

# Измервания в електрониката

---

# Съдържание

---

## 9. Измерване на неелектрически величини

# 9. Измерване на неелектрически величини

---

9.1. Увод

9.2. Класификация

9.3. Активни сензори

9.4. Пасивни сензори

## 9.4.3. Терморезистивни сензори

---

- 9.4.1. Мостови схеми
- 9.4.2. Сензори за дължини и ъгли
- 9.4.3. Терморезистивни сензори
- 9.4.4. Тензорезистори
- 9.4.5. Фотосъпротивления

## 9.4.1. Мостови схеми

### □ 9.4.1.1:

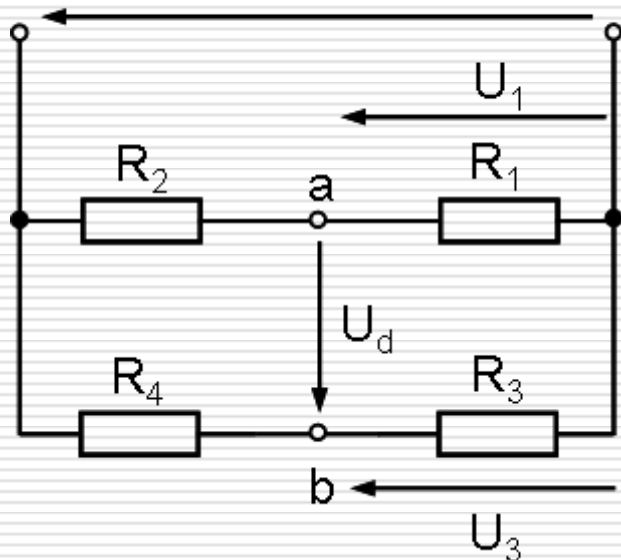
Уравновесен мост

$U_0$

$$U_1 = U_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_3 = U_0 \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

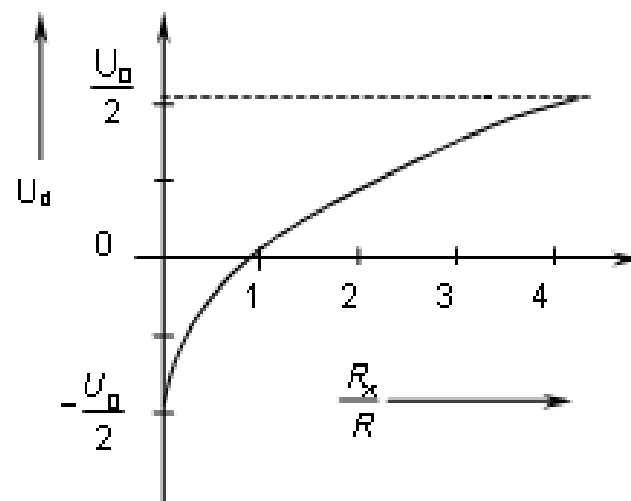
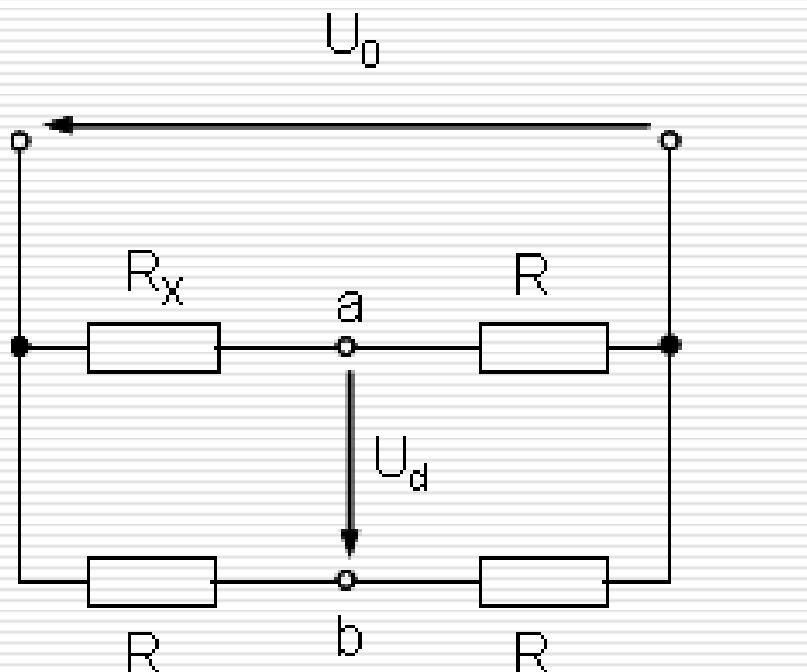
$$U_d = U_3 - U_1 = U_0 \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$



# 9.4.1. Мостови схеми

## □ 9.4.1.2: Неуравновесен мост

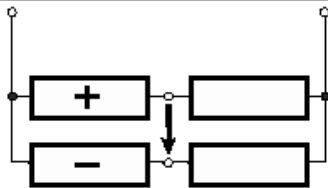
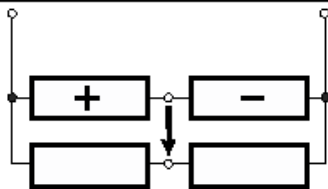
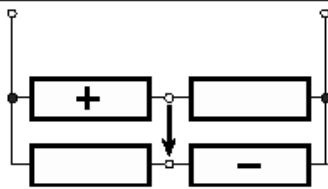
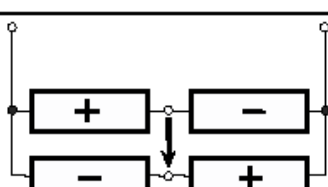
$$U_d = U_0 \left( \frac{1}{2} - \frac{R}{R + R_X} \right) = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{R_X - R}{R_X + R}$$



# 9.4.1. Мостови схеми

		$U_0$	$I_0$
1.		$U_d \approx + \frac{U_0}{4} \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d \approx \frac{I_0}{4} \Delta R$
2.		$U_d \approx - \frac{U_0}{4} \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d \approx - \frac{I_0}{4} \Delta R$
3.		$U_d \approx - \frac{U_0}{4} \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d \approx - \frac{I_0}{4} \Delta R$
4.		$U_d \approx \frac{U_0}{2} \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d = \frac{I_0}{2} \Delta R$

# 9.4.1. Мостови схеми

		$U_0$	$I_0$
5.		$U_d \approx \frac{U_0}{2} \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d = \frac{I_0}{2} \Delta R$
6.		$U_d = \frac{U_0}{2} \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d = \frac{I_0}{2} \Delta R$
7.		$U_d \approx -\frac{U_0}{4} \left( \frac{\Delta R}{R_0} \right)^2$	$U_d = -\frac{I_0}{4} \frac{\Delta R}{R_0} \Delta R$
8.		$U_d = U_0 \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d = I_0 \Delta R$



## 9.4.3.1: Метални терморезистори

---

- Намотки или тънки слоеве
- Мед, никел, Ni-Fe, Pt

$$R(\vartheta) = R_0(1 + \alpha\vartheta + \beta\vartheta^2 + \dots)$$

- $\alpha$  и  $\beta$  – константи, зависещи от материала

$$R(\vartheta) = R_0(1 + \alpha\vartheta)$$

$$E = \frac{dR}{d\vartheta} = R_0\alpha, \frac{\Omega}{K}$$

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{d\vartheta}, K^{-1}$$

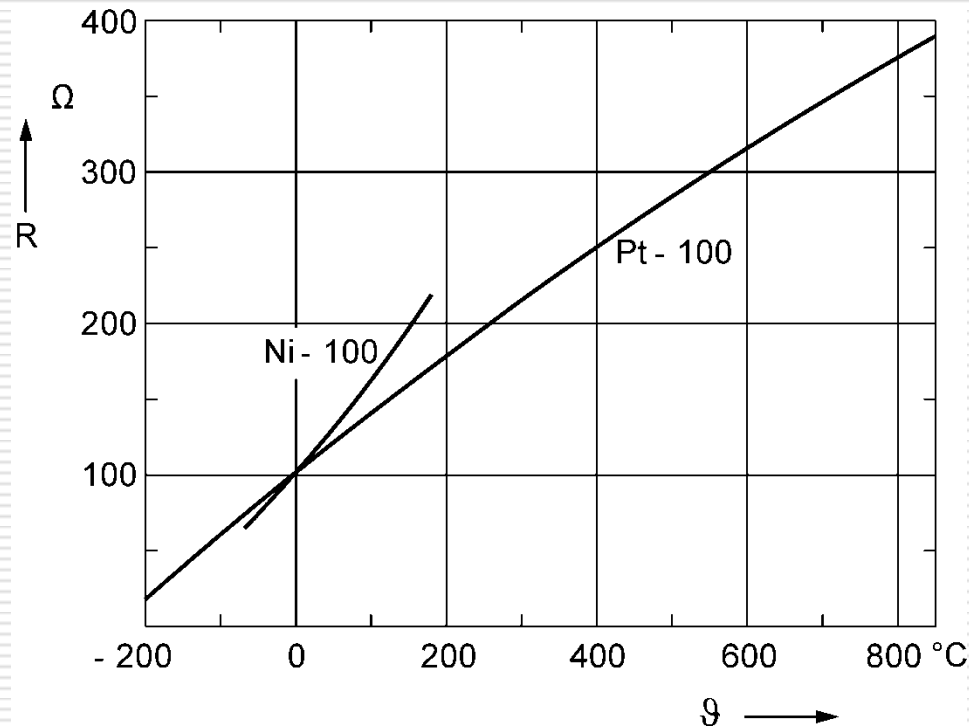
## 9.4.3.1: Метални терморезистори

### □ Характеристики

- Основни х-ки, класове и обхвати на работа са нормирани в DIN 43670 респ. IEC 751 .
- В обхвата 0 до 100°C за осреднените температурни коефициенти за Ni и Pt са валидни стойностите:
- $\alpha_{Ni} = 6,18 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  и  $\alpha_{Pt} = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
- За Pt са дефинирани два класа на точност (максимални отклонения на измерваната температура, от температурата определена чрез терморезисторите:
- Клас А:  $\pm (0,15 + 0,002|g|)^\circ\text{C}$
- Клас В:  $\pm (0,3 + 0,002|g|)^\circ\text{C}$

