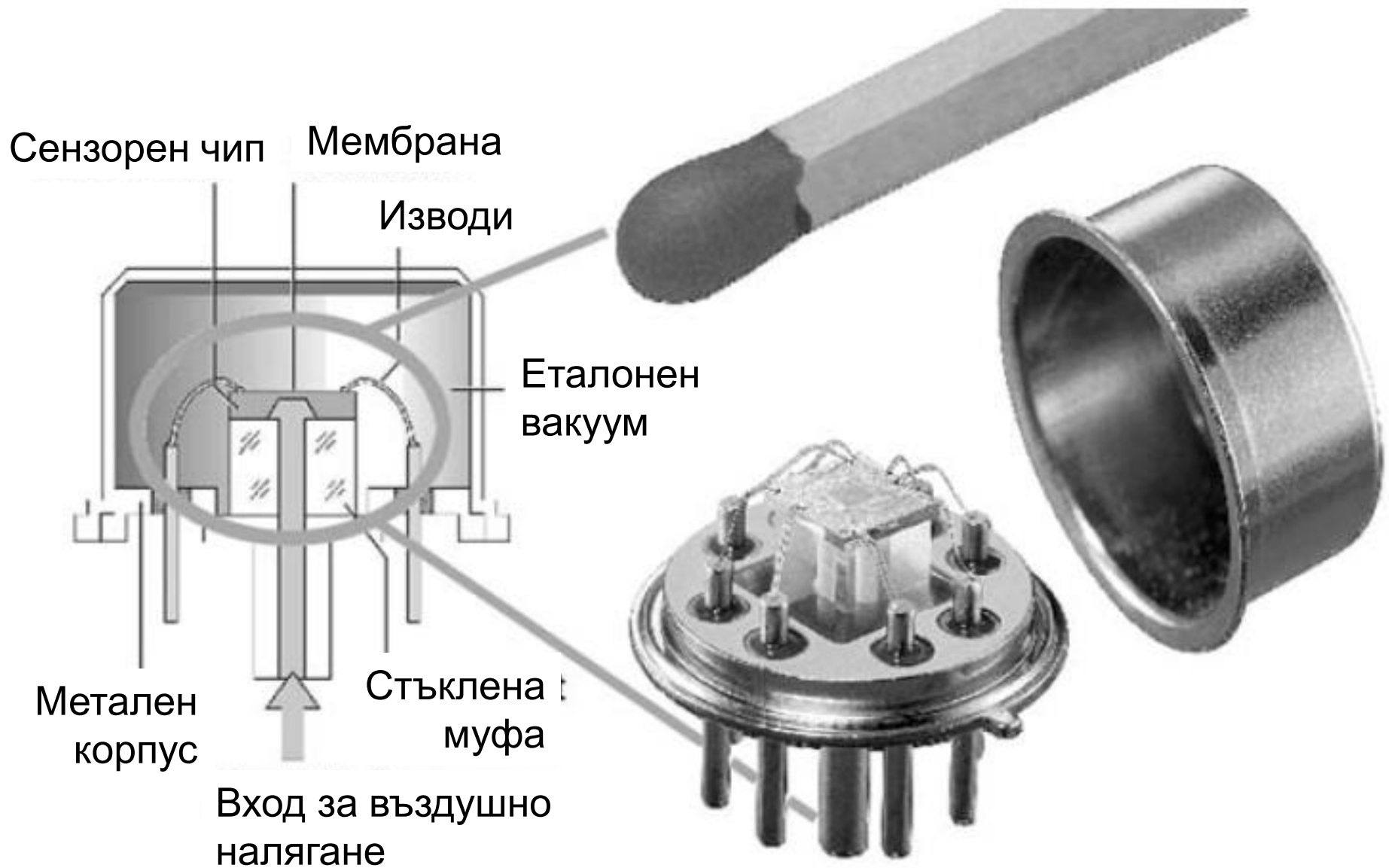


SEM image of the fabricated tactile sensor

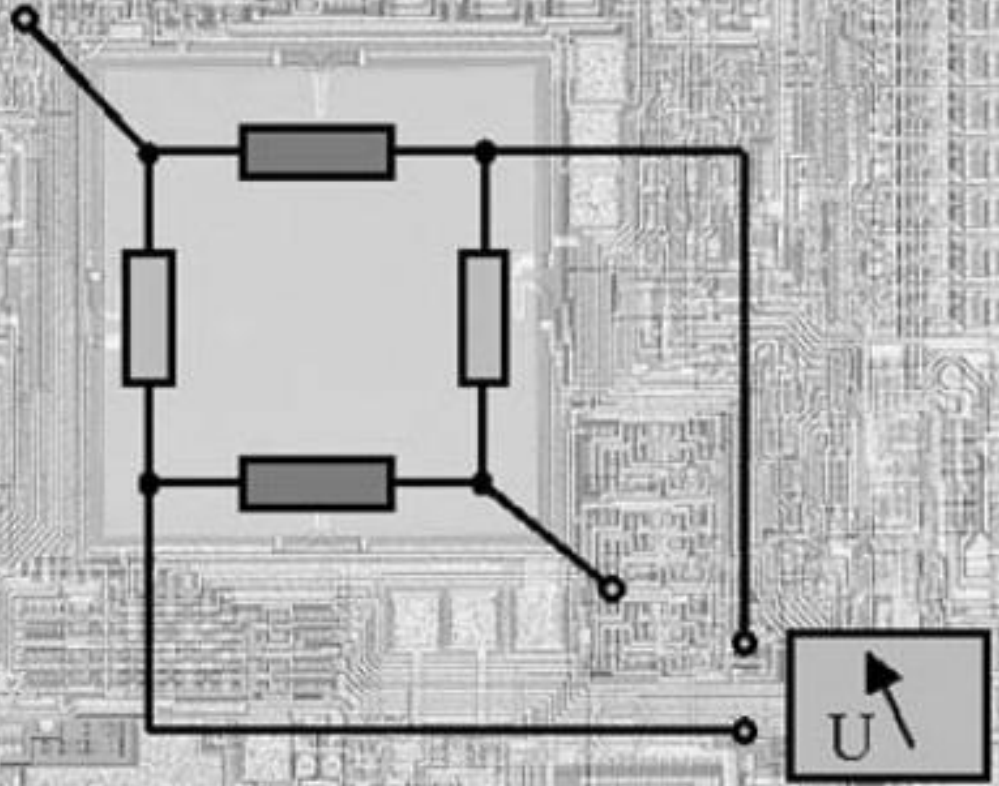
# Motorola Manifold-Absolute-Pressure (MAP) Sensor



