

# Projektovanje IoT sistema

## Senzori

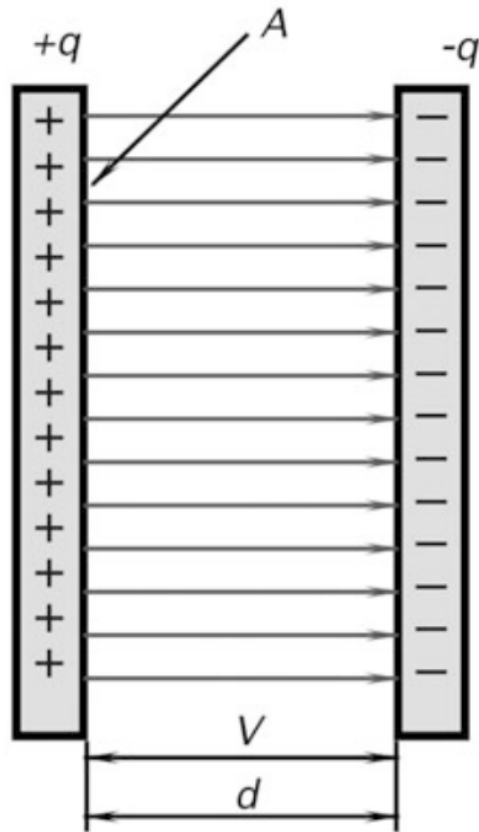
Vladimir Rajović, prema  
*J.Fraden Handbook of Modern Sensors*

# Fizički principi merenja

- Od interesa senzori koji konvertuju neelektričnu u električnu veličinu

# Fizički principi merenja

- **Kapacitivnost / kondenzator**



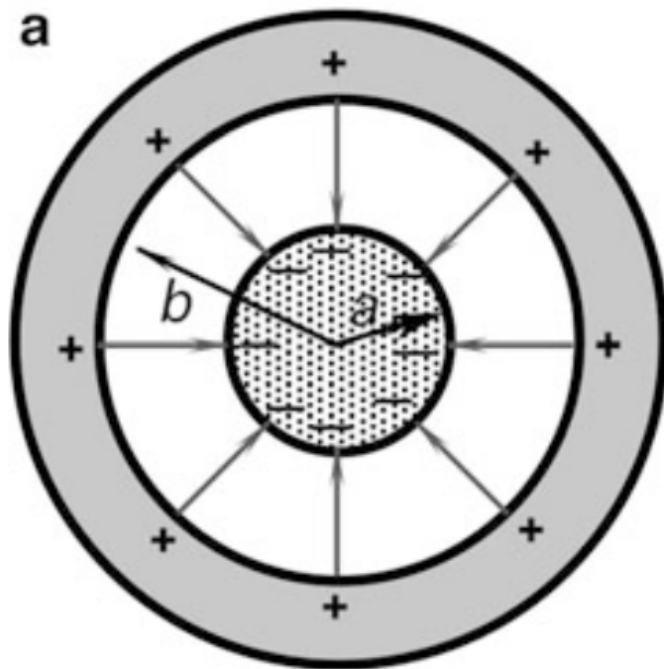
$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

- Da bi se napravio kapacitivni senzor potreban je loš kondenzator 😊 (dobar kondenzator je otporan na uslove okoline)
- Kod kapacitivnog senzora kapacitivnost je modulirana spoljašnjom pobudom ili signalom sa izlaza posrednog pretvarača
- Promenom geometrije menja se kapacitivnost

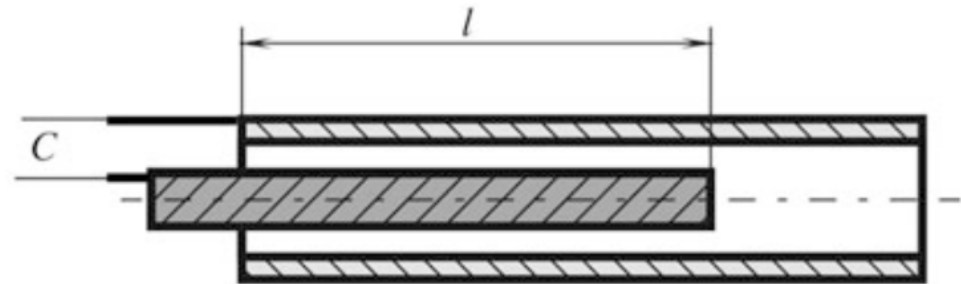
# Fizički principi merenja

- **Kapacitivnost / kondenzator**

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln\frac{b}{a}}$$



- Cilindrični kondenzator, i mogućnost realizacije merača pomeraja (koaksijalna struktura ipak problem u integrisanoj tehnologiji)



# Fizički principi merenja

- **Kapacitivnost / kondenzator**

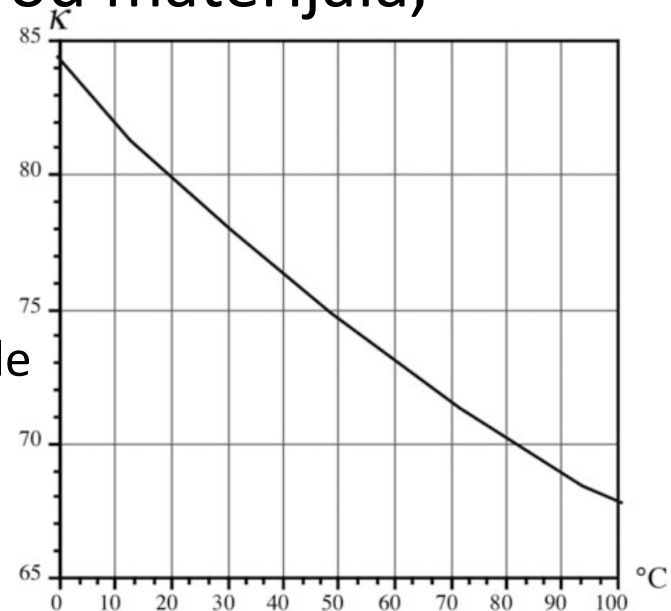
- Ako između elektroda nije vakuum

$$C = \varepsilon_0 \kappa G$$

- $\kappa$  dielektrična konstanta,  $G$  faktor geometrije

- Dielektrična konstanta zavisi od materijala, temperature, vlage, učestanosti...

- Zavisnost dielektrične konstante vode od temperature →



# Fizički principi merenja

- **Kapacitivnost / kondenzator**

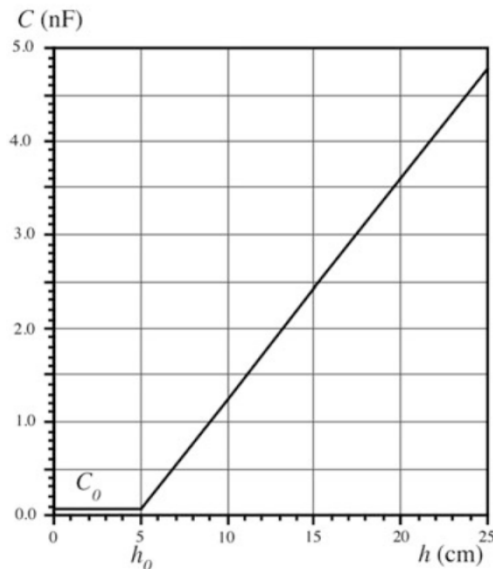
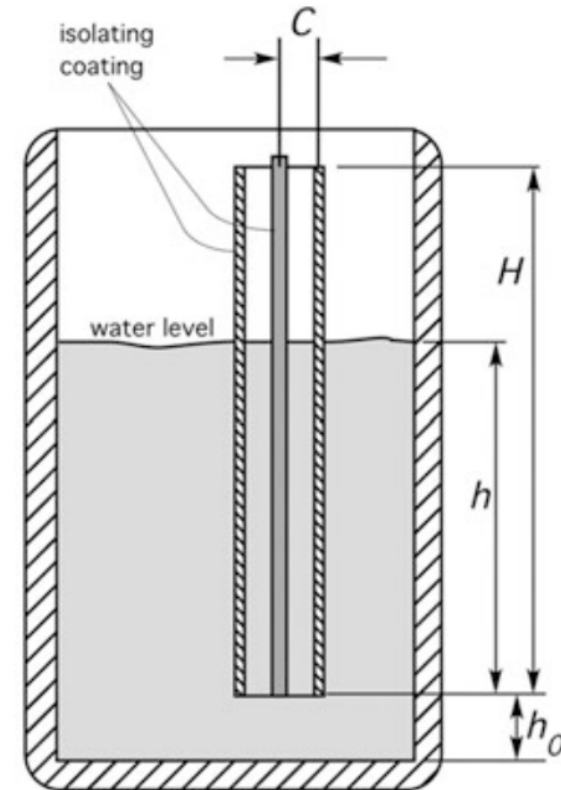
- Kapacitivni senzor nivoa vode

- Ukupna kapacitivnost

$$C_h = C_1 + C_2 = \varepsilon_0 G_1 + \varepsilon_0 \kappa G_2$$

$$C_h = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{b}{a}} [H + h(\kappa_w - 1)]$$

$$C_{\min} = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{b}{a}} H$$



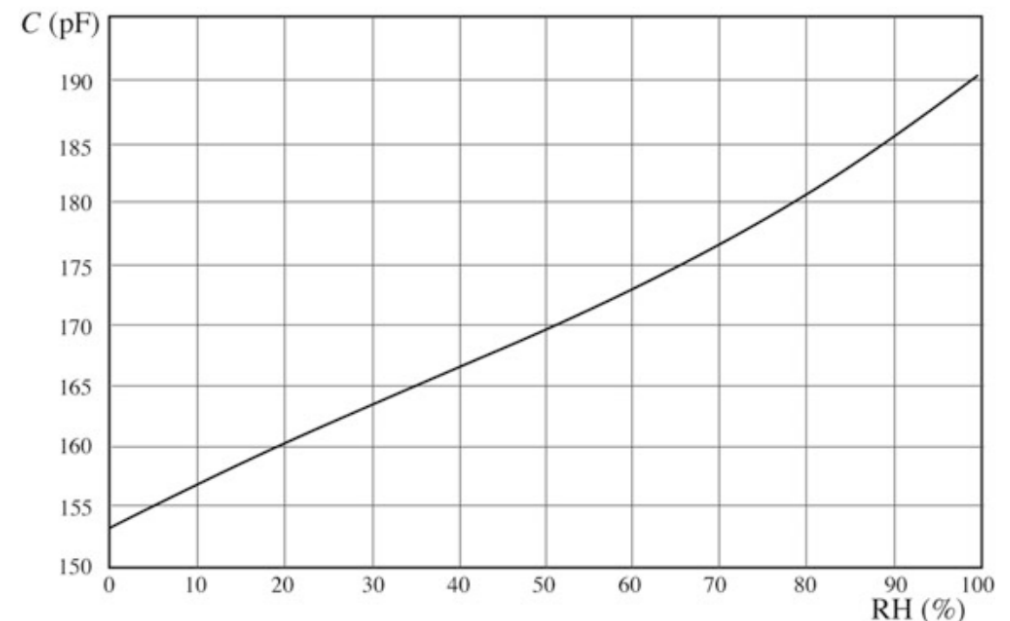
» Kako dielektrična konstanta vode zavisi od temperature, potrebno je i merenje temperature

# Fizički principi merenja

- **Kapacitivnost / kondenzator**

- Kapacitivni senzor vlažnosti

- Dielektrik je higroskopan, tj može da apsorbuje molekule vode. Diel. k-ta zavisi od količine apsorbovane vlage