## 9.4.3.1: Метални терморезистори

- Характеристики на терморезистори от Pt и Ni



## Към 9.4.3.1: Задача терморезистори

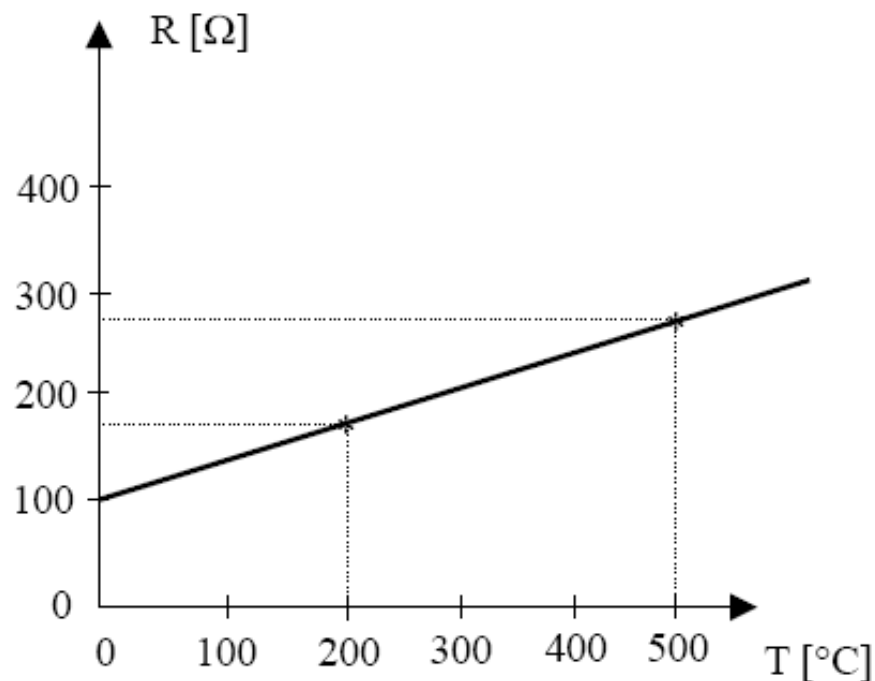
- Определяне на чувствителността на терморезистори от Pt в зададен температурен интервал (линейна апроксимация).
- Например за температурния интервал (200°C, 500°C):

$$\begin{array}{ll} T_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C} & R_1 = 175.86 \text{ } \Omega \\ T_2 = 500 \text{ }^\circ\text{C} & R_2 = 280.94 \text{ } \Omega \end{array}$$

$$\square \alpha_{(200, 500)} = \frac{(280.94 - 175.86) \text{ } \Omega}{(500 - 200) \text{ Kelvin}} = \frac{105.8 \text{ } \Omega}{300 \text{ Kelvin}} = 0.35 \frac{\Omega}{\text{Kelvin}}$$

## Към 9.4.3.1: Задача терморезистори

- Характеристика на терморезистор от Pt в зададен температурен интервал при линейна апроксимация ( $200^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$ ):



# Към 9.4.3.1: Задача терморезистори

## □ Измервателни схеми:

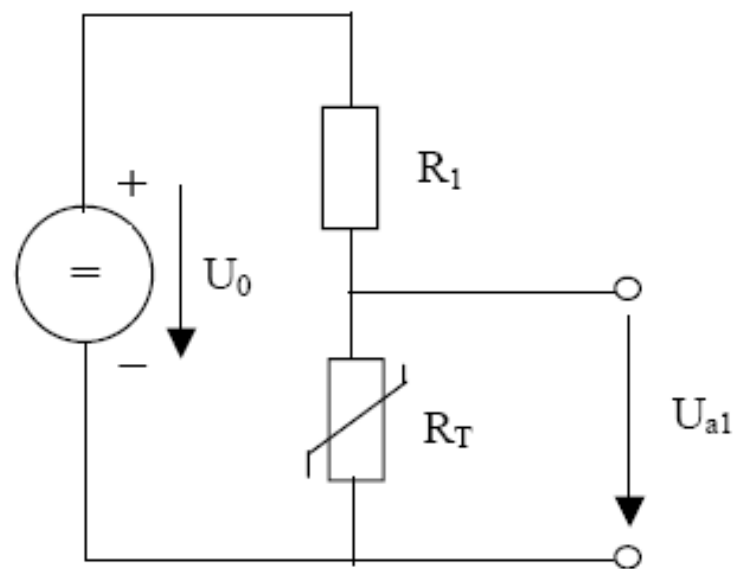
- 1) делител на напрежение

$$\frac{U_{a1}}{U_0} = \frac{R_T}{R_T + R_1}$$

$$U_{a1} = \frac{U_0}{1 + \frac{R_1}{R_T}}$$

$$R_T = R_0 [1 + \alpha \Delta T]$$

$$R_1 = 100 \Omega, \quad U_0 = 1V, \quad \alpha = 3.85 \cdot 10^{-3}/K$$



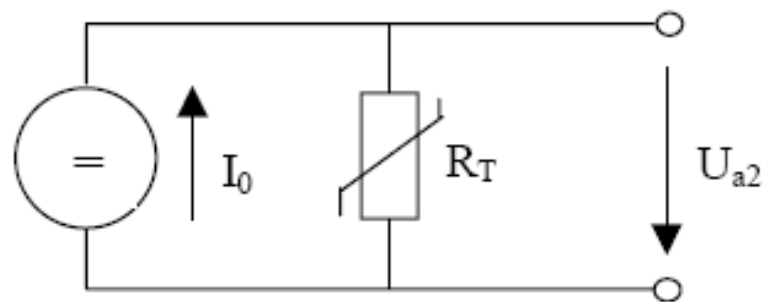
## Към 9.4.3.1: Задача терморезистори

□ Измервателни  
схеми:

■ 2) източник на ток

$$U_{a2} = I_0 * R_T \quad , \quad I_0 = 5 \text{ mA}$$

$$U_{a2} = 5 * 10^{-3} * R_T$$



## Към 9.4.3.1: Задача терморезистори

□ Сравнение:

T °C	0	50	100	150	200	250
R <sub>T</sub> Ω	100	119.25	138.5	157.7	177	196.2
U <sub>a1</sub> V	0.5	0.54	0.58	0.61	0.64	0.66
U <sub>a2</sub> V	0.5	0.596	0.692	0.788	0.885	0.981



## 9.4.3.2: NTC/Термистори

---

- Материали: поликристални смеси от синтеровани метални оксиди, напр.:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Zn}_2\text{TiO}_4$ ,  $\text{MgCr}_2\text{O}_4$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{NiO}$  &  $\text{CoO}$  с  $\text{Li}_2\text{O}$  (температура на синтероване: 1000 ... 1400°C)
- Ефект: Зърнести структури ограничават подвижността, с повишаване на температурата  $\Rightarrow$  повишаване на подвижността  $\mu$
- Приложение до 400°C
- За зависимостта на съпротивлението  $R$  от температурата  $T$  е валидна връзката:

$$R(T) = R_0 \cdot e^{b\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

## 9.4.3.2: NTC

---

- $b$  = материална константа в К;  $R_0$  = Съпротивление при температура  $T_0$ .

$$K_0 = R_0 \cdot e^{-b/T_0}$$

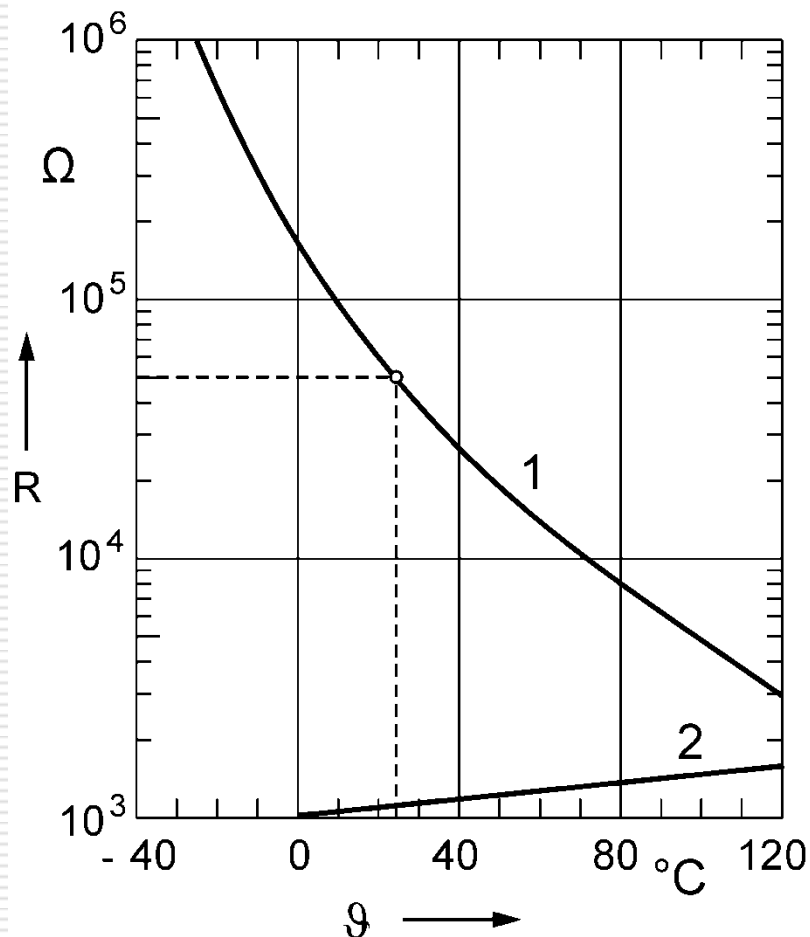
$$R = R_0 \cdot e^{b/T} \cdot e^{-b/T_0} = K_0 \cdot e^{b/T}$$

$$E = \frac{dR}{dT} = K_0 \cdot e^{b/T} \cdot \left( -\frac{b}{T^2} \right) = -\frac{b}{T^2} R, \frac{\Omega}{K}$$

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{b}{T^2}, K^{-1}$$

- Около  $4 \cdot 10^{-2} K^{-1}$  (около 10 пъти по-голяма отколкото при Pt).