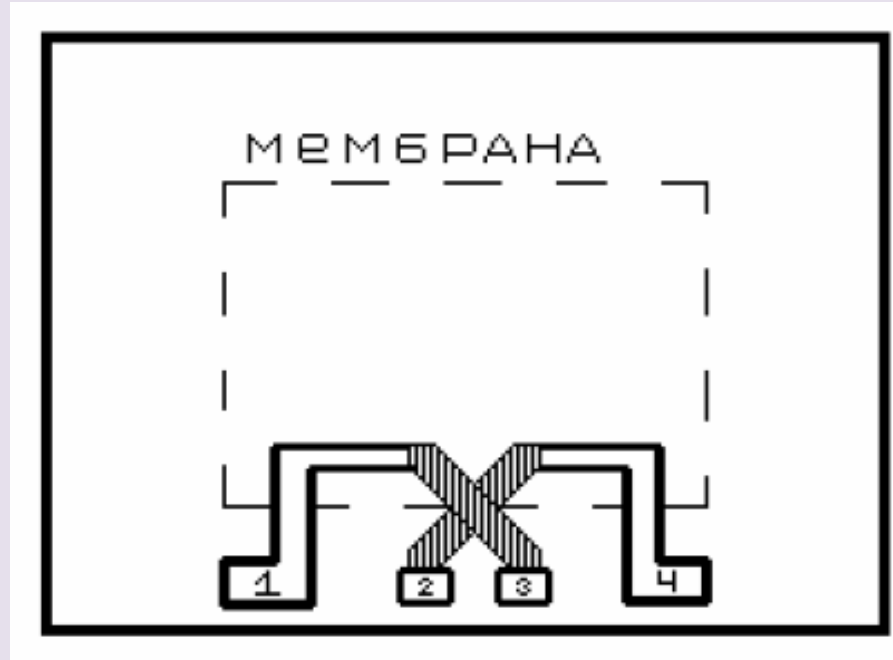
Температурната компенсация и калибриращата електроника са интегрирани със сензорния чип



Разрез и вид с отворен корпус на сензор за налягане. Контактът с външния свят е само със задната страна на мембраната на сензора, херметично изолирана предна страна която съдържа електрониката.



## X-ducer на Motorola

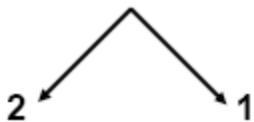
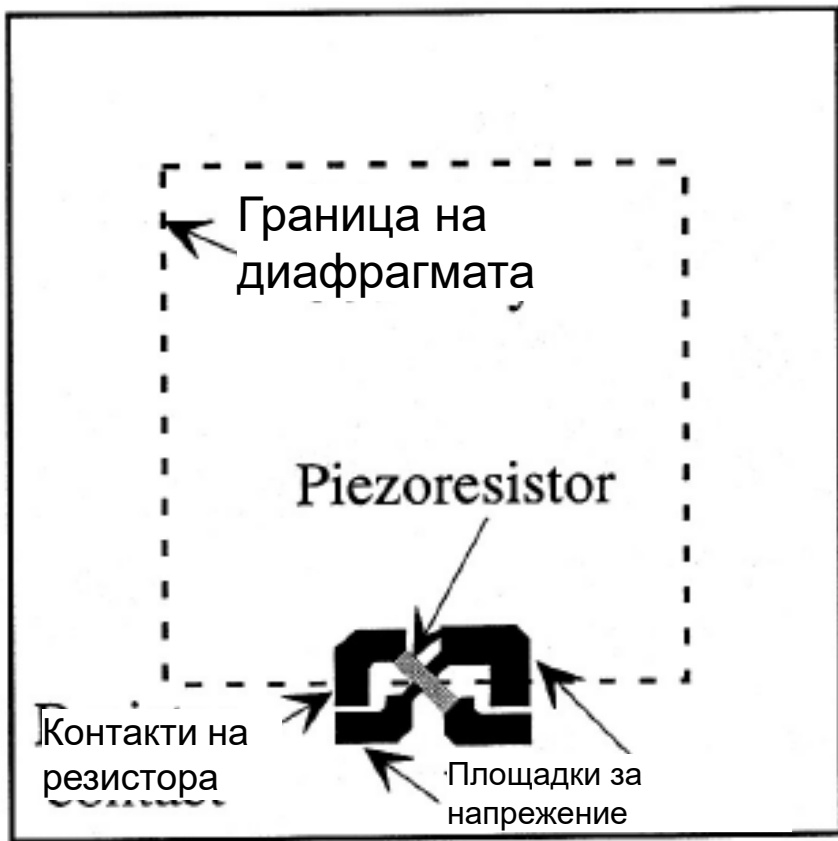


Използва се само един пиезорезистивен елемент, получен чрез йонно легиране, разположен на силициева мембрана и имащ X-образна форма. Захранващото напрежение се подава на X-ducer-а на изводи 1 и 3. При въздействие на налягане, мембраната се огъва и в изводи 2 и 4 възниква напрежение. X-ducer-ът на "Motorola" може да се разглежда като механичен аналог на преобразовател базиран на ефекта на Хол.