# Fizički principi merenja

- **Induktivnost**

- Solenoid dužine  $l$ , gustine navojaka  $n$ , površine poprečnog preseka  $A$ , u vakuumu

$$L = \frac{N\Phi_B}{i} = \mu_0 n^2 l A$$

- Ako je unutar solenoida magnetno jezgro

$$L = \mu_0 \mu_r n^2 g G$$

- $g$  zavisi od dimenzija i položaja jezgra,  $G$  geometrijski faktor solenoida
- !Magnetna permeabilnost materijala zavisi od struje koja teče kroz njega! Zato korekcionni faktor  $\eta_i$

$$L = \mu_0 \mu_r n^2 \eta_i g G$$



# Fizički principi merenja

- **Induktivnost**

$$L = \mu_0 \mu_r n^2 \eta_i g G$$

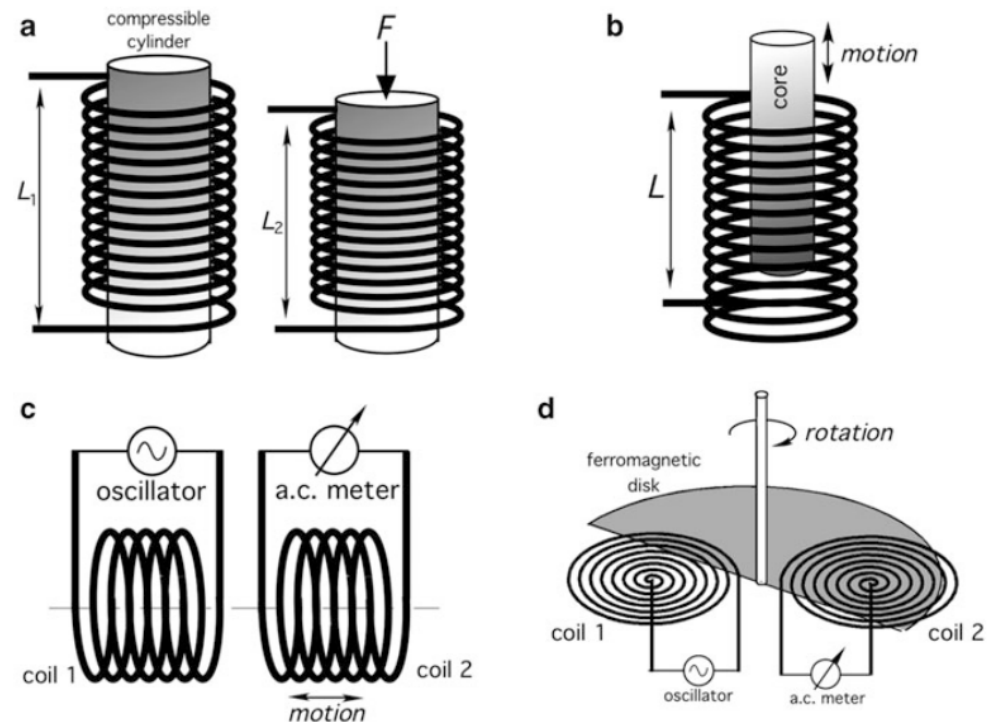
- Promena bilo čega sa desne strane (osim permeabilnosti vakuuma) moduliše induktivnost
  - Merenje pomeraja prilikom merenja sile, pritiska, pozicije...

# Fizički principi merenja

- **Međusobna induktivnost dva namotaja**

$$M = k\sqrt{L_1L_2}$$

- a) promena geometrije
- b) pokretno jezgro
- c) pokretni namotaj
- d) promenljiva sprega



# Fizički principi merenja

- **Otpornost**

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

- Da bi se napravio otporni senzor, treba naći način da se menja ili specifična otpornost ili geometrija senzora

# Fizički principi merenja

- **Otpornost**

- Temperaturna osetljivost otpornika

- Specifična otpornost materijala nije konstanta – u nekom uskom opsegu može se aproksimirati termalnom osetljivošću  $\alpha$ , koja predstavlja temperaturni koeficijent otpornosti (TCR)

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + \alpha \frac{t - t_0}{t_0} \right)$$

- U širokom opsegu, spec otpornost je nelinearna funkcija temperature

# Fizički principi merenja

- **Otpornost**

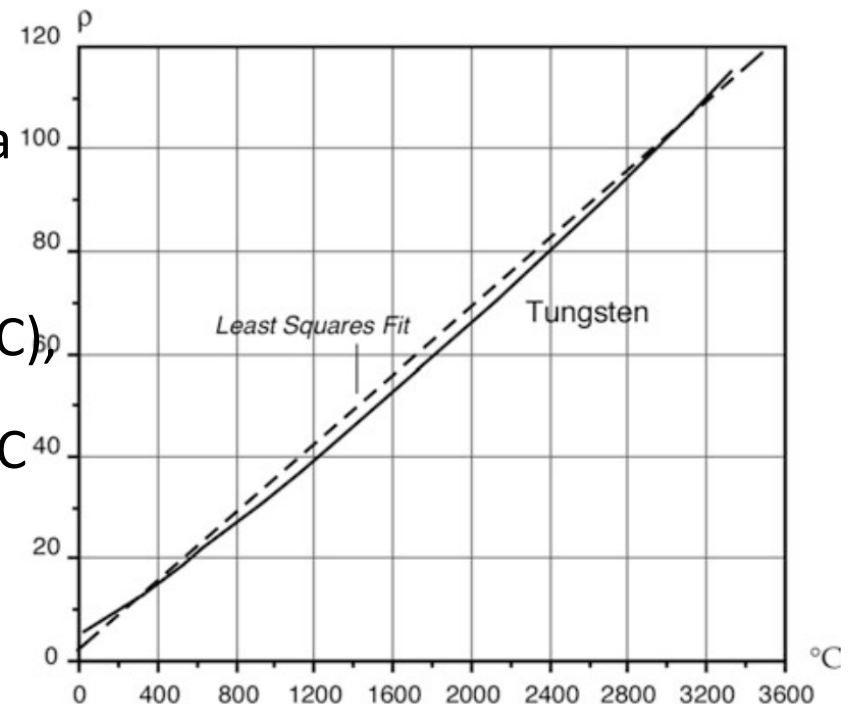
- **Temperaturna osetljivost otpornika**

- Specifična otpornost volframa se za neprecizne primene može modelovati linearnom zavisnošću

- Kada je potrebna bolja tačnost koristi se polinomijalna aproksimacija

$$\rho = 4.45 + 0.0269t + 1.914 \times 10^{-6}t^2$$

- Metali imaju pozitivan TCR (PTC), poluprovodnici i oksidi imaju negativan TCR (NTC); NTC po pravilu imaju veliku nelinearnost



# Fizički principi merenja

- **Otpornost**

- **Temperaturna osetljivost otpornika**

- Standardni “dobar” otpornik ima  $\alpha = 10^{-5}$  i manje
    - “Loš” otpornik je dobar senzor ako je TCR veliko i predvidljivo

- Dve vrste otpornih temperaturnih senzora, termistori i otporni temperaturni detektori (RTD)

# Fizički principi merenja

- **Otpornost**

- RTD obično od platine, radni opseg do 600°C

$$R = R_0(1 + 36.79 \times 10^{-4}t)$$

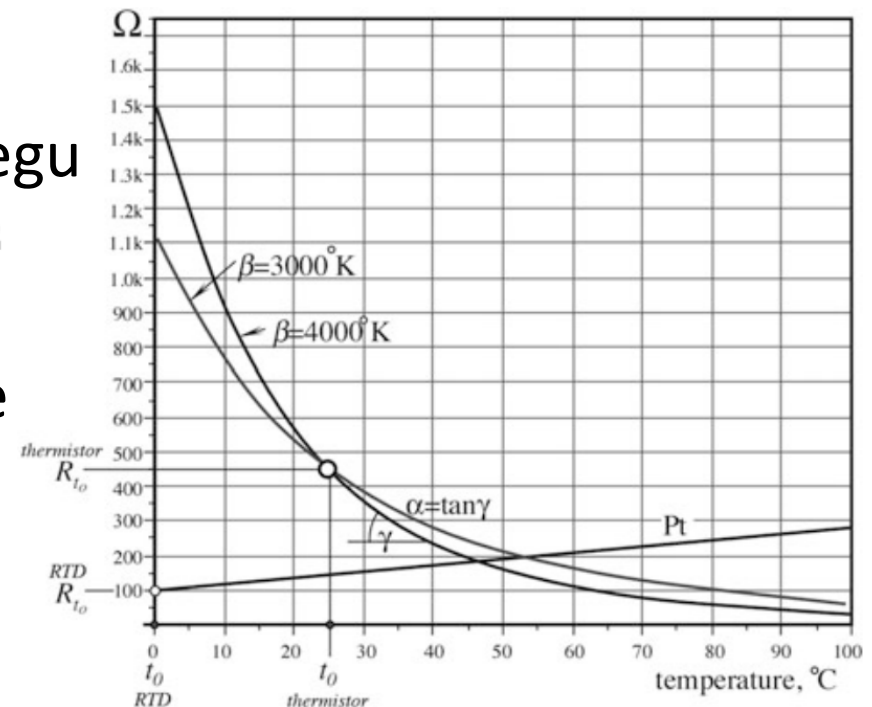
$R_0$  na 0°C

- Mala nelinearnost uzrokuje velike greške u širokom opsegu

$$R = R_0(1 + 39.08 \times 10^{-4}t - 5.8 \times 10^{-7}t^2)\Omega$$

(tačnost bolja od 0.01 °C )

- Koeficijenti zavise od čistoće materijala i tehnologije!



# Fizički principi merenja

- **Otpornost**

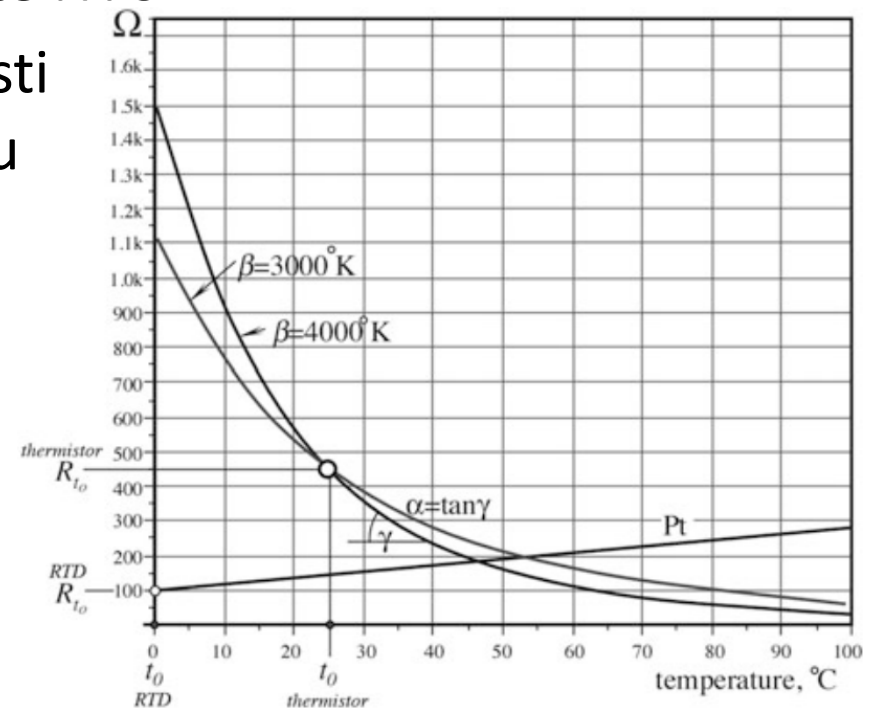
- **Termistori** su otpornici sa velikim, negativnim (NTC) ili pozitivnim (PTC) TCR

- Za merenja se obično koriste NTC

- PTC zbog velike nelinearnosti za primene u uskom opsegu

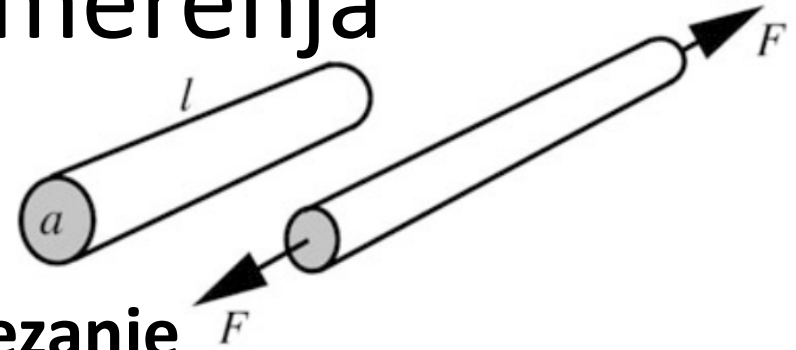
- Keramički poluprovodnici, najčešće metalni oksidi

$$R_t = R_0 e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$





# Fizički principi merenja



- **Otpornost**

- **Osetljivost otpornika na istezanje**

- Istezanje menja spec otpornost ili geometriju
  - Piezorezistivnost
- Može da se koristi kao deo mnogih složenih senzora: pomeraj, sila, pritisak...