## 9.4.3.2: NTC



- 1 – Характеристика NTC (номинално съпротивление 50 k $\Omega$ )
- 2 – платинен терморезистор (Номинално съпротивление 1000  $\Omega$ )

## 9.4.3.2: Сравнение NTC - терморезистори

---

NTC се различават от металните терморезистори в следните аспекти:

- ❑ Температурният коефициент е отрицателен;
- ❑ Температурният коефициент и чувствителността са около 10-пъти по –големи от тези на платинените терморезистори;
- ❑ Нелинейността е по-голяма;
- ❑ Съпротивлението е от такъв порядък, че съпротивленията на свързващите проводници могат да се пренебрегнат;
- ❑ Термисторите се реализират като малки перли; техните времеконстанти са по-малки от тези на металните терморезистори и са подходящи за извършване на точкови измервания на температура;
- ❑ Толерансите при производството са значителни и налагат извършване на калибриране.

## 9.4.3.3: Позистори/РТС

---

- Полупроводников материал с фероелектрически свойства (напр. бариев титанат), който при ниски температури има характеристика, подобна на термистор (NTC).
- Структура с обеднени слоеве, едва след надхвърляне на температурата на Кюри слоевете се редуцират
- Над температурата на Кюри съпротивлението се покачва рязко в тесни температурни граници (РТС).
- Температурният коефициент в тези граници значително надхвърля този на NTC.

## 9.4.3.3: Позистори/РТС

---

- За зависимостта на съпротивлението  $R$  от температурата  $T$  е валидна връзката:  
( $b$  = материална константа,  $K^{-1}$ ;  $R_0$  = съпротивление при температура  $T_0$ )

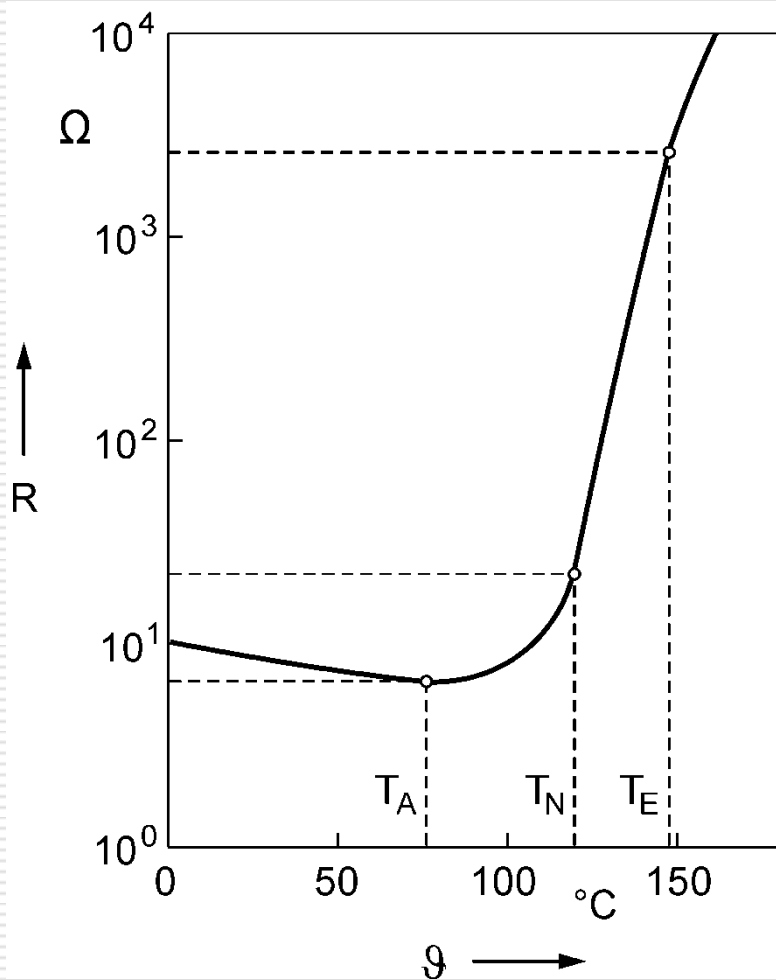
$$R = R_0 \cdot e^{b(T - T_0)}$$

$$E = \frac{dR}{dT} = bR_0 \cdot e^{b(T - T_0)} = bR, \frac{\Omega}{K}$$

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = b, K^{-1}$$

- приблизително  $0,24 K^{-1}$  (около 5 пъти по-голяма в сравнение с NTC).

## 9.4.3.3: PTC



**Характеристика на PTC**

## 9.4.4.: Тензорезистори

---

- Съпротивлението на електрически проводник  $R$  зависи от неговата дължина  $l$ , напречно сечение  $q$  и специфично съпротивление  $\rho$ :

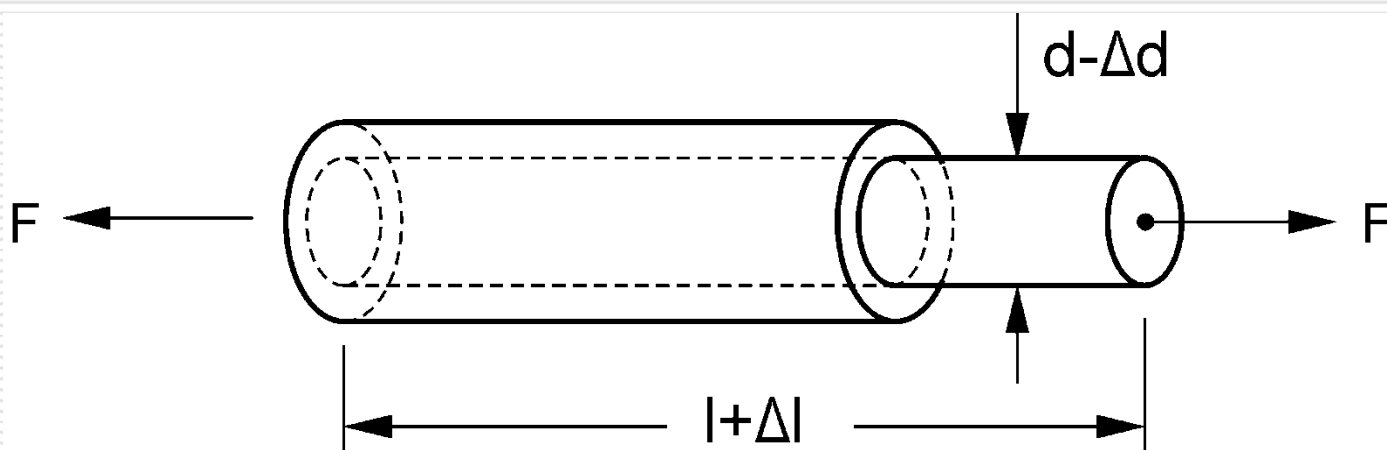
$$R = \frac{l}{q} \rho$$

- При механични въздействия могат да се променят и трите параметъра, което води до изменение на  $R$ .
- От изменението на  $R$  може да се съди за големината на предизвикалото го въздействие.



## 9.4.4.: Тензорезистори

- Изменение на формата на цилиндричен проводник с дължина  $l$  и напречно сечение  $d$



$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta q}{q} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

## 9.4.4.: Тензорезистори

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - 2 \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

- Чрез делене относителното изменение на дължината

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = 1 - 2 \frac{\frac{\Delta d}{d}}{\frac{\Delta l}{l}} + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}}$$

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}$$

$$\mu = - \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l}$$

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta l/l}$$

## 9.4.4.: Тензорезистори

---

### Метални тензорезистори

- Металите имат пренебрежимо малко изменение на специфичното съпротивление при еластични деформации .
- $\mu$  за повечето метали е между 0,2 и 0,5, оттук за  $K$  се получават стойности около 2:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = 1 + 2\mu \approx 1 + 2 \cdot 0,5 = 2$$

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \approx 2\varepsilon$$

## 9.4.4.: Тензорезистори

---

### Полупроводникови тензорезистори

- $\mu$  за полупроводниците достига стойности над 100;
- Проблем е силната температурна зависимост.

$$\rho = \frac{1}{e * N_D * \mu_n}$$

За n-полупроводници

$$\rho = \frac{1}{e * N_A * \mu_p}$$

За p-полупроводници

# 9.4.4.: Тензорезистори

---

## Полупроводникови тензорезистори

- $\mu$  за полупроводниците достига стойности над 100;
- Проблем - силна температурна зависимост.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{T_0}{T_1} C_1 \varepsilon + \left( \frac{T_0}{T_1} \right)^2 C_2 \varepsilon^2 + \dots$$

$T_0$  – базова температура,

$T_1$  – актуална температура,

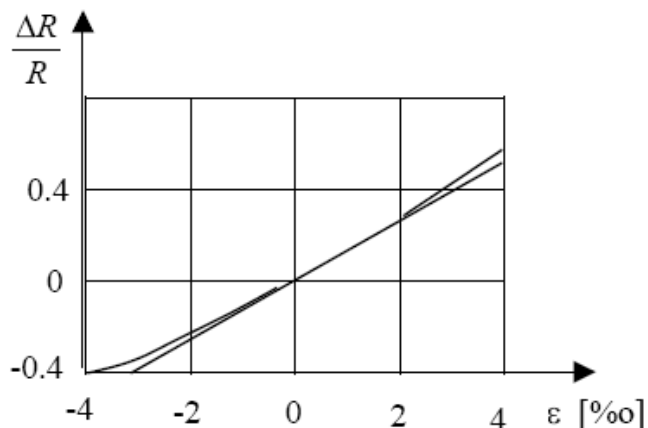
$C_1$  и  $C_2$  – константи.