Предимства: Не е необходимо да се изграждат идентични по параметри 4 тензорезистора за уитстонов мост. Това опростява схемата на температурна компенсация на чувствителността и отклонението от нула.

Недостатък: Не може да се използва за течни среди.





Площадките за напрежение са свързани към високо-импедансен операционен усилвател -> няма ток

$$J_2 = J_3 = 0$$

$$E_1 = \rho_e (1 + \pi_{11}\sigma_1 + \pi_{12}\sigma_2) J_1$$

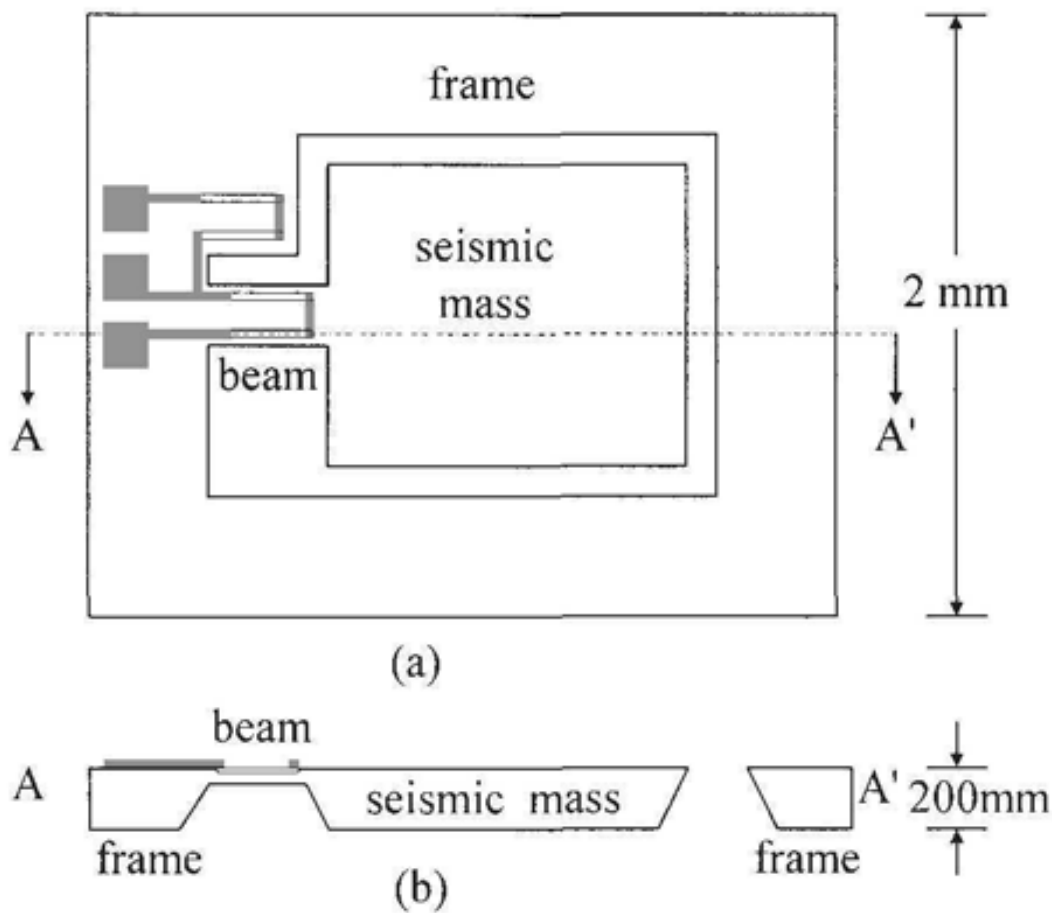
$$E_2 = \rho_e \pi_{44} \tau_3 J_1$$

$\rightarrow$   
[110]