- Naprezanje  $\sigma = \frac{F}{a} = E \frac{dl}{l} = Ee$

$E$  Jungov modul elastičnosti,  $dl/l = e$  istezanje (normalizovana deformacija)

# Fizički principi merenja

- **Otpornost**

- **Osetljivost otpornika na istežanje**

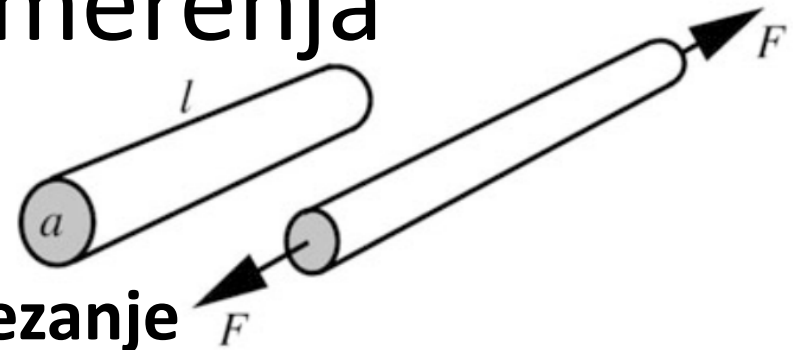
- Zapremina ostaje ista

$$R = \frac{\rho}{v} l^2 \quad \frac{dR}{dl} = 2 \frac{\rho}{v} l$$

- Osetljivost veća za duže i tanje žice velike spec otpornosti

$$\frac{dR}{R} = S_e e \quad dl/l = e$$

za metalne žice osetljivost  $S_e$  2–6, za poluprovodnike 40–200, ali kod poluprovodnika je osetljivost temperaturno zavisna



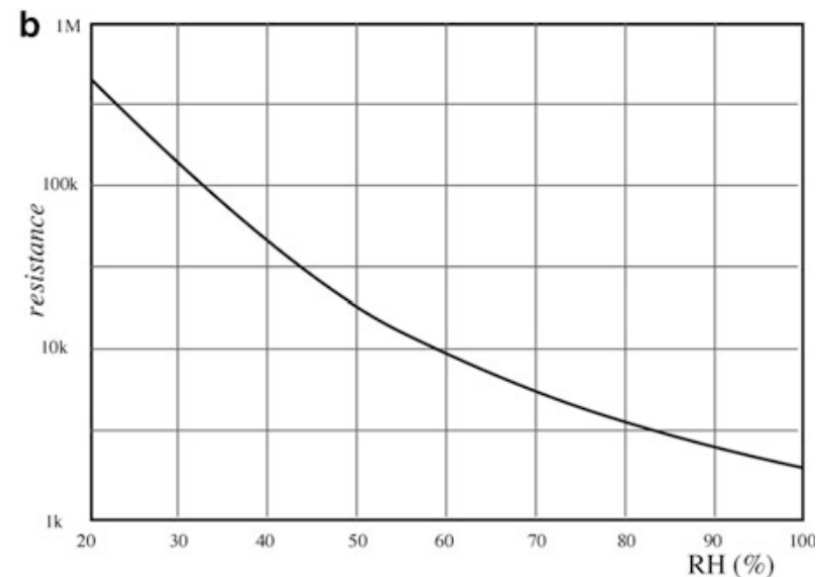
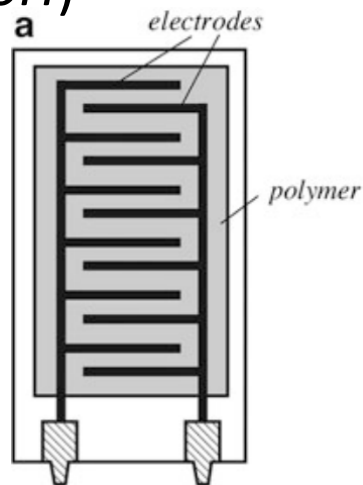
# Fizički principi merenja

- **Otpornost**

- **Osetljivost otpornika na vlagu**

- Količina vlage koju otpornik može da apsorbuje utiče na spec otpornost – kod higroskopnih materijala ona je veoma zavisna od koncentracije apsorbovanih molekula vode (*higristori*)

- Nelinearna zavisnost



# Fizički principi merenja

- **Otpornost**

- **Osetljivost otpornika na vlagu**

- Vreme odziva 10-30s, skraćuje se “na promaji”
    - Otpornost 1k – 100M
    - Potrebna eksitacija, ali ne sme imati DC komponentu kako bi se izbeglo uništenje senzora zbog polarizacije u materijalu

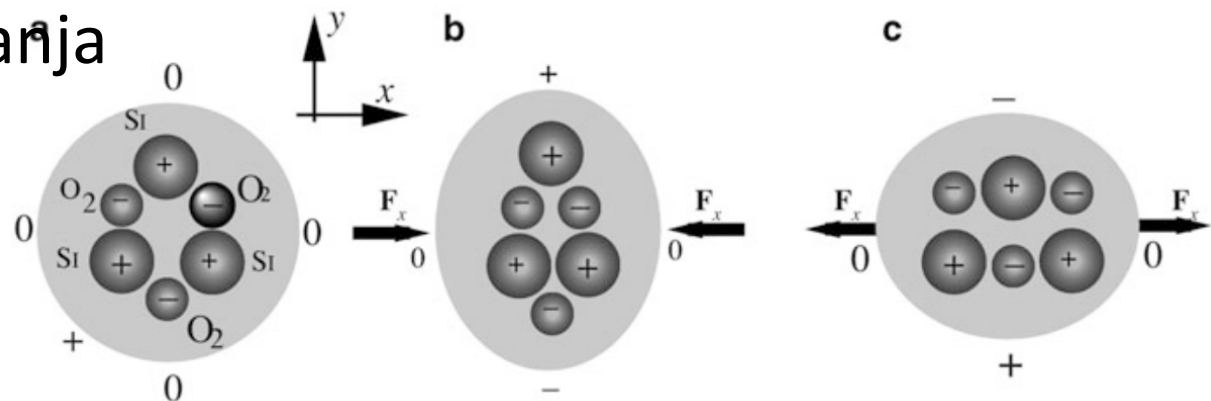
# Fizički principi merenja

- **Piezoetrični efekat**

- Generisanje (u stvari preraspodela) naelektrisanja u kristalnom materijalu nakon izlaganja naprezanju

- Prirodni kristali i veštačke polarizovane keramike i polimeri (feroelektrične osobine)

- Naelektrisanje se pojavljuje na površini materijala nakon pritiskanja

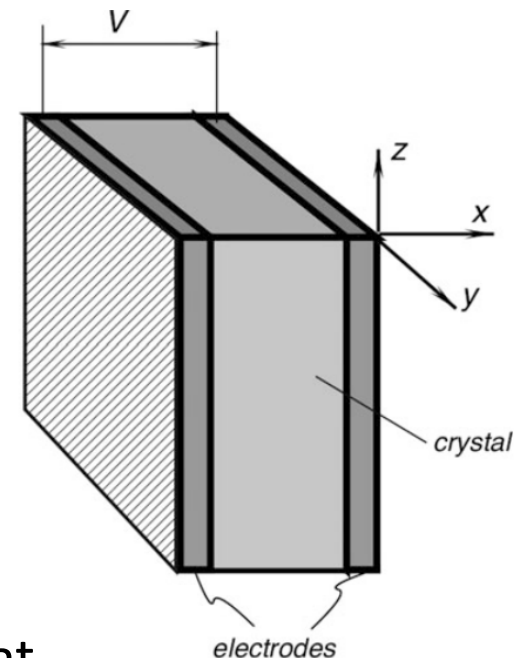


# Fizički principi merenja

- **Piezoeltrični efekat**

- Da bi se prikupilo naelektrisanje, potrebne su barem dve elektrode na suprotnim stranama kristala

- Piezoelektrični senzor postaje kondenzator, čiji dielektrik predstavlja generator naelektrisanja
- Elektrode izjednačavaju naelektrisanje tako da se ne zna mesto pritiska
  - Ako se koristi više elektroda moguće je lokalizovati mesto delovanja sile
- Istezanje u materijalu “puni” kondenzator
- Ako se spolja dovede napon dolazi do mehaničke deformacije – reverzibilni efekat



# Fizički principi merenja

- **Piezoetrični efekat**

- Za opis efekta koristi se vektor polarizacije

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_{xx} + \mathbf{P}_{yy} + \mathbf{P}_{zz}$$

- Ako postoji naprezanje  $\boldsymbol{\sigma}$

$$\mathbf{P}_{xx} = d_{11}\boldsymbol{\sigma}_{xx} + d_{12}\boldsymbol{\sigma}_{yy} + d_{13}\boldsymbol{\sigma}_{zz},$$

$$\mathbf{P}_{yy} = d_{21}\boldsymbol{\sigma}_{xx} + d_{22}\boldsymbol{\sigma}_{yy} + d_{23}\boldsymbol{\sigma}_{zz},$$

$$\mathbf{P}_{zz} = d_{31}\boldsymbol{\sigma}_{xx} + d_{32}\boldsymbol{\sigma}_{yy} + d_{33}\boldsymbol{\sigma}_{zz},$$

$d_{mn}$  piezoelektrični koeficijenti duž ortogonalnih osa – zavise od materijala i vrlo različiti → koristiti materijal tamo gde su koeficijenti najveći

# Fizički principi merenja

- **Piezoetrični efekat**

- Generisano naelektrisanje proporcijalno sili, npr po x osi  $Q_x = d_{11}F_x$

- Napon  $V = \frac{Q_x}{C} = \frac{d_{11}}{C}F_x$

- Kapacitivnost  $C = \kappa\epsilon_0 \frac{a}{l}$

- Izlaz senzora konačno (linearna zavisnost)

$$V = \frac{d_{11}}{C}F_x = \frac{d_{11}l}{\kappa\epsilon_0 a}F_x$$

- Kako bi se dobio veći signal, debljina kristala bi trebalo da bude veća, ili površina elektroda manja.