## 9.4.4.: Тензорезистори

### За силиций с р-проводимост и с п-проводимост

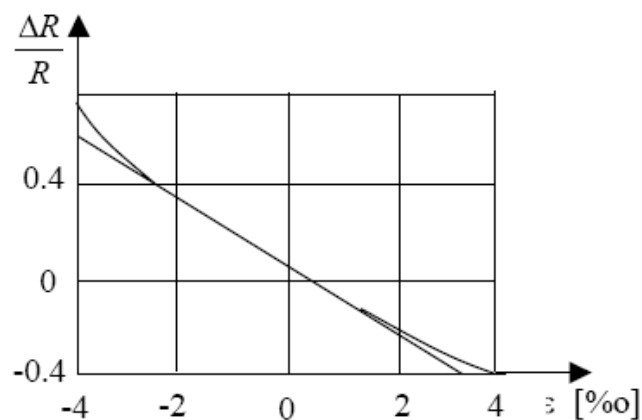
$$\rho_p = 0.02 \Omega\text{cm}, C_1=120, C_2=4*10^3$$

$$\frac{\Delta R}{R} = 120 * \varepsilon + 4000 * \varepsilon^2$$



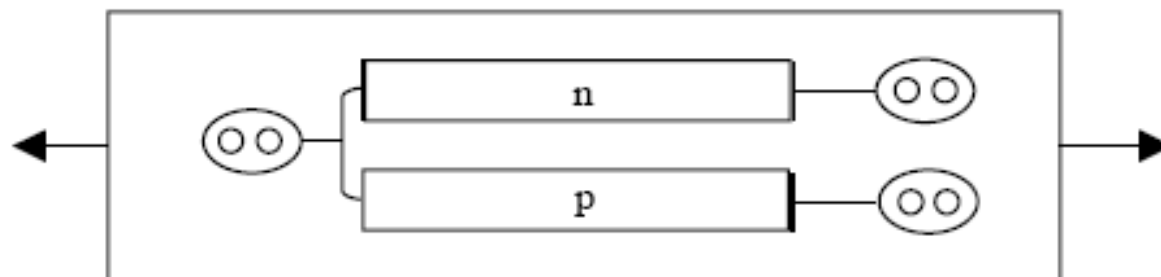
$$\rho_n = 0.03 \Omega\text{cm}, C_1=-110, C_2=10^4$$

$$\frac{\Delta R}{R} = -110 * \varepsilon + 10^4 * \varepsilon^2$$



## 9.4.4.: Тензорезистори

### Реализация



## 9.4.4.: Тензорезистори - приложение

---

- Измерване на нормално механично напрежение

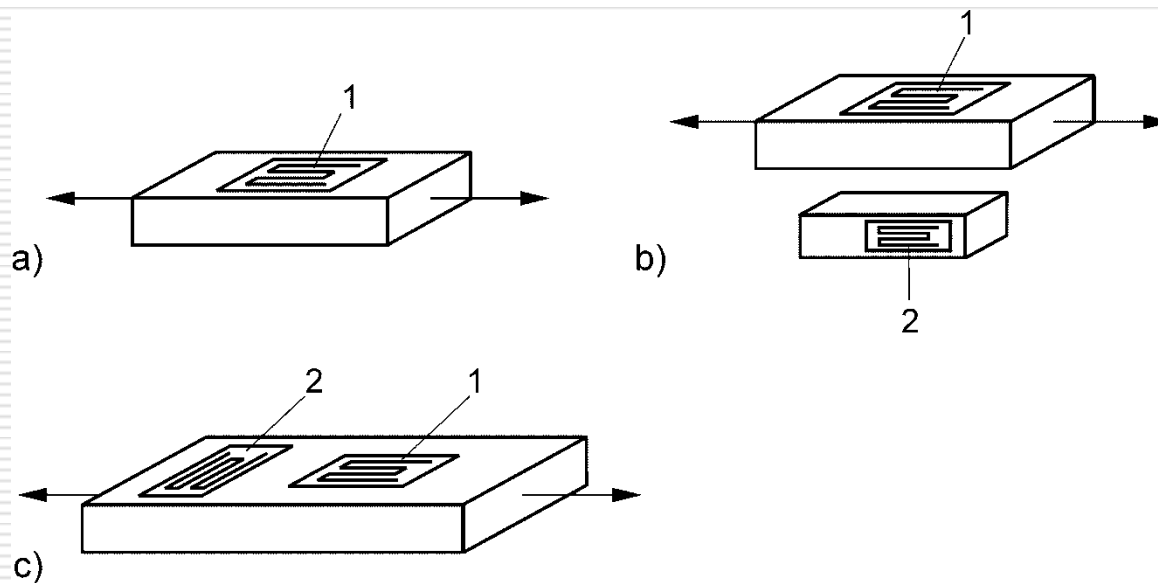
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

- Закон на Хук - механично напрежение и относителното удължение са пропорционални.
- $E$  – модул на еластичност:

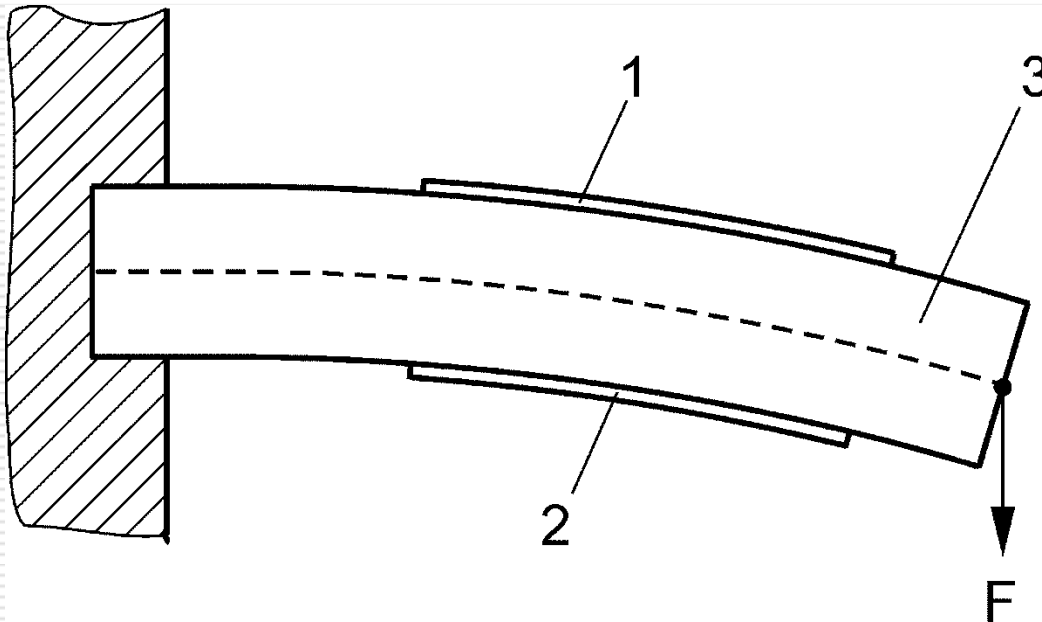
$$\sigma = E\varepsilon$$



# 9.4.4.: Тензорезистори - приложение



## 9.4.4.: Тензорезистори - приложение

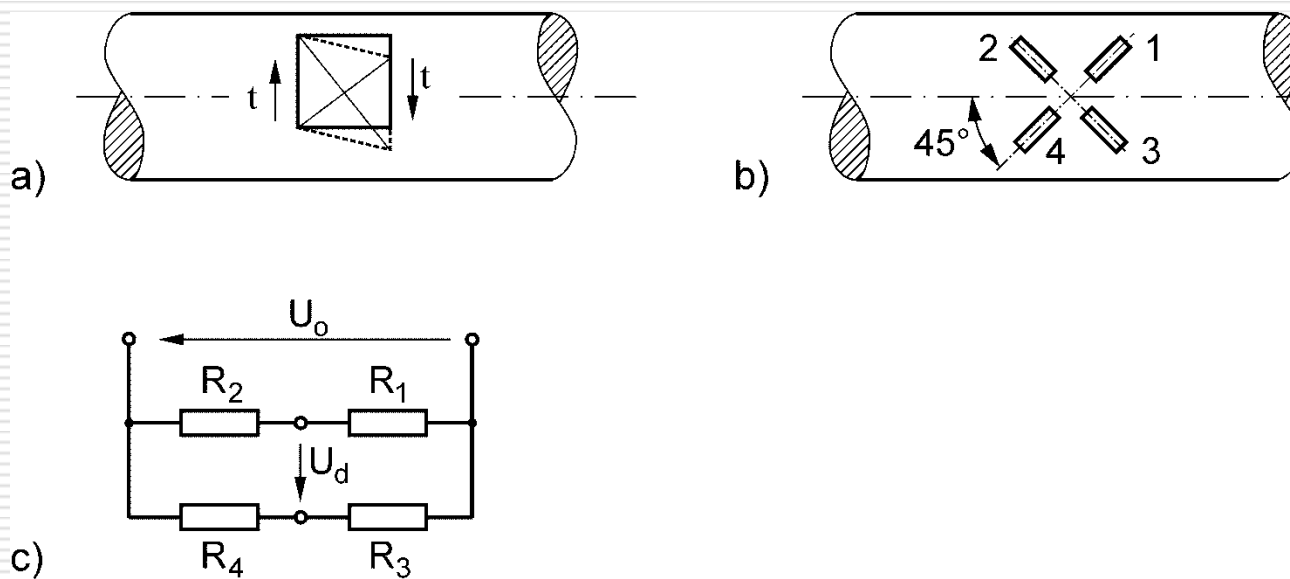


### Измерване на огъващо напрежение:

- 1 – тензорезистор подложен на опън,
- 2 – тензорезистор подложен на натис

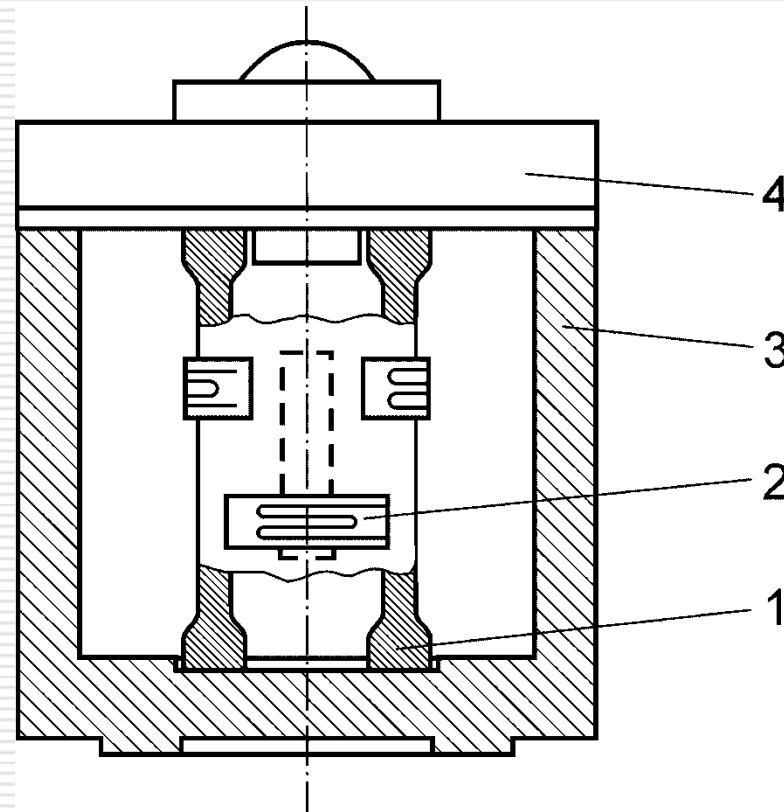
# 9.4.4.: Тензорезистори - приложение

## Измерване на торзионно напрежение

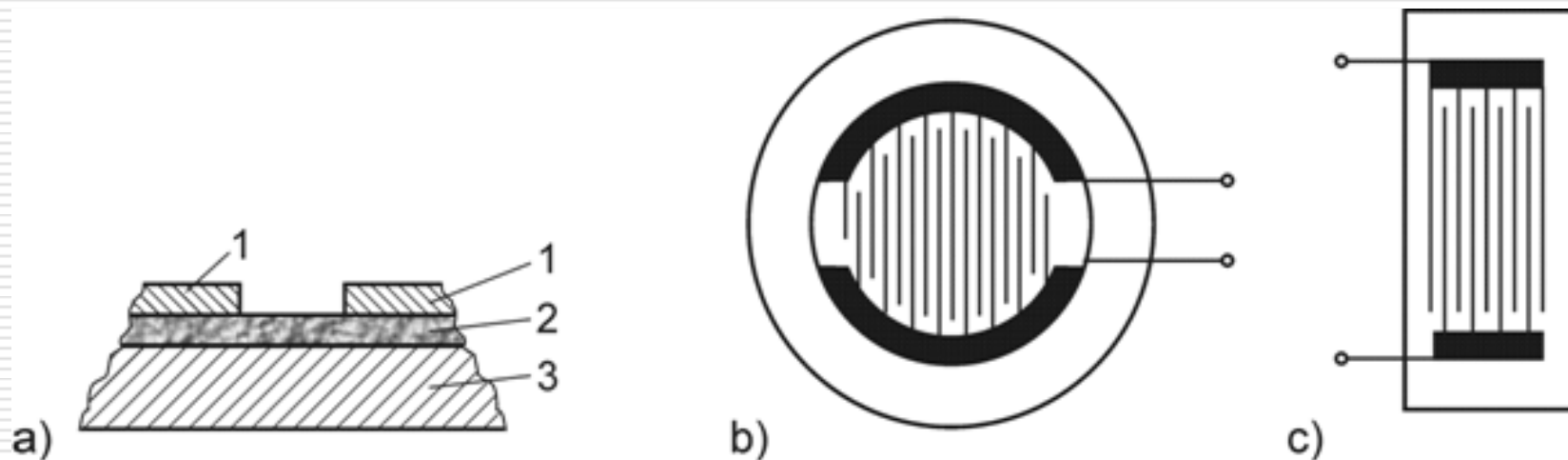


## 9.4.4.: Тензорезистори - приложение

- Индустриален сензор за измерване на тегло:
  - 1 – цилиндър,
  - 2 – тензорезистори,
  - 3 – корпус,
  - 4 – капак.



# Фотосъпротивления



## Фотосъпротивление

**a)** Разрез с електроди **(1)**, чувствителен полупроводников слой, **(2)** стъклена подложка **(3)**

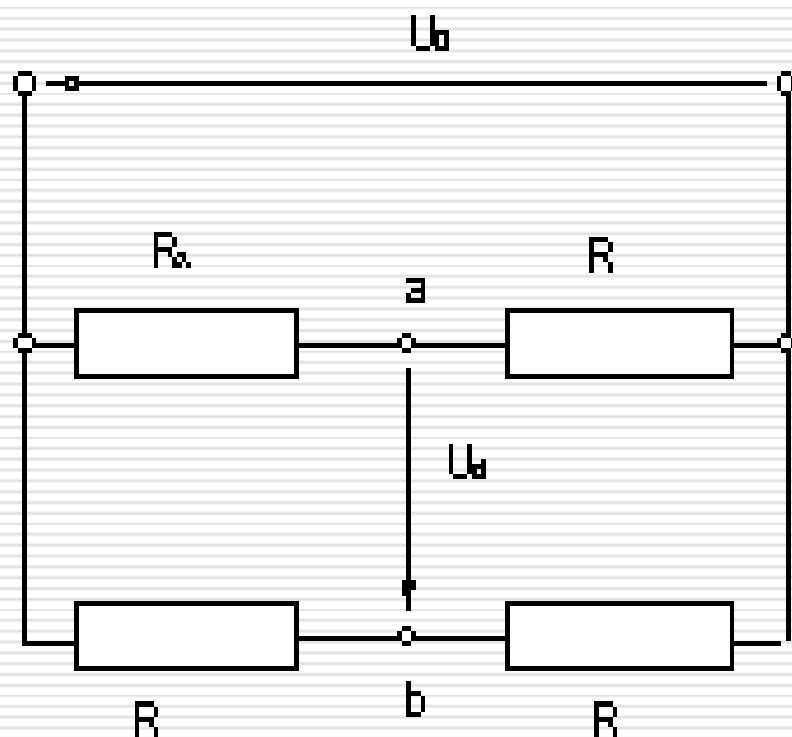
**b)** и **c)** поглед отгоре

# Тензорезистори - задача

**Задача.** Тензорезисторът  $R_x$  е включен в показаната на фигурата мостова схема.

1. Изчислете предавателната функция  $U_d = f(R_x)$ .

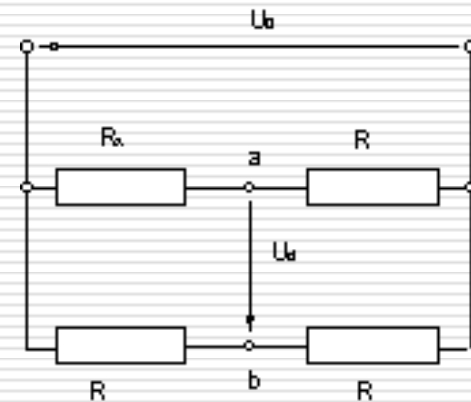
2. Изчислете чувствителността  $E = f(R_x)$ .



# Тензорезистори - задача

1.  $U_d = f(R_x)$ .

$$U_d = U_0 \left( \frac{1}{2} - \frac{R}{R + R_x} \right)$$



2. Изчислете чувствителността  $E = f(R_x)$ .

$$E = \frac{dU_d}{dR_x} = U_0 \left( 0 - \frac{R(-1)}{(R + R_x)^2} \right)$$

# Тензорезистори - задача

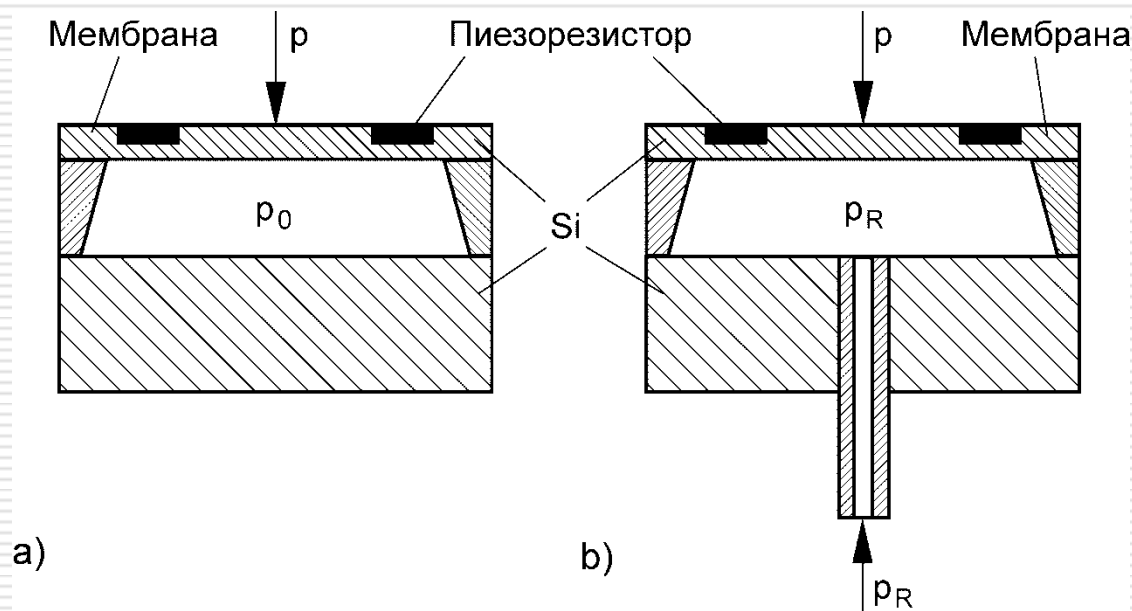
---

- ❑ С два тензорезистора се измерва големината на сила, въздействаща върху деформираща се греда. Тензорезисторите могат да се монтират така, че да са подложени на сила на опън ( $R+\Delta R$ ) или на натиск ( $R-\Delta R$ ).
- ❑ Изберете вида на въздействието, на което да се подложат сензорите и ги включете в мостова схема така, че диагоналното напрежение на моста да е линейно (при захранване с постоянен ток или с постоянно напрежение) и с максимална чувствителност спрямо въздействието на измерваната сила.