$$V_1 = \int_0^{L_R} E_1 dx \approx \rho_e L_R J_1$$

$$V_2 = \pi_{44} \tau_3 \left( \frac{W_R}{L_R} \right) V_1$$

# Схема на първия пиезорезистивен акселерометър

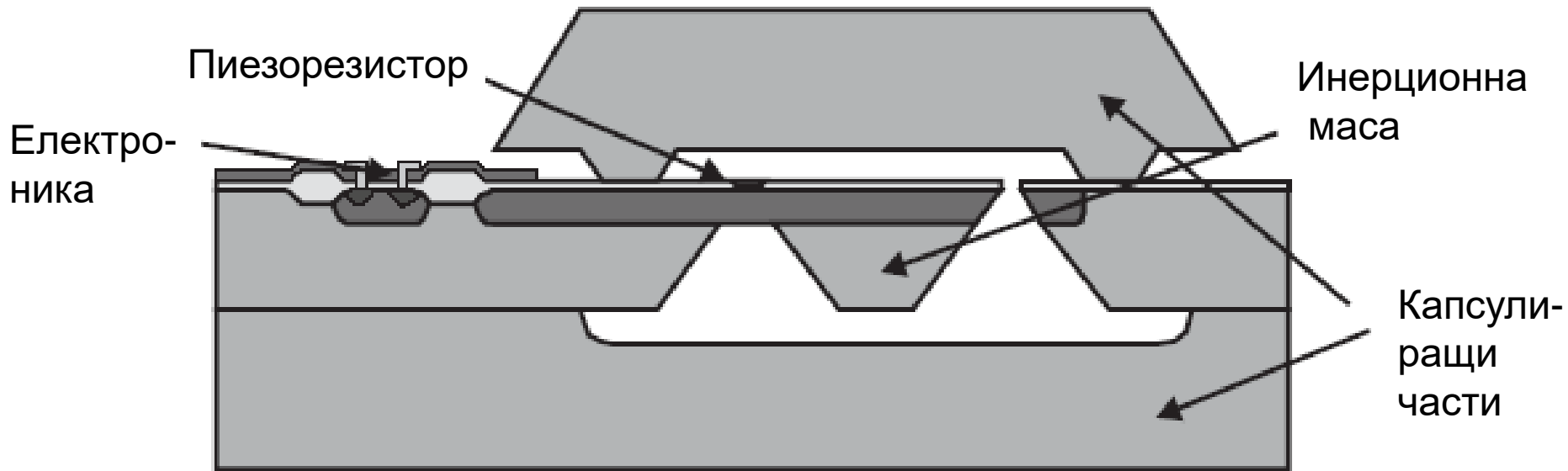


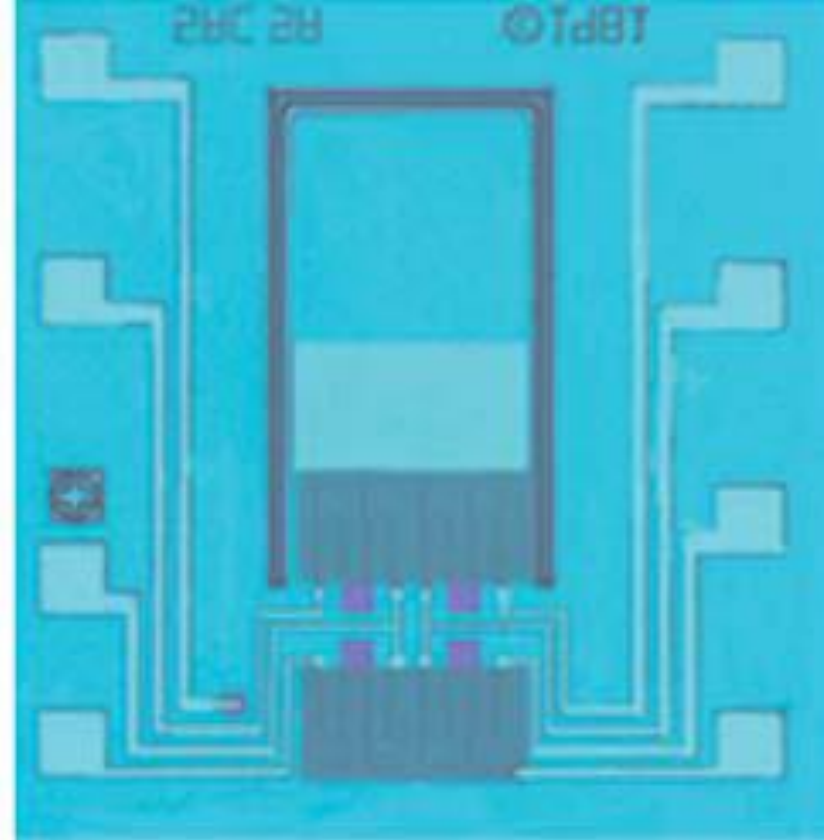
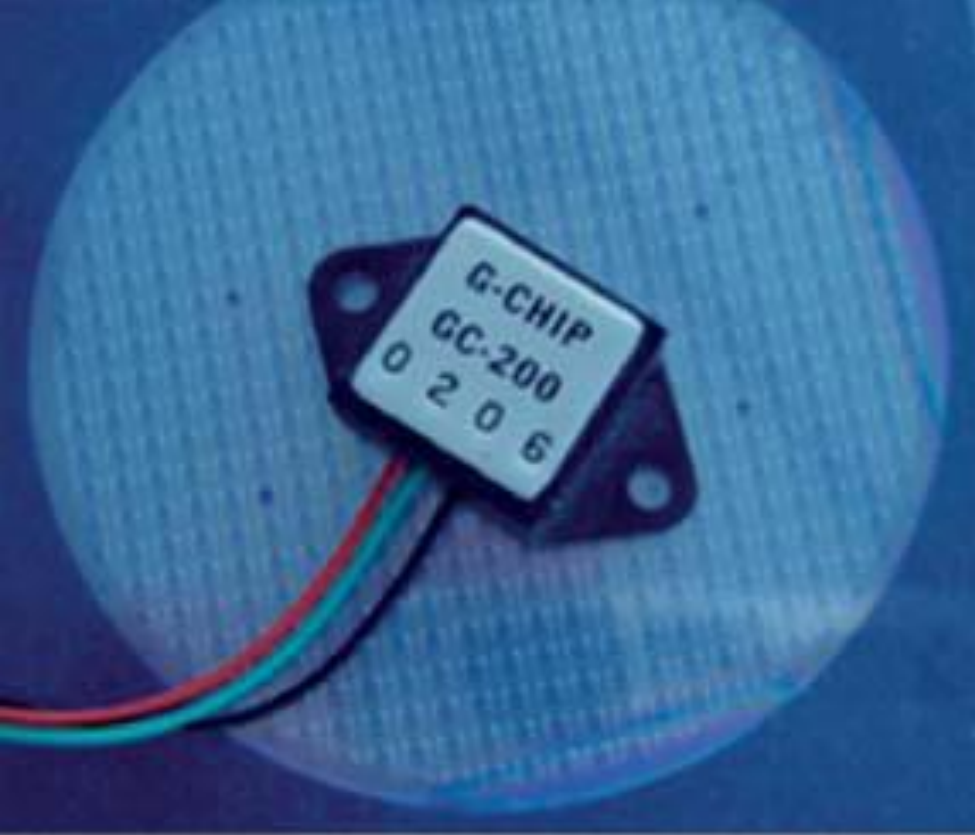
Чипът на акселерометъра се състои от рамка сеизмична маса и тънка греда. Двата резистора са изработени чрез селективна дифузия върху чипа, един върху гредата и другият върху рамката и са свързани чрез метални пътечки, за да образуват полумост.