- Ovo je samo maksimum opadajućeg tranzijenta, jer piezoel senzor detektuje samo **promenu** sile (AC senzor)



# Fizički principi merenja

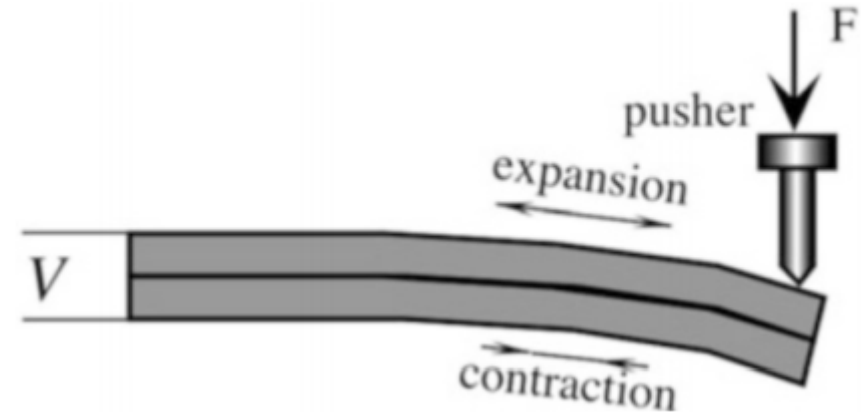
- **Piezoetrični efekat**

$$V = \frac{d_{11}}{C} F_x = \frac{d_{11}l}{\kappa\epsilon_0 a} F_x$$

- I direkcionni koeficijenti  $d$  i permitivnost temperaturno zavisni ali u istom smeru tako da se donekle kompenzuju

# Fizički principi merenja

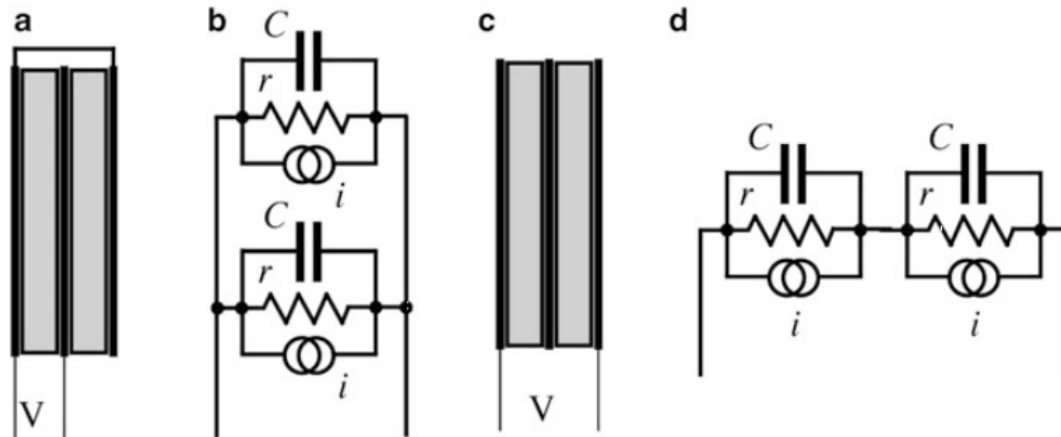
- **Piezoeletrični efekat**



- Radi povećanja osetljivosti, mogu se koristiti laminatne strukture

# Fizički principi merenja

- Piezoeletrični efekat

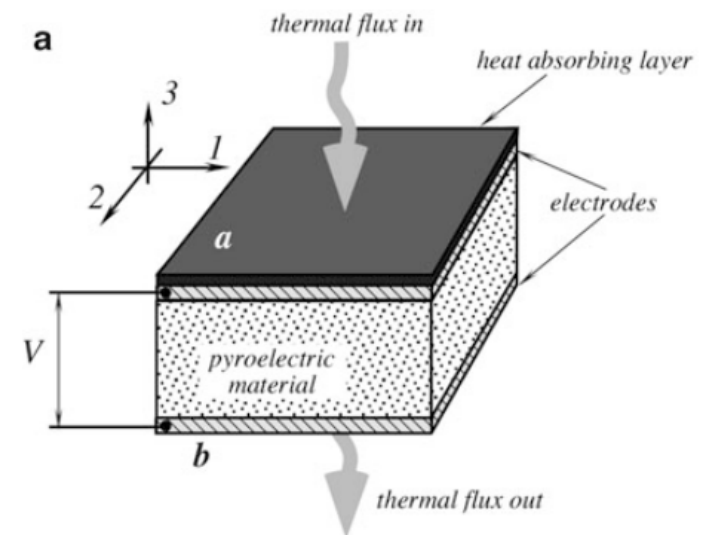


- Otpornost curenja  $r$  je veoma velika (velika izlazna impedansa)  $\rightarrow$  posebna kola za spregu
  - Konvertori naelektrisanja ili struje u napon
  - Naponski pojačavači sa veoma velikom ulaznom otpornošću i veoma malom ulaznom kapacitavošću

# Fizički principi merenja

- **Piroelektrični efekat**

- Generisanje naelektrisanja usled prenosa toplote
- Povezan sa piezoelektričnim efektom
- U osnovi kondenzator koji se puni protokom toplote, odnosno promenom temperature
  - Detektor protoka toplote, a ne detektor toplote



# Fizički principi merenja

- **Piroelektrični efekat**

- PiroEl materijali se spontano polarišu usled delovanja temperature

- Dipolni momenat senzora  $M = \mu Ah$

$\mu$  gustina dipolnog momenta,  $A$  površina,  $h$  debljina

- Naelektrisanje koje se generiše pravi jednak dipolni momenat  $M_o = Q_a \cdot h \rightarrow Q_a = \mu \cdot A$

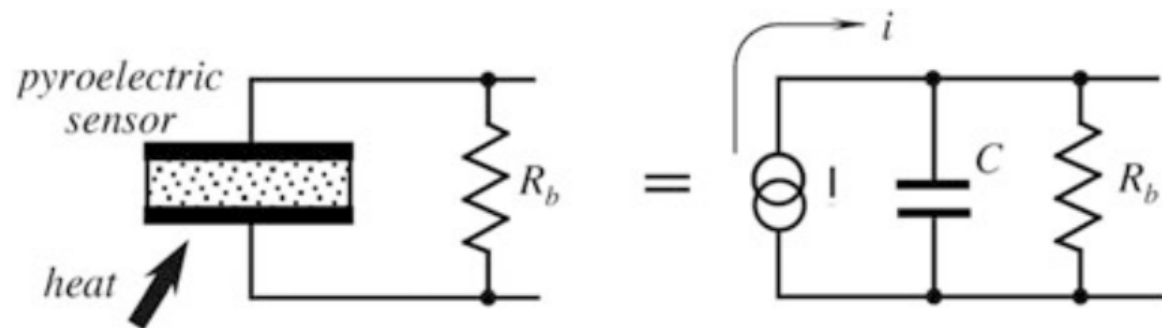
- Sa promenom temperature menja se dipolni momenat i indukuje naelektrisanje

$$\Delta Q_a = A \cdot \mu(T_a, \Delta W)$$

$\Delta W$  povećanje termalne energije materijala

# Fizički principi merenja

- **Piroelektrični efekat**



- Struja predstavlja naelektrisanje generisano usled protoka toplote

# Fizički principi merenja

- **Piroelektrični efekat**

- Promena temperature  $\Delta T$  :

$$\begin{aligned}\Delta Q &= P_Q A \Delta T \\ \Delta V &= P_V h \Delta T\end{aligned}\quad C_e = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{h}$$

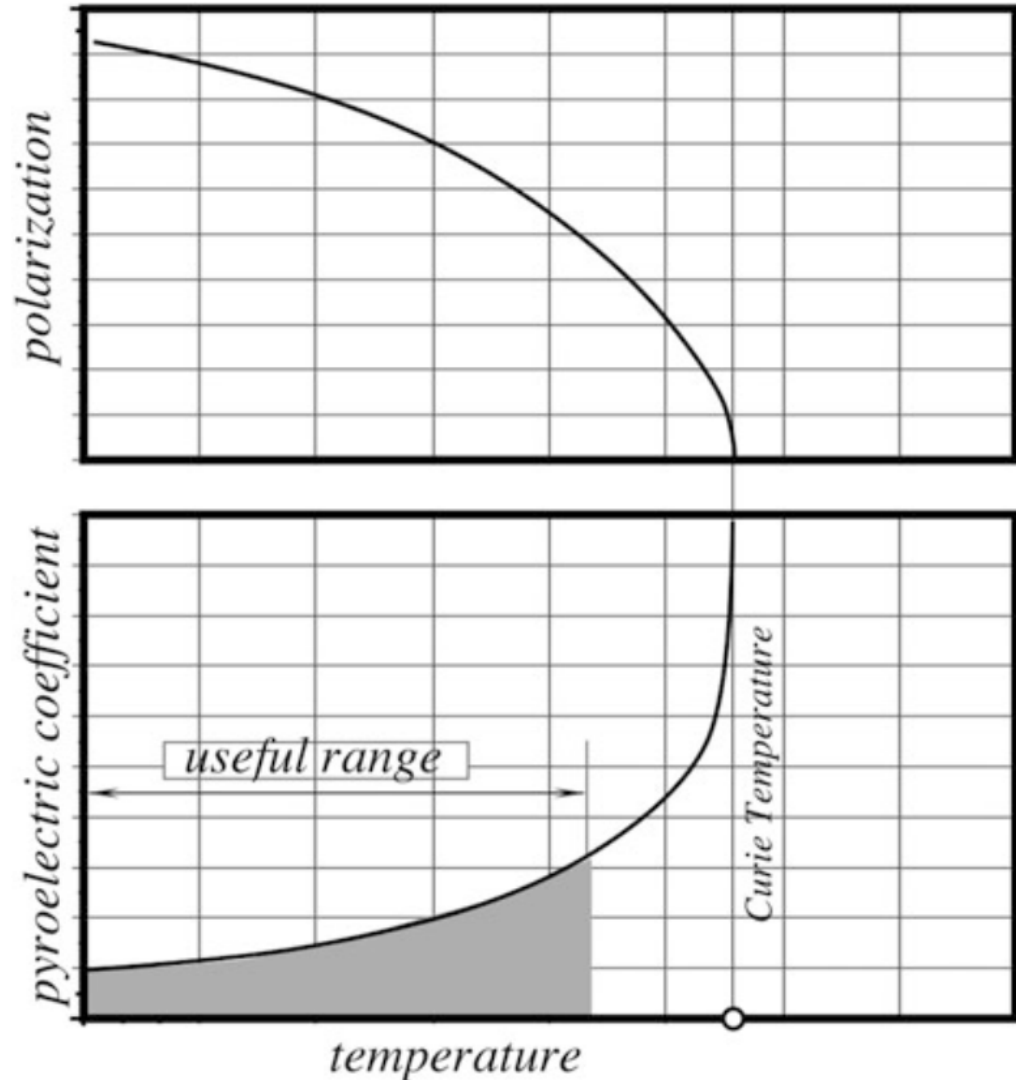
$$\Delta V = P_Q \frac{A}{C_e} \Delta T = P_Q \frac{\kappa \epsilon_0}{h} \Delta T$$