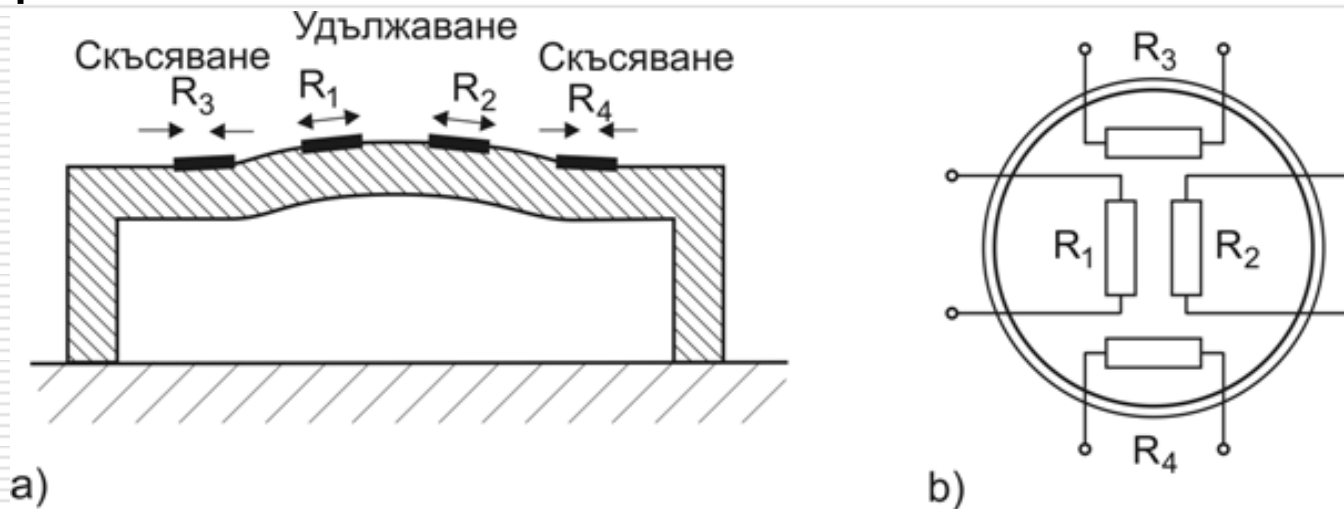
# Полупроводникови сензори за налягане

- Принципна структура на пиезорезистивни сензори за измерване на а) абсолютно и б) диференциално налягане



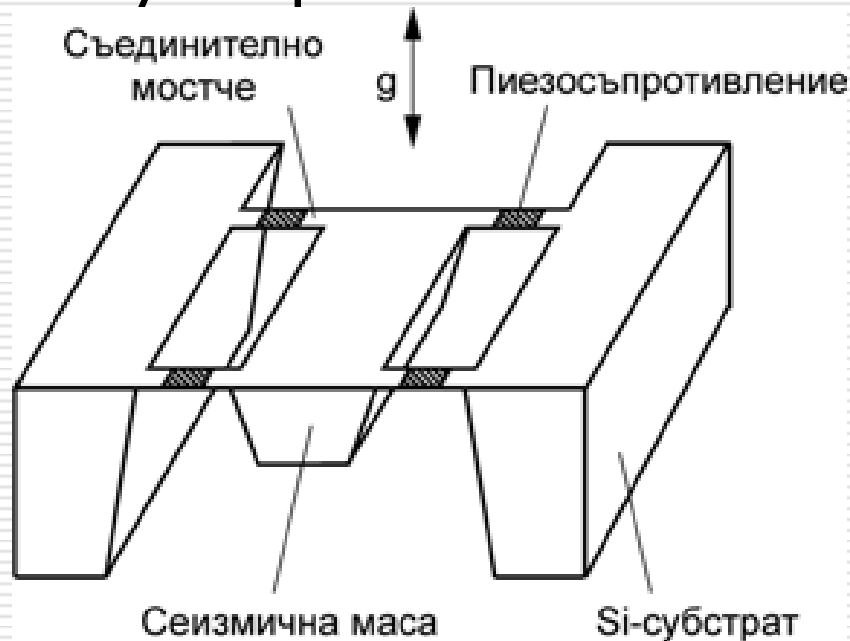
# Полупроводникови сензори за налягане

- Пиезорезистори, разположени върху мембрана с области на скъсяване и удължаване



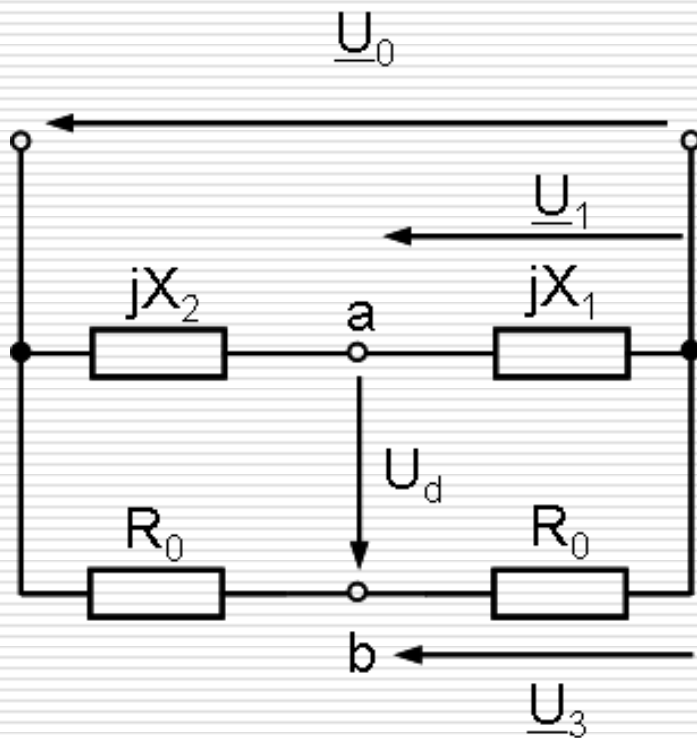
# Пиезорезистивни, пиезоелектрически и микромеханични акселерометри

- Устройство на пиезорезистивен сензор за ускорение



# Неуравновесен мост с променливотоково захранване

- Мост с реактивни съпротивления  $X_1$ ,  $X_2$  и активни съпротивления  $R_0$



$$\underline{U}_d = \underline{U}_0 \frac{j(X_2 - X_1) R_0}{j(X_2 + X_1) 2R_0} = \frac{\underline{U}_0}{2} \frac{j(X_2 - X_1)}{j(X_2 + X_1)}$$

$$\underline{U}_d = \frac{\underline{U}_0}{2} \frac{\Delta X}{2X_0 + \Delta X} \approx \frac{\underline{U}_0}{4X_0} \Delta X$$

□ за

$$X_1 = X_0 \quad X_2 = X_0 + \Delta X$$

# Неуравновесен мост с променливотоково захранване

---

□ За капацитивни сензори:

$$U_d = \frac{U_0}{2} \left( \frac{-1/\omega C_2 + 1/\omega C_1}{-1/\omega C_2 - 1/\omega C_1} \right) = \frac{U_0}{2} \left( \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \right)$$

за  $X_i = -1/\omega C_i$

# Неуравновесен мост с променливотоково захранване

---

□ За диференциални кондензатори:

$$\underline{U}_d = \frac{\underline{U}_0}{2} \left( \frac{C_0 - \Delta C - C_0 - \Delta C}{C_0 - \Delta C + C_0 + \Delta C} \right) = -\frac{\underline{U}_0}{2C_0} \Delta C.$$

□ За индуктивни сензори:

$$\underline{U}_d = \frac{\underline{U}_0}{2} \cdot \frac{\omega(L_0 + \Delta L - L_0 + \Delta L)}{\omega(L_0 + \Delta L + L_0 - \Delta L)} = \frac{\underline{U}_0}{2L_0} \Delta L.$$

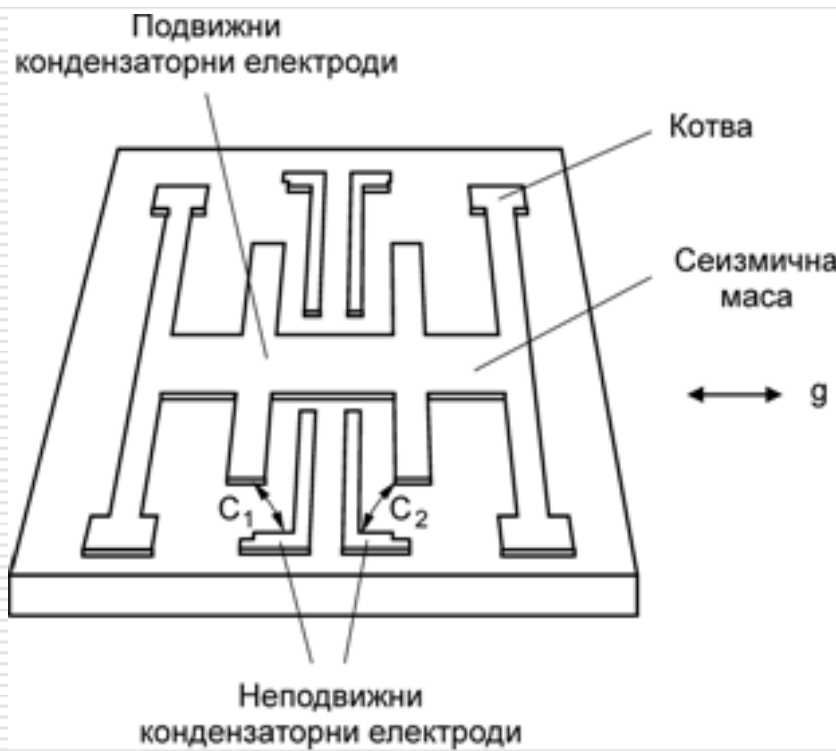
# Пиезорезистивни, пиезоелектрически и микромеханични акселерометри