(a) поглед отгоре; (b)  
разрез на чипа

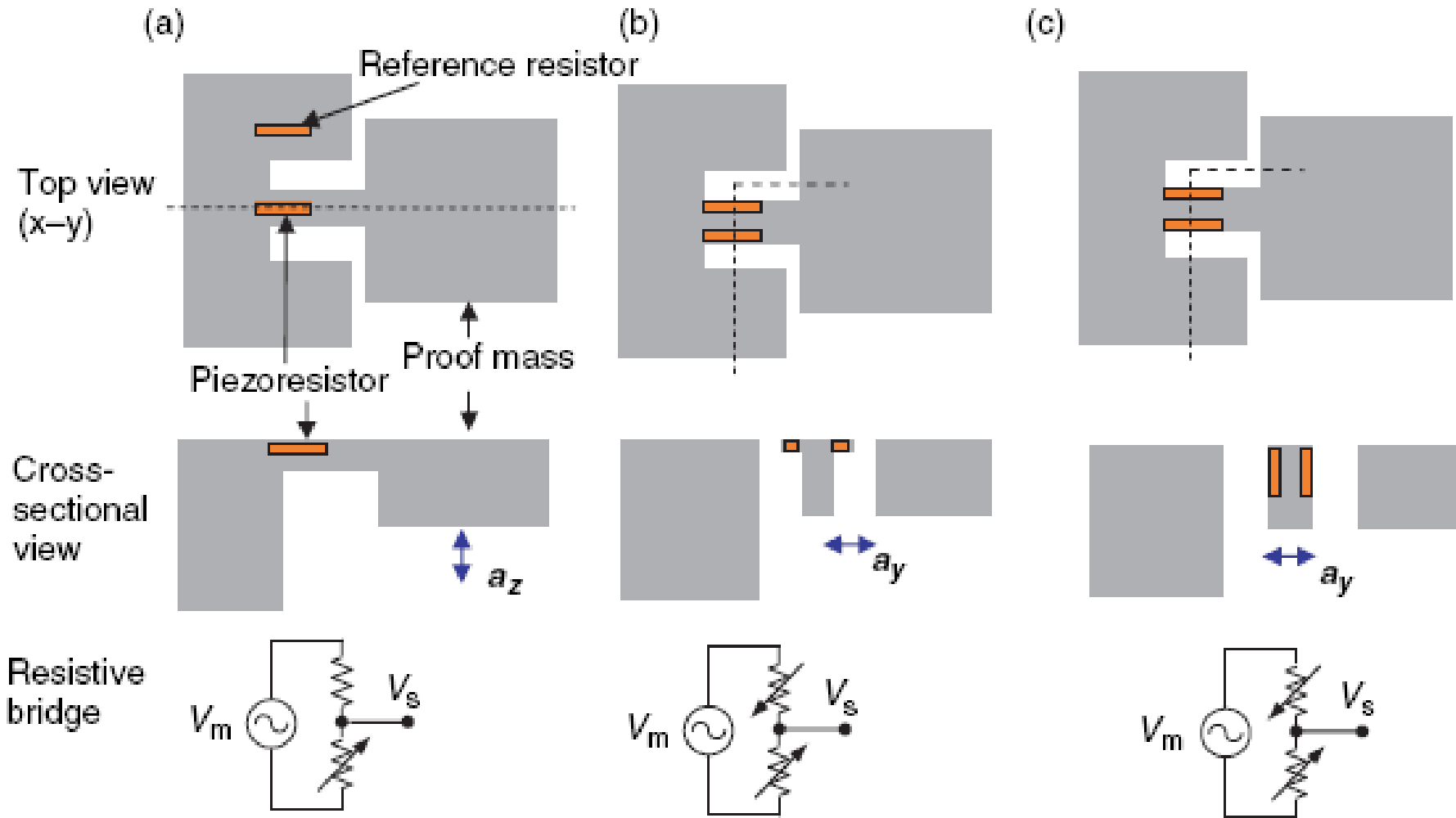


# Напречно сечение на пиезорезистивен акселерометър



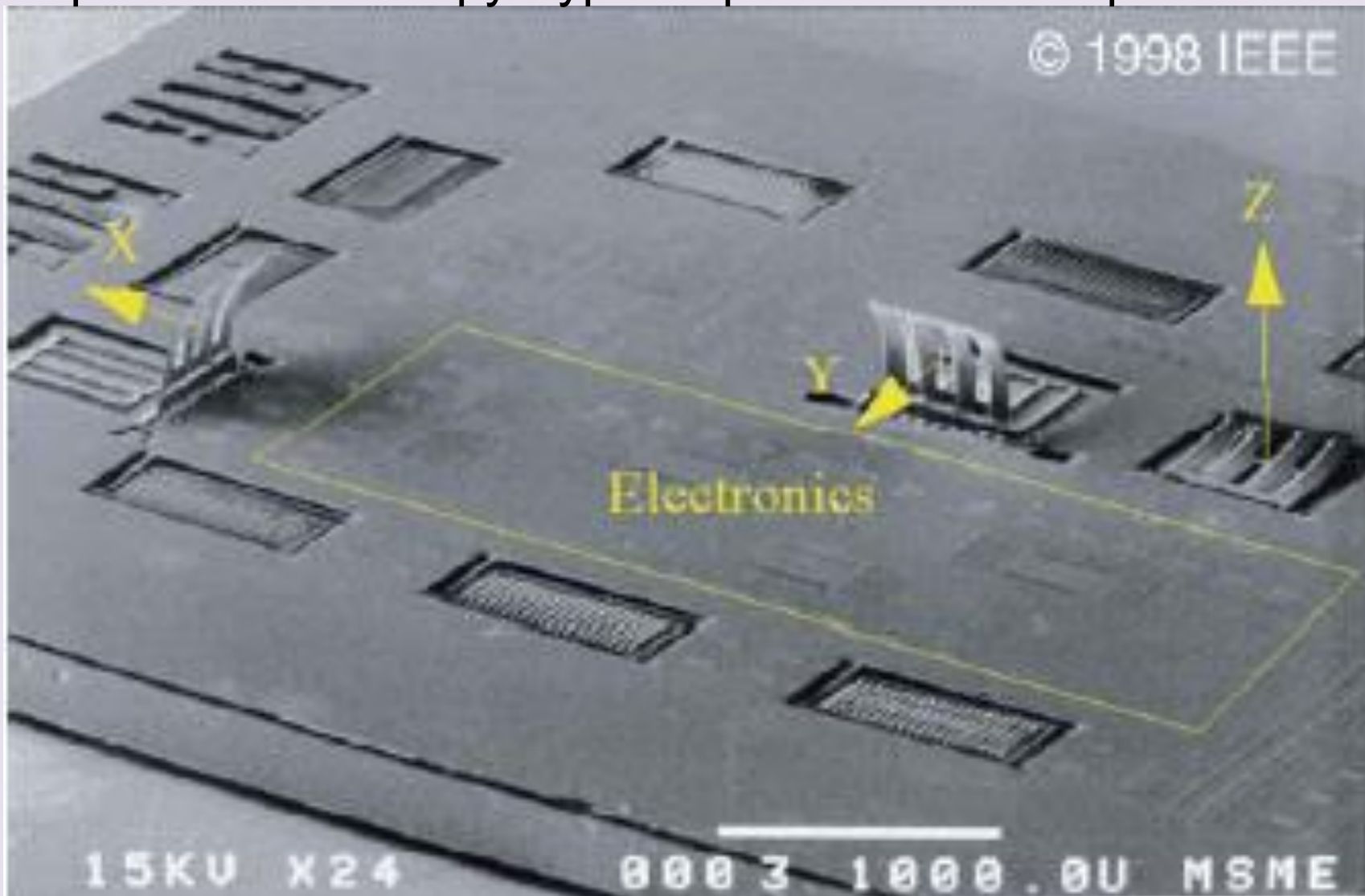


In south Microsystems, Auburn, AL, 1979, използват алуминиево метализиране и цял пиезорезистивен мост. Сензорът е известен като G-чип.