- Maksimum napona proporcionalan promeni temperature

# Fizički principi merenja

- **Piroelektrični efekat**

- Polarizacija, a samim tim i piroEl koeficijent, zavisi od temperature senzora





# Fizički principi merenja

- **Piroelektrični efekat**

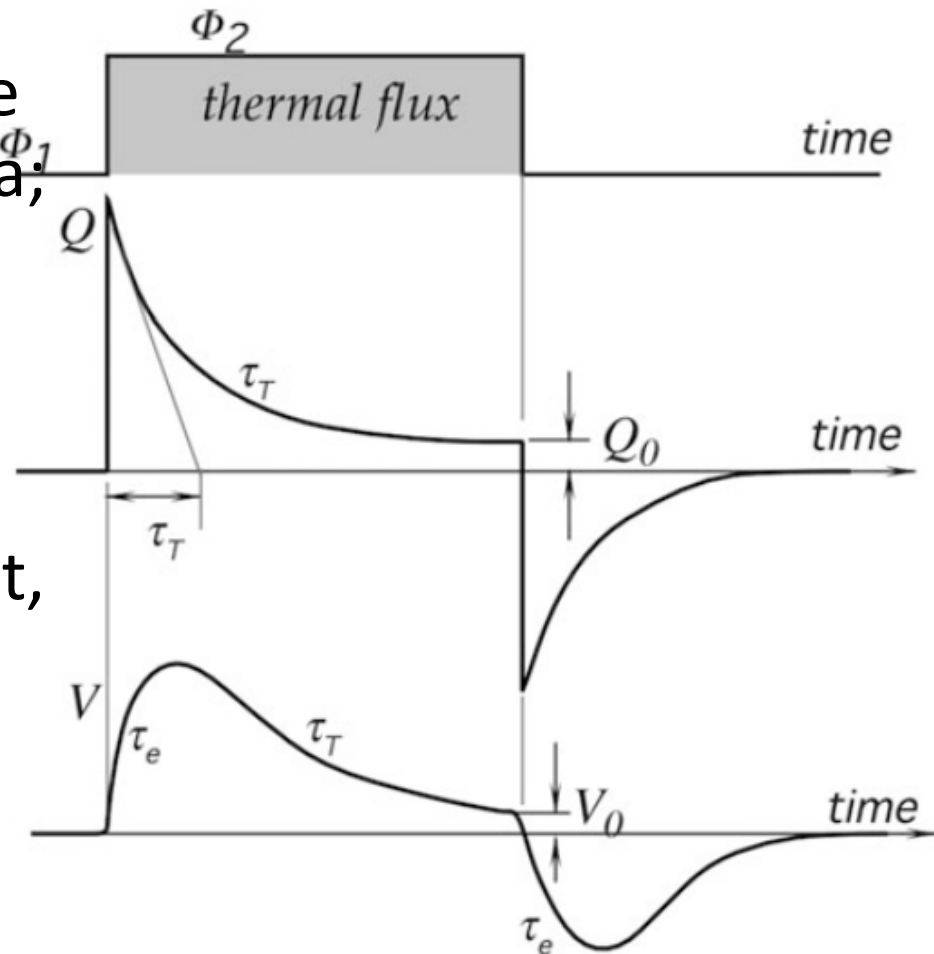
- Skoro trenutno se dostiže maksimum naelektrisanja; potom opadanje sa *termalnom vremenskom konstantom*

$$\tau_T = C_T R_T = c A h R_T$$

$C_T$  termalna kapacitivnost,

$c$  specifična toplota,

$R_T$  termalna otpornost  
(gubici)



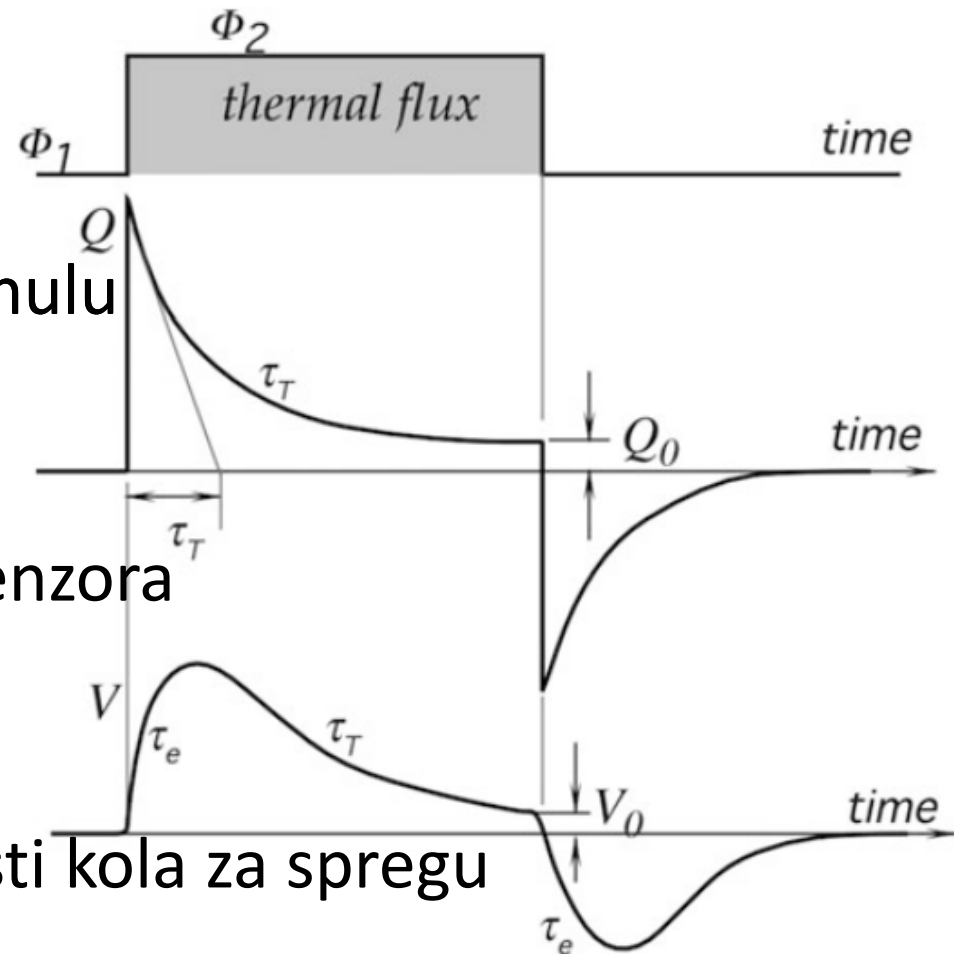
# Fizički principi merenja

- **Piroelektrični efekat**

- Dokle god postoji izvor toplote, naelektrisanje i napon se ne vraćaju na nulu

- Vrednost napona tada odgovara toplotnom protoku sa dve strane senzora

- Vremenska konstanta  $\tau_e$  proizvod kapacitivnosti senzora i ulazne otpornosti kola za spregu



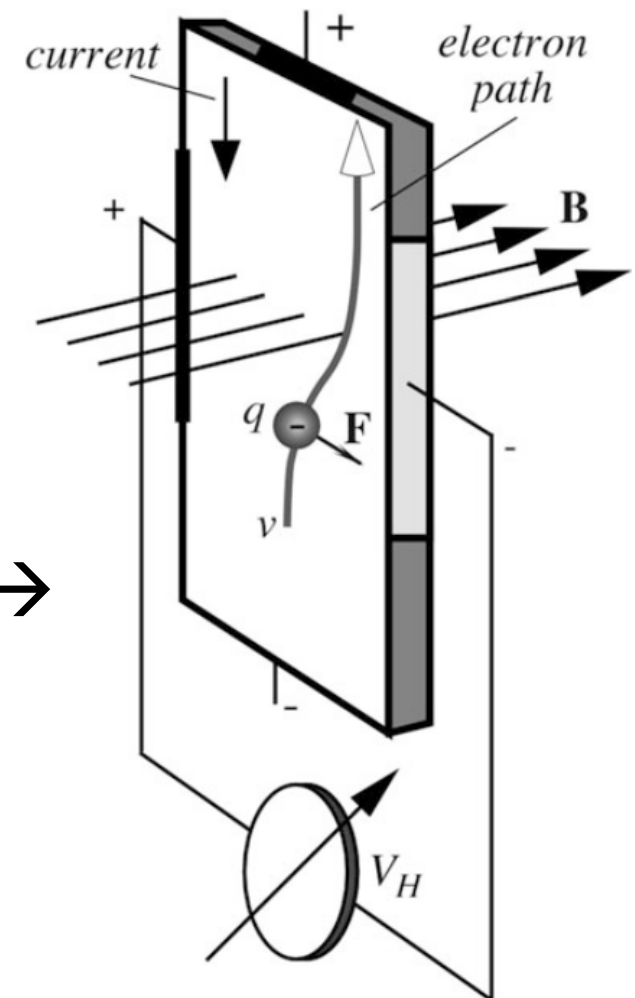
# Fizički principi merenja

- **Holov efekat**

- Detekcija magnetnog polja, pozicije, pomeraja
- Kretanje elektrona kroz magnetno polje, na njega deluje sila

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v}\mathbf{B}$$

- Magnetno polje pomera elektrone → i jedna strana postaje negativnija



# Fizički principi merenja

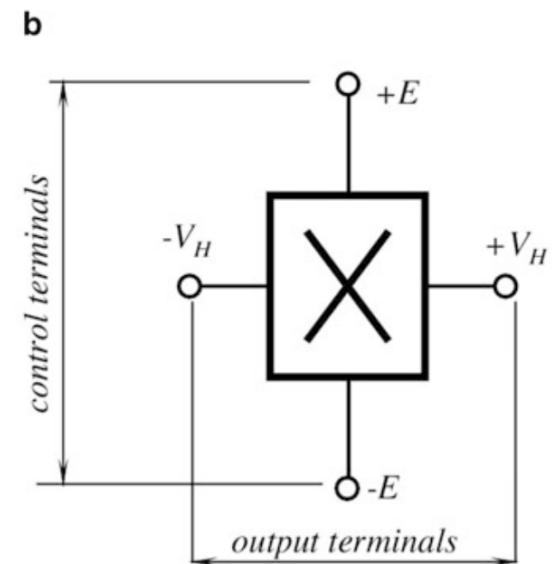
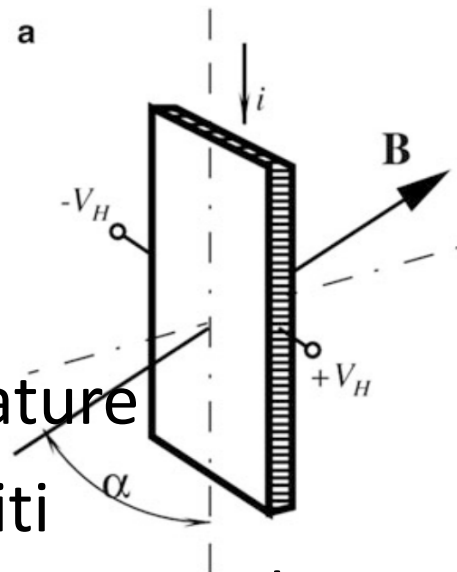
- **Holov efekat**

- Na konstantnoj temperaturi

$$V_H = hiB \sin \alpha$$

$h$  ukupna osetljivost, zavisi od materijala, geometrije i temperature

- Holov efekat može biti pozitivan i negativan, zavisi od vrste nosioca naelektrisanja



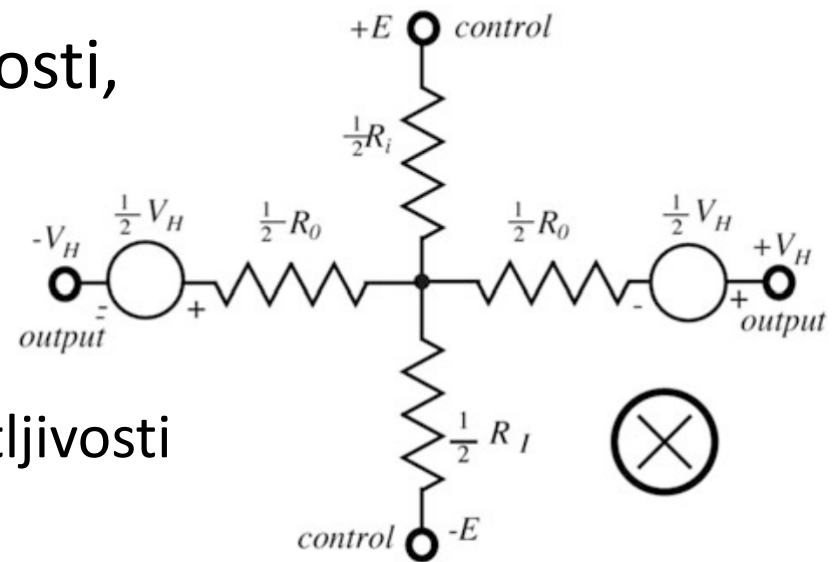
# Fizički principi merenja

- **Holov efekat**

- Ekvivalentno kolo Holovog senzora

- Pored ulaze i izlazne otpornosti, karakteristike:

- Ofset bez magnetnog polja
- Osetljivost
- Temperaturni koeficijent osetljivosti