## □ Сравнение на основни параметри на сензори за ускорение

	Пиезорезистивен	Пиезоелектричен	Капацитивен
Размер	Среден	Среден	Малък
Чувствителност	Средна	Средна	Висока
Статична реакция	Да	Не	Да
Товароспособност	Ниска	Висока	Висока
Температурен обхват	Среден	Широк	Широк
Отместване, в следствие на удар	Не	Да	Не
Функции за самотестване	Капацитивни	Възможна	Да
Мех. Филтриране на трептения	Да	Не	Да

# Микромеханични акселерометри

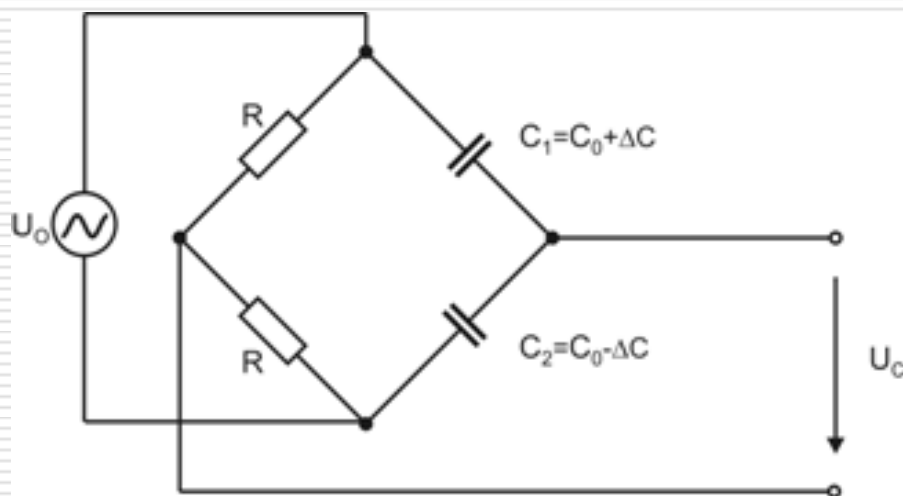
- Устройство на капацитивен сензор за ускорение с подвижен среден електрод





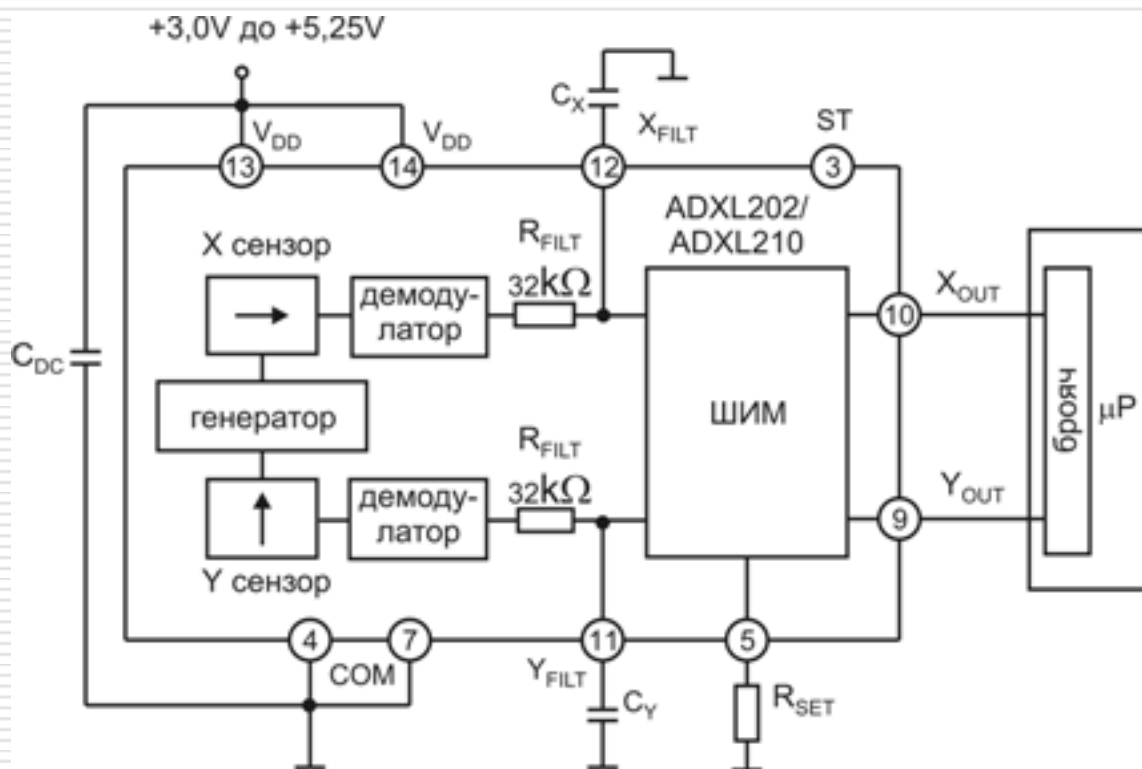
# Микромеханични акселерометри

- Мостова схема с диференциален кондензатор



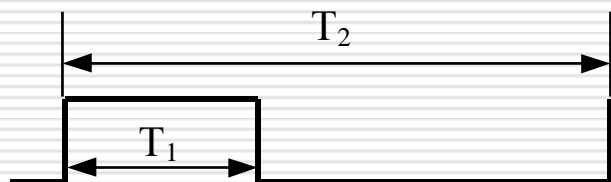
# Микромеханични акселерометри

## □ Блок-схема на ADXL202/210



# Микромеханични акселерометри

- Ускорението се кодира в коефициента на запълване на изходния сигнал. Тук  $T_1$  е времето, през което изходния сигнал е с високо логическо ниво, а  $T_2$  е продължителността на цикъла



$$\text{Ускорение, } g = \frac{\frac{T_1}{T_2} - 50\%}{12,5\%}$$

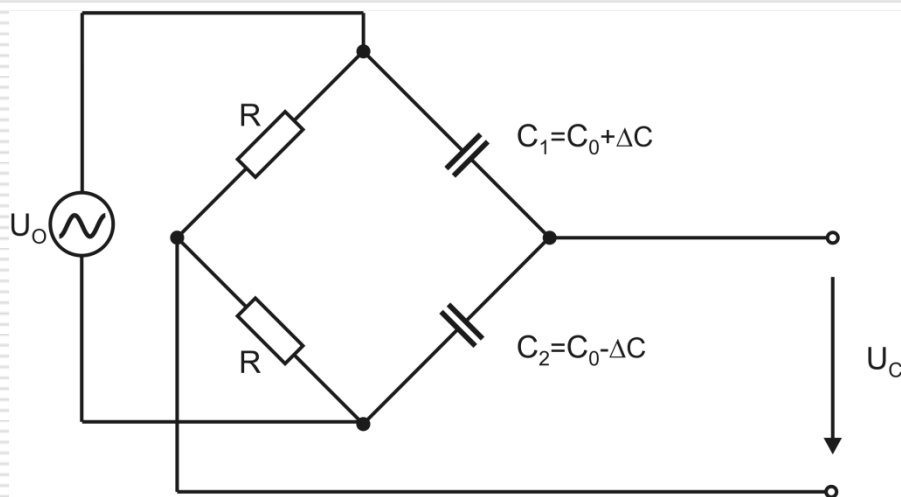
$$T_2 = R_{\text{SET}} / 125 \text{ M}\Omega$$

$$0 \text{ g} = 50\%.$$

# Задача капацитивни сензори

**Сензор за ускорение използващ диференциалния кондензаторен принцип.**

- За мостовата схема показана на фигурата изведете зависимостта изходното напрежение  $U_D$  от изменението на капацитета  $\Delta C$ .
- Изчислете стойността на изходното напрежение  $U_{II}$  за  $\Delta C = 0$  и  $\Delta C = 1 \text{ pF}$ , ако  $C_0 = 10 \text{ pF}$ , а  $U_0 = 5 \text{ V}$ .



# Задача капацитивни сензори

$$U_d = U_R - U_{C_2} = \underline{U}_0 \frac{R}{2R} - \underline{U}_0 \left( \frac{1}{\frac{j\omega C_2}{1} + \frac{1}{j\omega C_1}} \right)$$

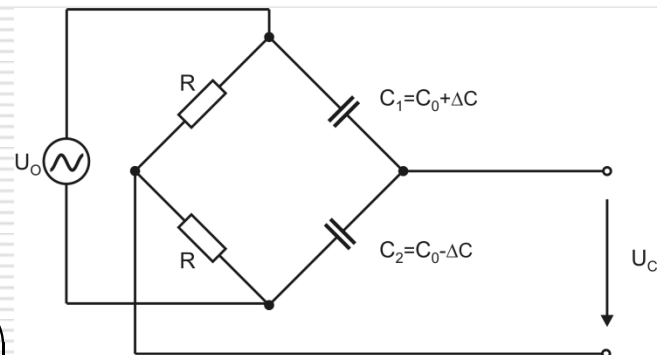
$$U_d = \frac{\underline{U}_0}{2} - \underline{U}_0 \frac{\frac{1}{C_2}}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_1}} = \underline{U}_0 \left( \frac{1}{2} - \frac{C_1}{C_2 + C_1} \right) = \frac{\underline{U}_0}{2} \left( \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} \right)$$