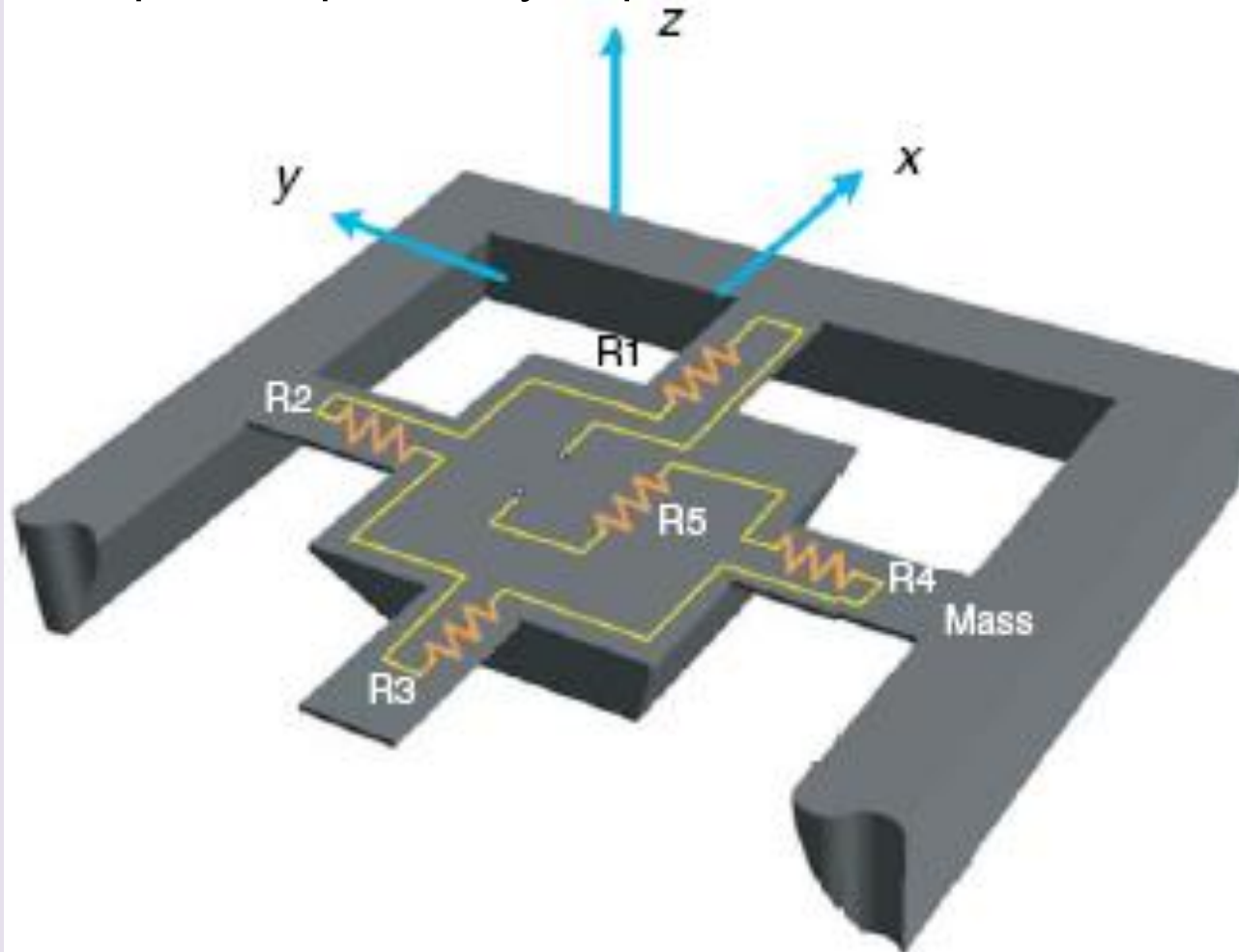
Схеми на пиезорезистивни сензори: (a) Неравнинно (z-ос) с  $\frac{1}{4}$  мост. (b) равнинно (странично) с полумост, пиезорезисторите са оформени чрез дифузия на фронталната страна. (c) Равнинно (странична-ос) сензориране с полумост, пиезорезисторите са оформени на страничните стени чрез наклонена йонна имплантация.