# Fizički principi merenja

- **Holov efekat**

- Često se prave od silicijuma

- Moguća integracija sa pratećim elektronskim kolima
  - Bitno jer je Holov napon jako mali
- Silicijum piezorezistivan, zato su Holovi senzori podložni mehaničkim uticajima
- Takođe temperaturna zavisnost otpornosti
  - Zato bolje strujna nego naponska pobuda

# Fizički principi merenja

- **Zvučni talasi**

- Naizmenično skupljanje i širenje medija sa određenom učestanošću

- Oscilacije u pravcu širenja talasa, zato su u pitanju longitudinalne mehaničke oscilacije

- *Zvuk* u odnosu na ljudsko čulo sluha 20Hz-20kHz

- *Infrazvuk* ispod 20Hz, *ultrazvuk* iznad 20kHz

- Infrazvuk interesantan u analizi struktura građevina, predviđanju zemljotresa i u slučaju drugih velikih objekata

- » Infrazvuk relativno velike amplitude može se osetiti

# Fizički principi merenja

- **Zvučni talasi**

- Kada se neka sredina skupi, zapremina se smanjuje

- Odnos promene pritiska i relativne promene zapremine se naziva zapreminski moduo elastičnosti sredine

$$B = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V} = \rho_0 v^2$$

$\rho_0$  gustina van zone skupljanja, brzina zvuka u sredini  $v$

- Brzina zvuka zavisi od elastičnosti i inercije sredine, koji oba zavise od temperature

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}}$$



# Fizički principi merenja

- **Zvučni talasi**

- Brzina u čvrstim sredinama zavisi od Jangovog modula elastičnosti i Poasonovog odnosa

$$v = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho_0(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

- Zvučni talas može se posmatrati kao talas pritiska

- Razlika između trenutnog i srednjeg pritiska je *akustički pritisak*

- Tokom propagacije talasa, čestice osciluju sa trenutnom brzinom  $\xi$ .

- Akustička impedansa  $\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{P}}{\xi}$ , za sredine bez gubitaka  $Z = \rho_0 v$

# Fizički principi merenja

- **Zvučni talasi**

- *Intenzitet* talasa (snaga po jediničnoj površini)

$$I = P\xi = \frac{P^2}{Z}$$

- *Nivo zvuka*  $\beta = 10\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$ ,  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  prag čujnosti za ljudsko uho

- Kako je zvuk putujući talas pritiska, to se može meriti sensorima pritiska prilagođenim (učestanost, intenzitet) sredini kroz koju zvuk putuje

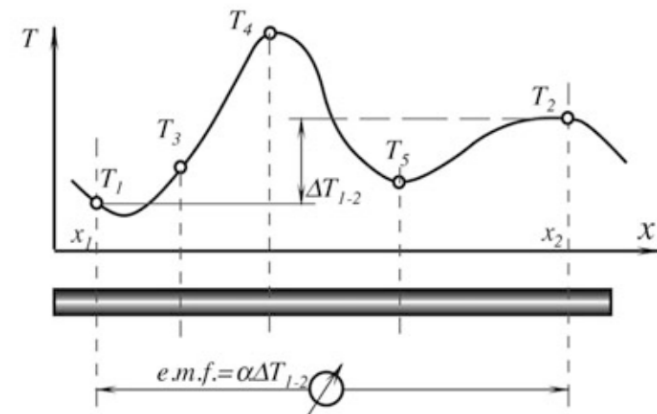
# Fizički principi merenja

- **Zebekov termoelektrični efekat**

- Ako se dva kraja provodnika nalaze na različitim temperaturama javljaju se gradijent toplote, električno polje i priraštaj napona

$$dV_a = \alpha_a \frac{dT}{dx} dx$$

- Ako je materijal homogen  $dV_a = \alpha_a dT$



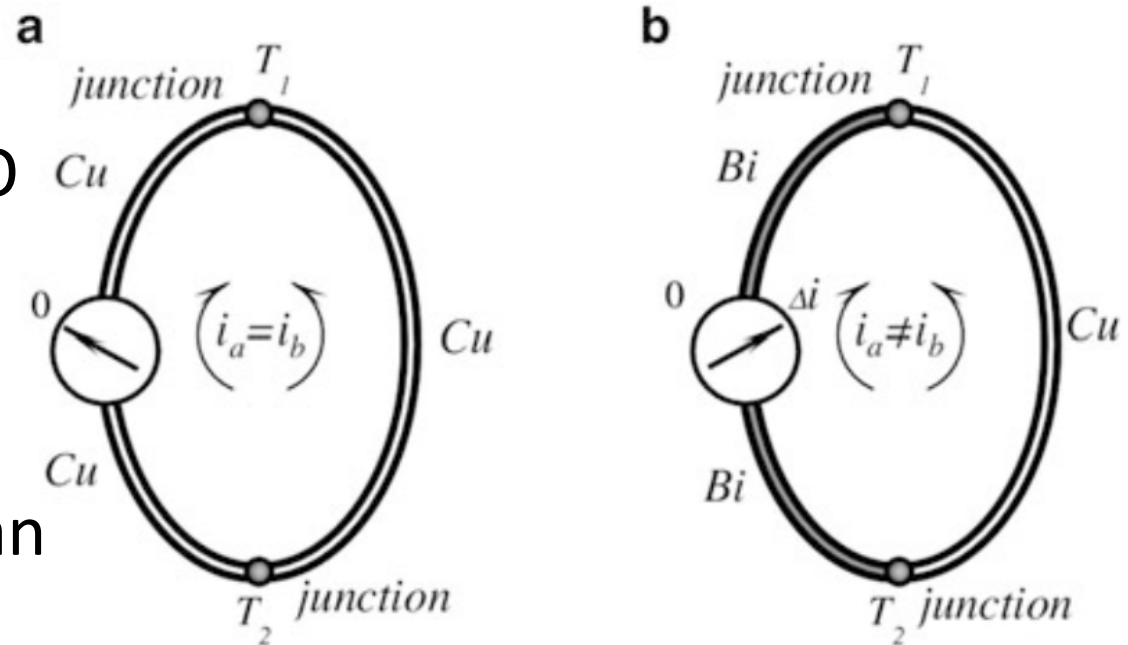
# Fizički principi merenja

- **Zebekov termoelektrični efekat**

- Da bi se merilo, potrebno je imati spoj dva različita provodnika

- Napon zavisi SAMO od materijala i temperature

- Termalno indukovani Zebekov potencijal



# Fizički principi merenja

- **Zebekov termoelektrični efekat**

- Provodnici A i B

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$$

$$dV_{AB} = \alpha_{AB} dT$$

$$\alpha_{AB} = \frac{dV_{AB}}{dT}$$

- Diferencijalni Zebekov koeficijent ne mora biti konstanta, aproksimacija napona

$$V_{AB} = a_0 + a_1 T + a_2 T^2$$

pa je osetljivost termopara

$$\alpha_{AB} = \frac{dV_{AB}}{dT} = \alpha_1 + 2\alpha_2 T$$

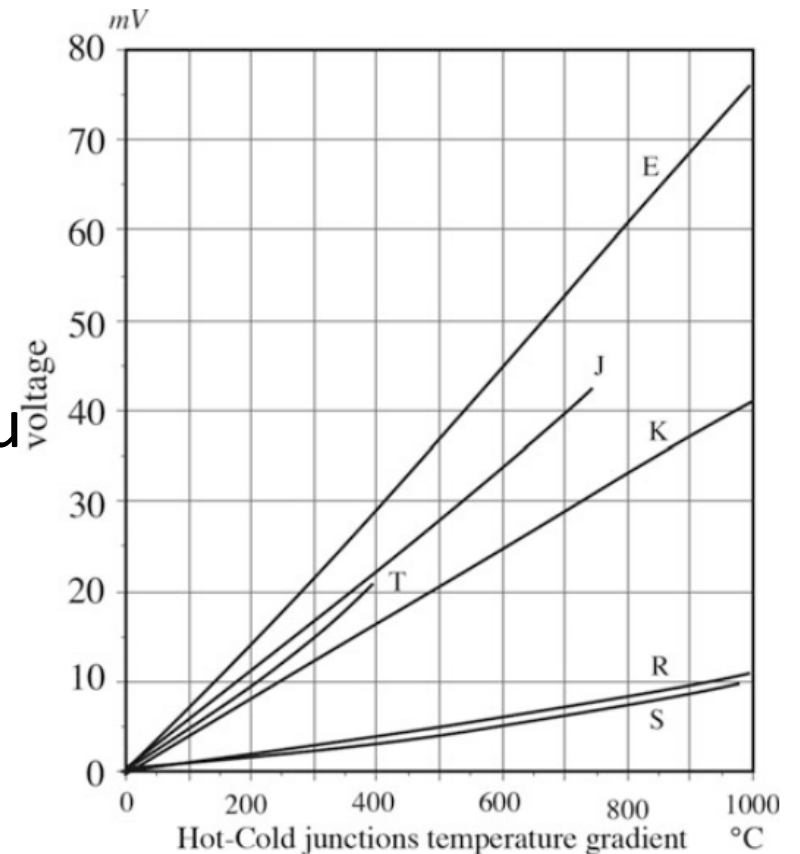
- Razlikuju se hladni kraj i topli kraj
- Nebitan je sam način povezivanja

# Fizički principi merenja

- **Zebekov termoelektrični efekat**

- Zebekov koeficijent nije konstanta

- U pitanju je relativno merenje, potrebno je znati i temperaturu hladnog kraja!



# Fizički principi merenja

- **Termalne osobine materijala**

- *Termalno širenje*

- Sva čvrsta tela se šire sa povećanjem temperature. Promena bilo koje linearne dimenzije (dužine, širine, visine) naziva se linearno širenje

$$l_2 = l_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)]$$

$\alpha$  je koeficijent linearnog širenja i zavisi od materijala, kao i trenutne temperature (u praktičnim primenama zavisnost od temperature može se zanemariti)

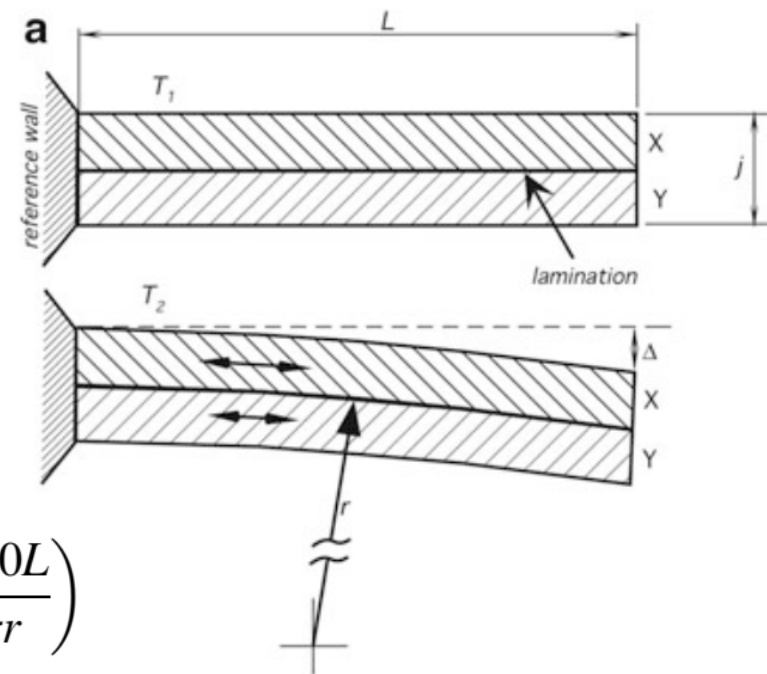
- Kod *izotropnih* materijala koeficijent je isti u svim pravcima

$$\Delta A = 2\alpha A \Delta T \quad \Delta V = 3\alpha V \Delta T$$

# Fizički principi merenja

- **Termalne osobine materijala**
- *Termalno širenje*
  - Korisna pojava koja se koristi kod mnogih senzora gde se toplotna energija meri ili koristi kao eksitacija
  - Materijali imaju različite koeficijente termalnog širenja
  - Bimetalna ploča: spajanje na T1
    - Na višoj temperaturi T2 gornja ploča se širi više nego donja
    - Spoj ne dozvoljava X da se širi koliko bi mogla, a Y primorava da se širi više nego što treba
    - Javlja se unutrašnje naprezanje i struktura se krivi

$$r \approx \frac{2j}{3(\alpha_X - \alpha_Y)(T_2 - T_1)} \quad \Delta = r \left( 1 - \cos \frac{180L}{\pi r} \right)$$