за  $C_1 = C_0 + \Delta C$  и  $C_2 = C_0 - \Delta C$

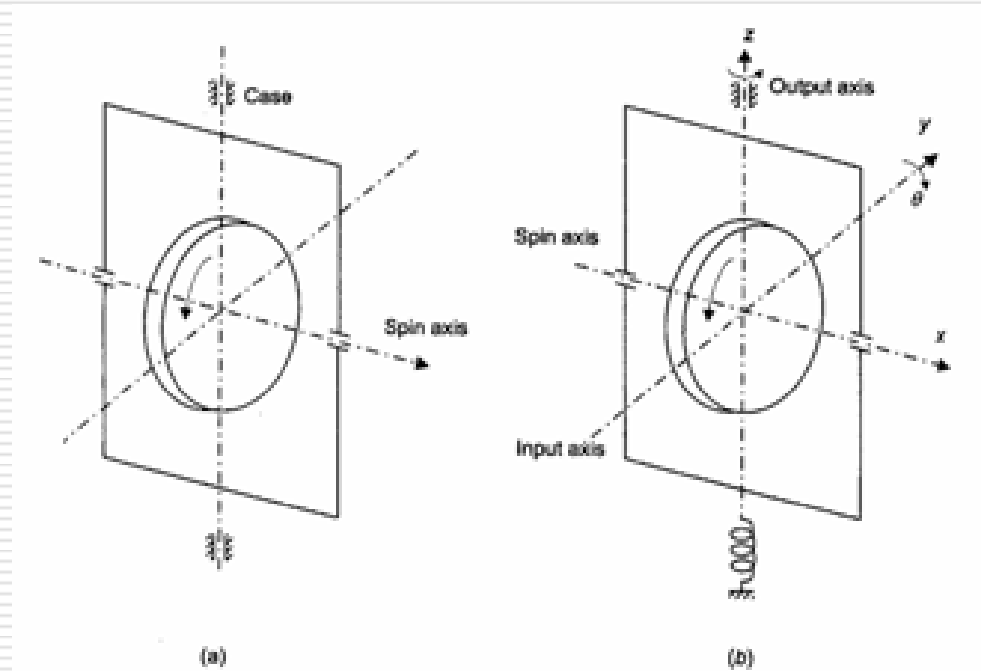
$$U_d = \frac{\underline{U}_0}{2} \left( \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} \right) = \frac{\underline{U}_0}{2} \left( \frac{(C_0 - \Delta C) - (C_0 + \Delta C)}{(C_0 - \Delta C) + (C_0 + \Delta C)} \right)$$

$$|U_d| = \frac{\underline{U}_0}{2} \frac{\Delta C}{C_0}$$

$$\text{за } \Delta C = 0 \rightarrow U_d = 0 \quad \Delta C = 1\text{pF} \rightarrow U_d = 250 \text{ mV}$$



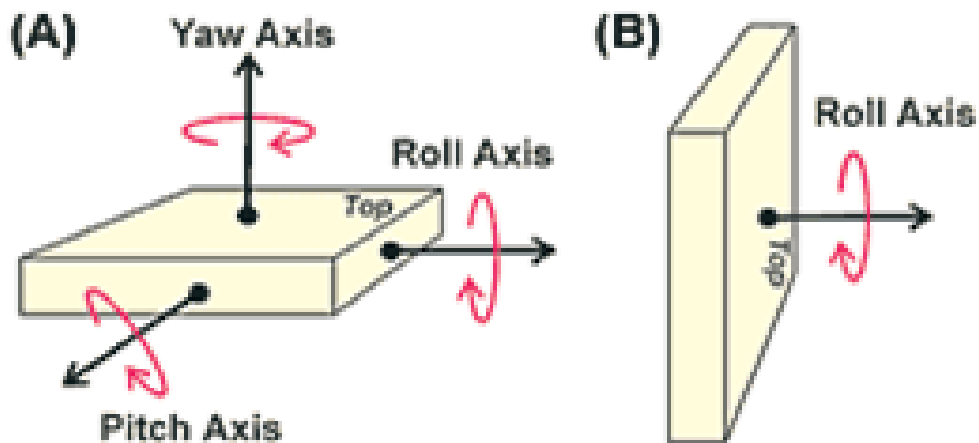
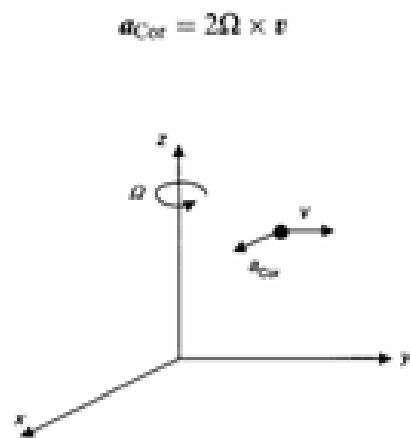
# Жироскопи - примери



## Механичен жирокоп.

- а) Въртящ се диск определя оста  $x$ .
- б) Въртене около ос  $y$  – перпендикулярна на ос  $x$ , предизвиква въртящ момент по ос  $z$  – перпендикулярна на  $x$  и  $y$ .

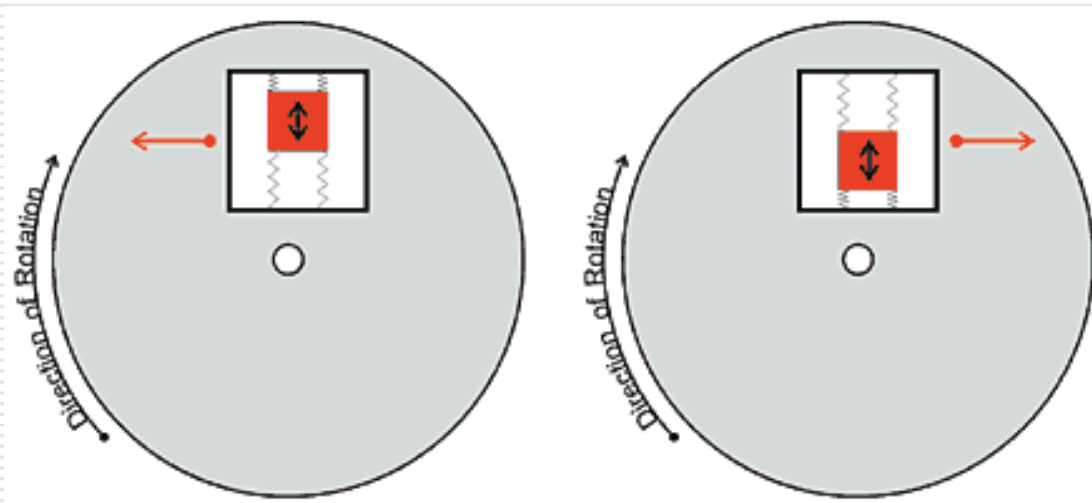
# Жироскопи - примери



**Кориолисово ускорение**

**В зависимост от дизайна,  
жироскопът може да измерва ъглови  
ускорения по една от трите  
пространствени оси**

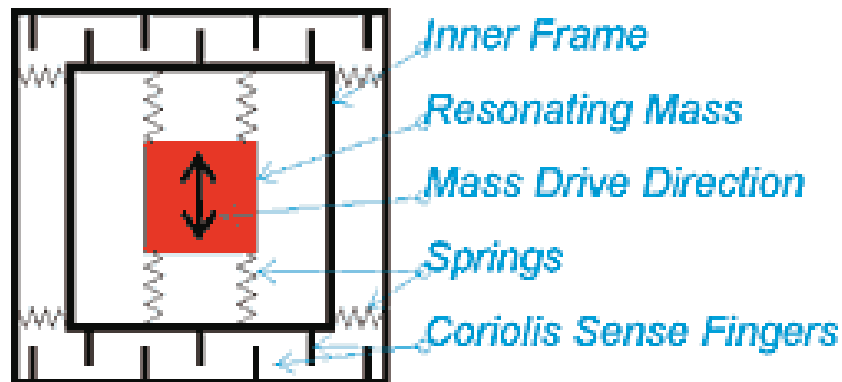
# Жироскопи - примери



- Въздействие на Кориолисовото ускорение върху резонираща маса от силиций, окачена в рамката.
- С червените стрелки е показано въздействието на силата върху структурата в зависимост от положението на резониращата маса.

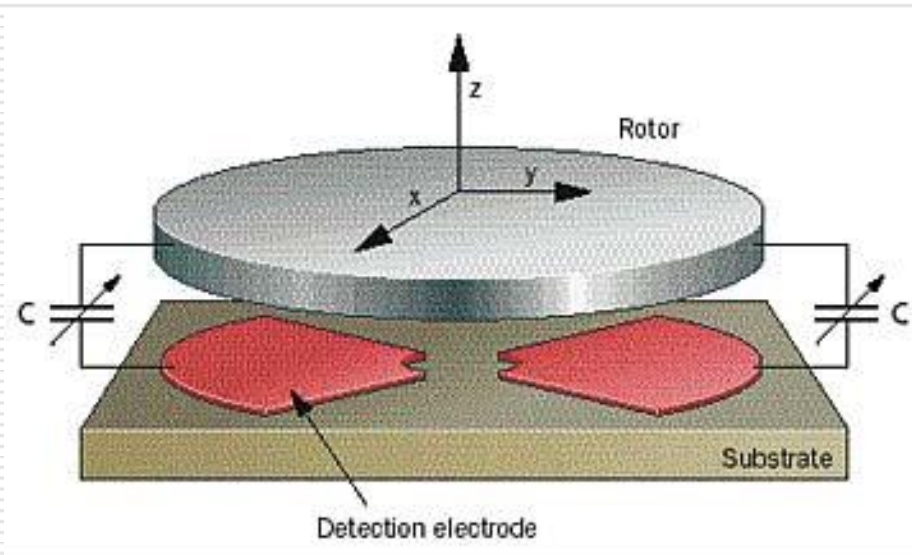


# Жироскопи - примери



- За измерване на Кориолисовото ускорение рамката, в която се намира резониращата маса се свързва към субстрата с пружини, разположени перпендикулярно на посоката на движение на резониращата маса. Чрез електроди, разположени на рамката и на субстрата се създават капацитивни структури.

# Жироскопи - примери



# Жироскопи - примери