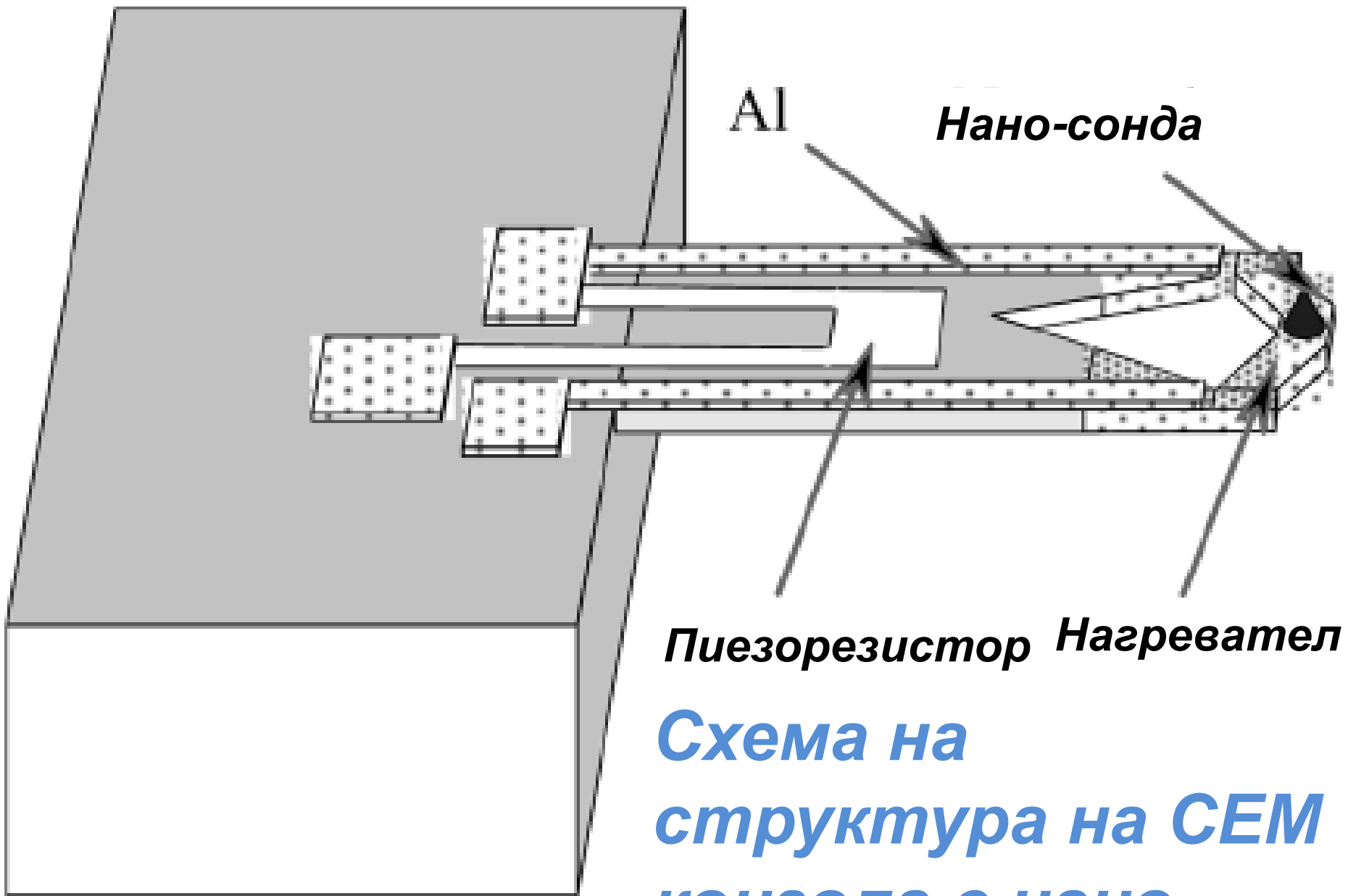
SEM на микро-пиезорезистивен три осен акселерометър съставен от три независими метално оксидни полупроводникови (CMOS) акселерометри. Две от пиезорезистивните структури са разположени вертикално.