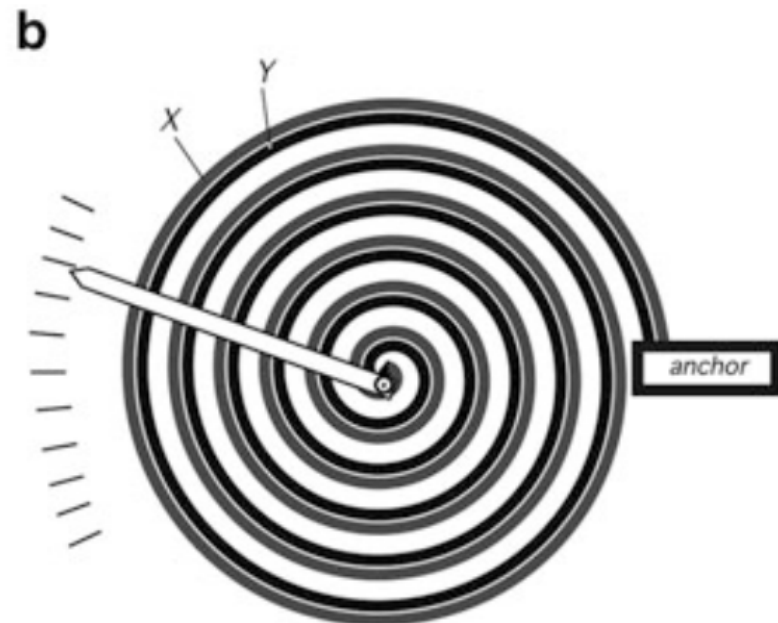




# Fizički principi merenja

- **Termalne osobine materijala**
- *Termalno širenje*
  - Bimetalna ploča konvertor toplote u pomeraj

– Kako bi pomeraj bio vidljiv golim okom, koriste se posebni oblici (veliko  $L$ ) →



# Fizički principi merenja

- **Termalne osobine materijala**

- *Toplotni kapacitet*

- Svaki objekat se karakteriše

$$C = cm$$

- $c$  je specifična toplota **materijala**, i nije baš konstantna (za vodu je najmanja na 37°C)

- Što teži materijal to manja specifična toplota.

- Toplotni kapacitet bitan za senzore

- Manja energija potrebna da pređe na laki senzor sa manjom specifičnom toplotom

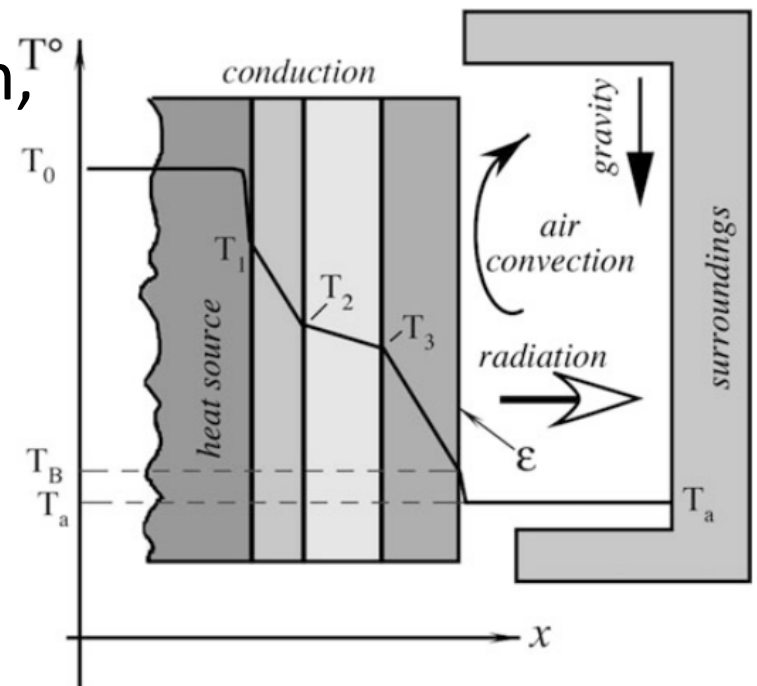
$$c = \frac{Q}{m\Delta T}$$

- Manji uticaj na izvor energije i brži odziv

# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**

- Termalni senzor meri toplotu koja nosi informaciju o objektu koji proizvodi toplotu: temperatura, hemijska reakcija, pozicija, prenos toplote...
- Toplota se prenosi provođenjem, zračenjem i strujanjem



# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**

- **Provođenje** zahteva fizički kontakt dva tela

- Brzina prenosa toplote

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{\Delta T}{dx}$$

$k$  specifična termalna provodnost (smatra se konstantom),  $A$  poprečni presek

- Za npr električnu žicu  $H = kA \frac{T_1 - T_2}{L}$ , ili  $H = A \frac{T_1 - T_2}{r}$   
gde  $r = \frac{L}{k}$  termalna otpornost

# Fizički principi merenja

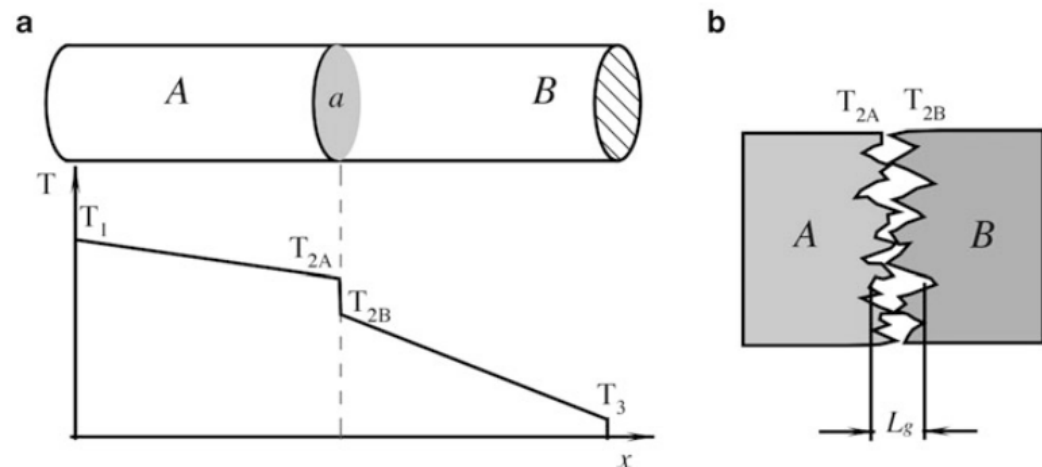
- **Prenos toplote**

- U stvarnosti spojevi nisu idealni zbog kontaktnih otpornosti

$$H = \frac{T_1 - T_3}{R_A + R_c + R_B}$$

$$R_c = \frac{1}{h_c a}$$

- Često važno kod merenja zbog prenosa toplote kroz mehaničke spojeve
- Termalna provodnost gasova je jako mala, zato se na spojevima nanosi fluid koji ima malu termalnu otpornost



# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**

- Kod **strujanja** postoji posrednik (gas ili tečnost)

- Prirodno (gravitaciono) ili prinudno

- Kod prirodnog strujanja vazduha topliji vazduh ide gore

$$H = \alpha A(T_1 - T_2)$$

koeficijent zavisi od specifične toplote posrednika, viskoznosti, brzine kretanja, pa čak i od razlike temperatura

- » Horizontalna ploča  $\alpha = 2.49\sqrt[4]{T_1 - T_2} \text{ W/m}^2\text{K}$

- » Vertikalna ploča  $\alpha = 1.77\sqrt[4]{T_1 - T_2} \text{ W/m}^2\text{K}$

- Ako je zapremina gasa mala, strujanje postaje zanemarljivo u odnosu na provođenje i zračenje

# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**

- **Zračenje**

- Vibracija atoma/molekula (naelektrisane čestice u kretanju)

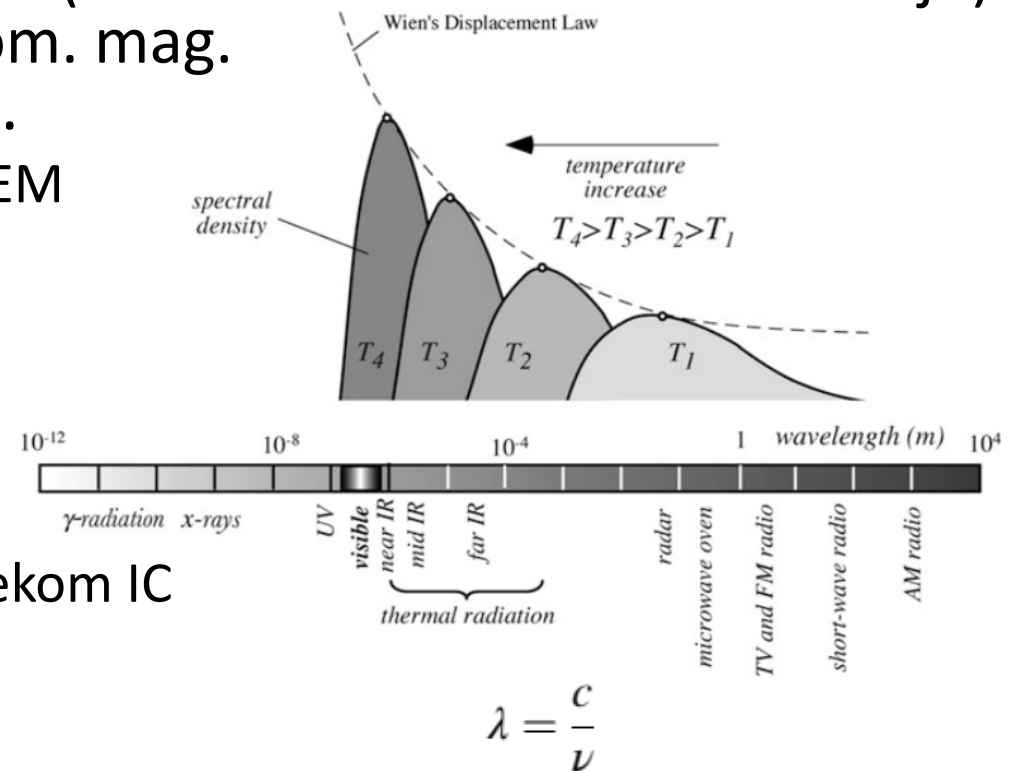
- prom. el. polje → prom. mag.

- polje → prom. el. polje...