# Три осов пиезорезистивен акселерометър

При ускорение по ос  $x$ ,  $R1$  и  $R3$  променят стойностите си противоположно, докато  $R2$  и  $R4$  се изменят с еднакви стойности и знак. Така ускорението по ос  $x$  може да бъде установено чрез разликата на  $R1$  и  $R3$ . ( $R5$ ) се използва за елиминиране на термичните отклонения. Сумата от всички четири пиезорезистори дава ускорението по ос  $z$ .





*Пиезорезистор Нагревател*

**Схема на  
структура на СЕМ  
конзола с нано-  
сонда.**

Пиезорезистивните микро-акселерометри с хибридна електроника са на пазара от 1980 г. Основни производители са SensoNor, Denso, Hitachi, Motorola, Danfoss и др. Тези акселерометри показват много добри качества в автомобилната промишленост и авиацията. Основен недостатък е необходимостта от **продължително калибриране** и **температурна компенсация на отместването и чувствителността**, защото пиезорезисторите променят стойностите на съпротивленията си (и токовете от утечки при дифузионните съпротивления) повече от един порядък между стойности от  $-20$  до  $+140^{\circ}\text{C}$ . Друг недостатък е липсата на интегрирани самотестващи се за критични случаи системи. В пиезорезистивните акселерометри фактически **няма собствено задвижване за детектиране**, което изисква допълнителни подходящи актуатори, например електростатични, електротермични или пиезоелектрични, които да въздействат на инерционната маса. Тези допълнителни усилия и разходи за самотестващите се в критични приложения е сериозен недостатък на пиезорезистивните акселерометри.

## Литература:

1. Khir M. H., Qu P., Qu H., A Low-Cost CMOS-MEMS Piezoresistive Accelerometer with Large Proof Mass Sensors, Vol. 11, 2011, pp.7892-7907.
2. Sugiyama, S., Takigawa M., Igarashi I., Integrated Piezoresistive Pressure Sensor with Both Voltage and Frequency Output, Sensors and Actuators: A, Vol. 4, 1983, pp. 113–120.
3. Gretillat, F., Gretillat M.-A., de Rooij N. F., Improved Design of a Silicon Micromachined Gyroscope with Piezoresistive Detection and Electromagnetic Excitation, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 8, 1999. pp. 243–250.
4. Kane, B. J., Cutkosky M. R., Kovacs T. A., A Traction Stress Sensor Array for Use in High-Resolution Robotic Tactile Imaging, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 9, 2000, pp. 425–434.
5. Wisitsoraat A., Patthanasetakul V., Lomas T, Tuantranont A., Low cost thin film based piezoresistive MEMS tactile sensor, Sensors and Actuators: A, Vol. 139, 2007, pp. 17–22.
6. Hautamaki, C., Zurn, S.; Mantell, S. C., Dennis L. P., Experimental Evaluation of MEMS Strain Sensors Embedded in Composites, Journal of Micro electromechanical Systems, Vol. 8, 1999, pp. 272–279.
7. Smith R., Sparks D, Riley D., Nader Najafi N., A MEMS-based Coriolis Mass Flow Sensor for Industrial Applications, IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 56, No.4, 2009.
8. Smith C. S., Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon, Phys. Rev., vol. 94, no. 1, pp.42–49, 1954.



9. <http://instrumentations.blogspot.com/2011/07/strain-gauge.html>, 2013.
10. <http://soliton.ae.gatech.edu/people/jcraig/classes/ae3145/Lab2/strain-gage-rosette-theory.pdf>, Strain Transformation and Rosette Gage Theory, AE3145.
11. <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/BD3/printall.php>, 2013.
12. <http://aggarwalweighingsystem.com/Strain-Gages.html>, 2013.
13. Liu C., Fundamentals of MEMS, Prentice Hall, 2006. p. 576.
14. Kottapalli A. G. P., Asadnia M., Miao J M, Barbastathis G., Triantafyllou M, S., A flexible liquid crystal polymer MEMS pressure sensor array for fish-like underwater sensing *Smart Mater. Struct.*, 21, 2012, 115030.
15. Zimmermann M., Volden T., Kirstein K.-U., Hafizovic S., Lichtenberg J., Brand O., Hierlemann A., A CMOS-based integrated-system architecture for a static cantilever array, *Sensors and Actuators B* 131, 2008, pp. 254–264.
16. Schomburg W. K., Introduction to Microsystem Design Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, pp. 21-84.
17. Kanda Y., A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon. *IEEE Trans Electron Devices* ED29, 1982, pp. 64–70.
18. Allen, J., Micro electro mechanical system design, Taylor & Francis Group, LLC, 2005.
19. French, P. F., Evans A. G. R., Piezoresistance in Polysilicon and Its Applications to Strain Gauges, *Solid-State Electronics*, 1989, 32 pp. 1–10.
20. Cao L., Kim T.S., Zhou J., Mantell S.C., Polla D.L., Calibration technique for MEMS membrane type strain sensors, *Proc. IEEE Symposium on Microelectronics*, 1999, pp. 204-210.

21. Huang C., Ahmed Naguib A., Elias Soupos E., Najafi K., A silicon micromachined microphone for fluid mechanics research, Journal of micromechanics and microengineering, Vol. 12, 2002, pp. 767-774.
22. 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.
23. Gianchandani Y. B., Tabata O., Zappe H. P., Comprehensive microsystems, Vol. 2, Elsevier, 2008.

# Въпроси?



**Благодаря за вниманието!**