- Čestica koja vibrira izvor EM polja koje se širi brzinom svetlosti

- EM zračenje koje potiče od toplote *termalno zračenje*

- Mahom u srednjem i dalekom IC području



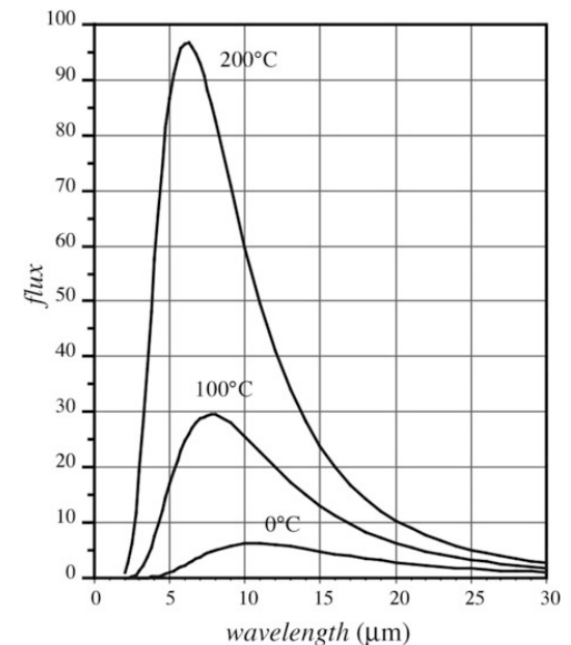
# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**

- Gustina fluksa zračenja  $W_\lambda = \frac{\varepsilon(\lambda)C_1}{\pi\lambda^5(e^{C_2/\lambda T} - 1)}$   
 $\varepsilon(\lambda)$  emisivnost površine

- Temperatura je statistička kategorija, talasna dužina oko koje je grupisano najviše toplotnog zračenja (Vinov zakon)

$$\lambda_m = \frac{2898}{T}$$





# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**

- Senzori imaju ograničen propusni opseg

$$\Phi_{\text{bo}} = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon(\lambda) C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} d\lambda$$

- Nije rešivo analitički, zato približno

$$\Phi_{\text{bo}} = A\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

A geometrijski faktor, emisivnost se smatra nezavisnom od talasne dužine

- Pretpostavka da se zrači u prostor na apsolutnoj nuli!

# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**

- Emisivnost (0..1) utiče na intenzitet zračenja

- Veza emisivnosti (isto što i apsorptivnost), transparentnosti i reflektivnosti  $\varepsilon + \gamma + \rho = 1$

- Za neprovidan objekat  $\rho = 1 - \varepsilon$ .

- Kada se koristi senzor toplotnog zračenja on nije na apsolutnoj nuli, tako da se mora uzeti u obzir i njegovo zračenje

# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**

- Senzor reaguje na razliku fluksa koji dolazi od objekta i fluksa koji odlazi sa senzora. Čak ni sav fluks objekta nije apsorbovan na senzoru, deo se vraća nazad

- Reflektovani fluks

$$\Phi_{br} = -\rho_s \Phi_{bo} = -A\varepsilon(1 - \varepsilon_s)\sigma T^4$$

- Neto fluks objekta koji senzor apsorbuje

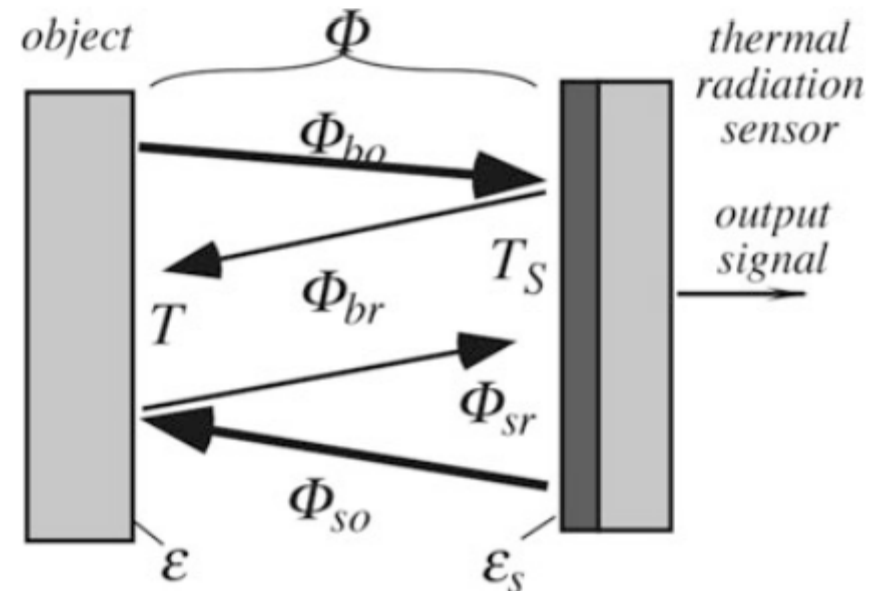
$$\Phi_b = \Phi_{bo} + \Phi_{br} = A\varepsilon\varepsilon_s\sigma T^4$$

- Fluks koji zrači senzor

$$\Phi_s = -A\varepsilon\varepsilon_s\sigma T_s^4$$

- Ukupan fluks koji senzor apsorbuje

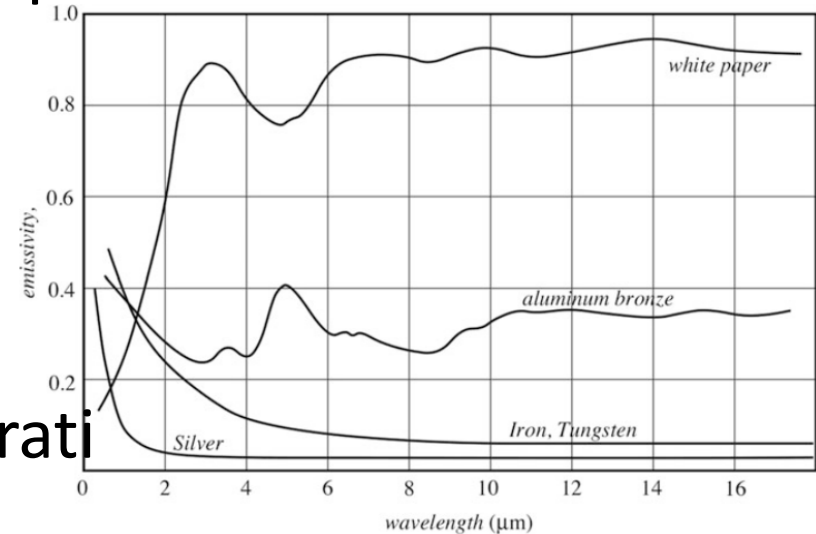
$$\Phi = \Phi_b + \Phi_s = A\varepsilon\varepsilon_s\sigma(T^4 - T_s^4)$$



# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**

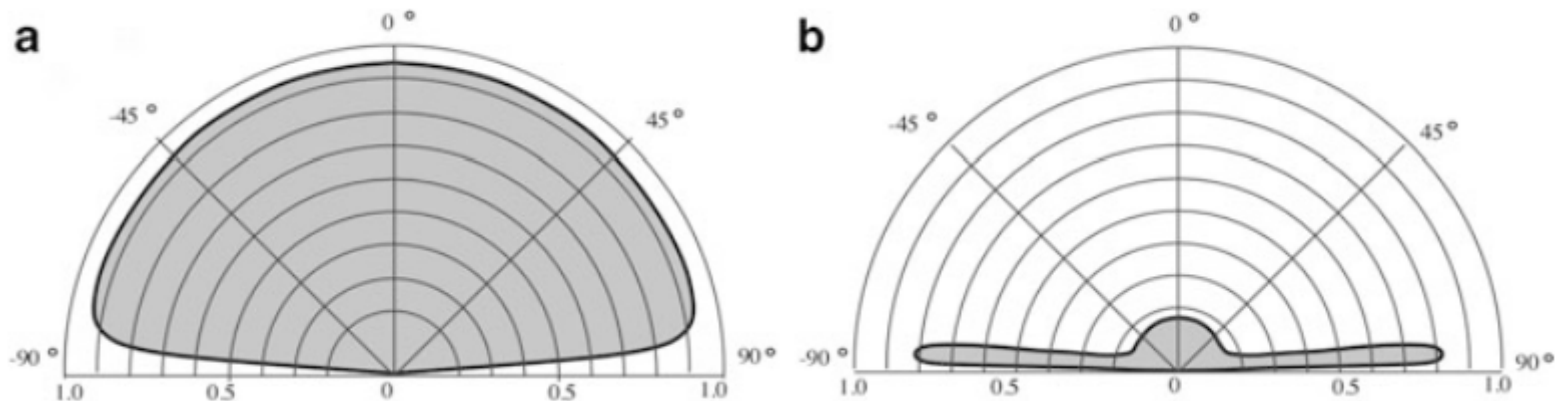
- Emisivnost realne površine je ipak zavisna od talasne dužine
- U mnogim praktičnim primenama, za neprovidan materijal u uskom opsegu talasnih dužina može se smatrati konstatnom



# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**

- Prostorna emisivnost kod nemetala i ugljačanog metala



- Gasovi su uglavnom providni za termalno zračenje, a kada nisu onda emituju i apsorbuju u uskim opsezima

- Ako je gas nereflektivan, emisivnost na nekoj talasnoj dužini je  $\epsilon_\lambda = 1 - \gamma_\lambda = 1 - e^{-\alpha_\lambda x}$ , gde je  $x$  debljina sloja

# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**

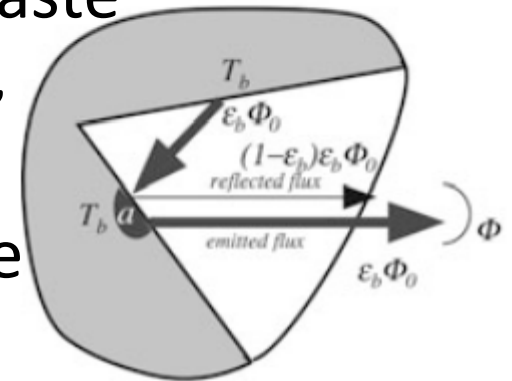
- Emisivnost je veoma bitna za beskontaktno merenje temperature infracrvenim senzorom

- Za kalibraciju je potreban izbor precizne emisivnosti, što bliže jedinici – crno telo.
    - Nema poznatog materijala koji ima emisivnost jednaku jedan, zato se koristi EFEKAT ŠUPLJINE za simulaciju crnog tela

# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**

- Šupljina je praznina nepravilnog oblika u objektu, čija je temperatura zidova uniformna
- Emisivnost otvora šupljine dramatično raste u odnosu na emitivnost ravne površine, i bliži se 1.
- Temperatura i emitivnost zidova šupljine homogeni
- Idealni fluks sa površine  $a$   $\Phi_o = a\sigma T_b^4$ , realno  $\Phi_r = \epsilon_b \Phi_o$ .
  - Toliki isti fluks stiže iz šupljine na tu površinu, i deo se reflektuje  $\Phi_\rho = \rho \Phi_r = (1 - \epsilon_b) \epsilon_b \Phi_o$



# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**

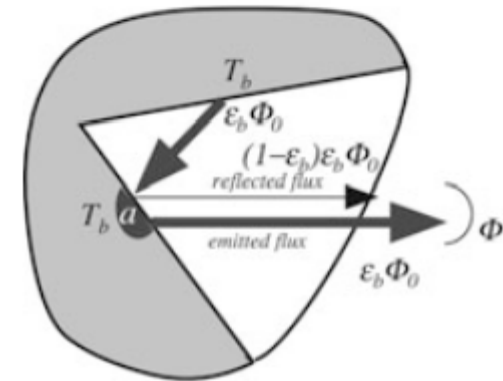
- Kombinovani fluks sa površine  $a$  prema otvoru šupljine

$$\Phi = \Phi_r + \Phi_p = \varepsilon_b \Phi_o + (1 - \varepsilon_b) \varepsilon_b \Phi_o = (2 - \varepsilon_b) \varepsilon_b \Phi_o.$$

- Da nema šupljine bilo bi  $\Phi_r = \varepsilon_b \Phi_o$

– Efektivna emisivnost šupljine raste

$$\varepsilon_e = \frac{\Phi}{\Phi_o} = (2 - \varepsilon_b) \varepsilon_b$$





# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**

- Efekat šupljine dovodi do grešaka prilikom merenja ako se ne uzme u obzir

- Nozdrve, nabori na koži →



# Fizički principi merenja

- **Prenos toplote**
  - Praktično crno telo

