

Sensori a stato solido LS

Susanna Reggiani

Advanced Research Center on Electronic Systems (ARCES) e
Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica (DEIS)

tel. 051 209 3557

email: susanna.reggiani@unibo.it,
sreggiani@arces.unibo.it

ufficio: Laboratorio di Microelettronica (ex 3.2)

Programma del corso AA 2008-2009

1. Introduzione al corso- Classificazione dei sensori
2. Principali effetti fisici nei sensori a stato solido
3. Sensori ottici

ESAME PARZIALE (24/10/2008)

4. Sensori meccanici
5. Sensori termici
6. Sensori magnetici

ESAME PARZIALE (05/12/2008)

Esercitazioni AA 2008-2009

Il programma di simulazione TCAD Sentaurus-SYNOPSIS:

- Introduzione (1 ora) 25/9/2008
- 1^a esercitazione (2 ore) 1/10/2008 (due turni)
- 2^a esercitazione (2 ore) 15/10/2008 (due turni)
- 3^a esercitazione (2 ore) 5/11/2008 (due turni)
- 4^a esercitazione (2 ore) 19/11/2008 (due turni)

I turni sono dalle 9 alle 11 (turno 1) e dalle 11 alle 13 (turno 2)

le esercitazioni si terranno presso la saletta ex 3.2

Materiale didattico

- **E. De Castro “Fondamenti di Elettronica”, UTET**
- **S. M. Sze “Semiconductor Sensors”, Wiley Interscience**
- **M. Rudan “Tavole di Microelettronica”, Pitagora**

- AAVV “Mechanical Sensors”, Vol. 7, VCH
- AAVV “Sensors Update”, Vol.4, Wiley-VCH
- A. Nathan, H. Baltes “Microtransducer CAD”, Springer
- G. T. A. Kovacs “Micromachined Transducers Sourcebook”, Mc Graw-Hill
- S. D. Senturia “Microsystem Design”, Kluwer Academic Publ.

- i lucidi delle lezioni sono disponibili in rete:
www-micro.deis.unibo.it/cgi-bin/dida?~reggiani/www/Dida03

Introduzione al corso

Cos' è un SENSORE

E' un dispositivo che riceve un'informazione mediante un segnale di ingresso costituito da una determinata grandezza fisica (misurando) e la restituisce mediante un segnale d'uscita costituito da una grandezza fisica diversa, piu' adatta alle successive elaborazioni.



il segnale d'uscita è una grandezza ELETTRICA



il sensore esegue una TRASDUZIONE di una grandezza non elettrica in una grandezza elettrica

TRASDUTTORE: converte una forma di energia in un'altra (ad esempio, l'altoparlante).

Applicazioni dei sensori

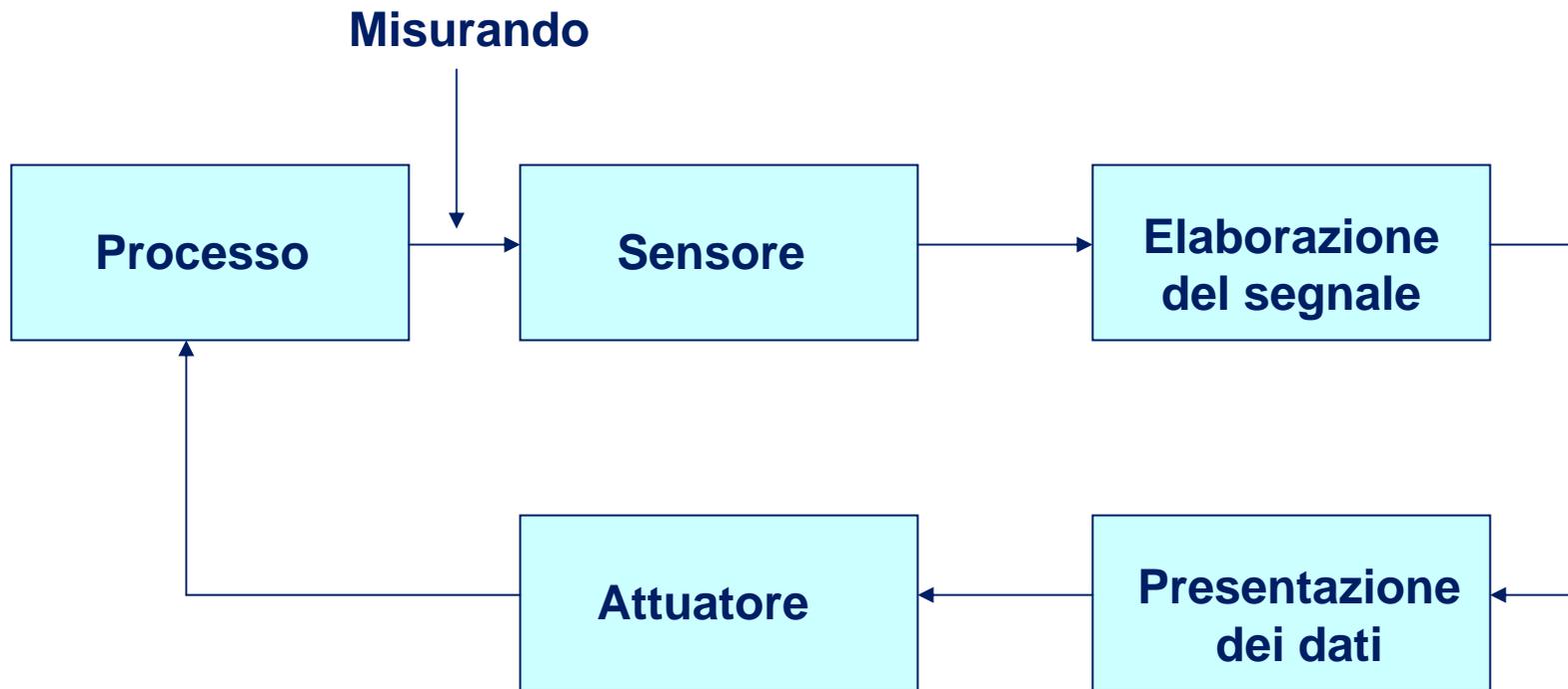
1. misure per la determinazione di una grandezza che non può essere altrimenti percepita e/o misurata.

in questo caso il sensore è inserito in una catena di misura



2. controlli di produzione industriale, robotica, sistemi di controllo dell'automobile, applicazioni biomediche.

in questo caso il sensore è inserito in una catena di regolazione



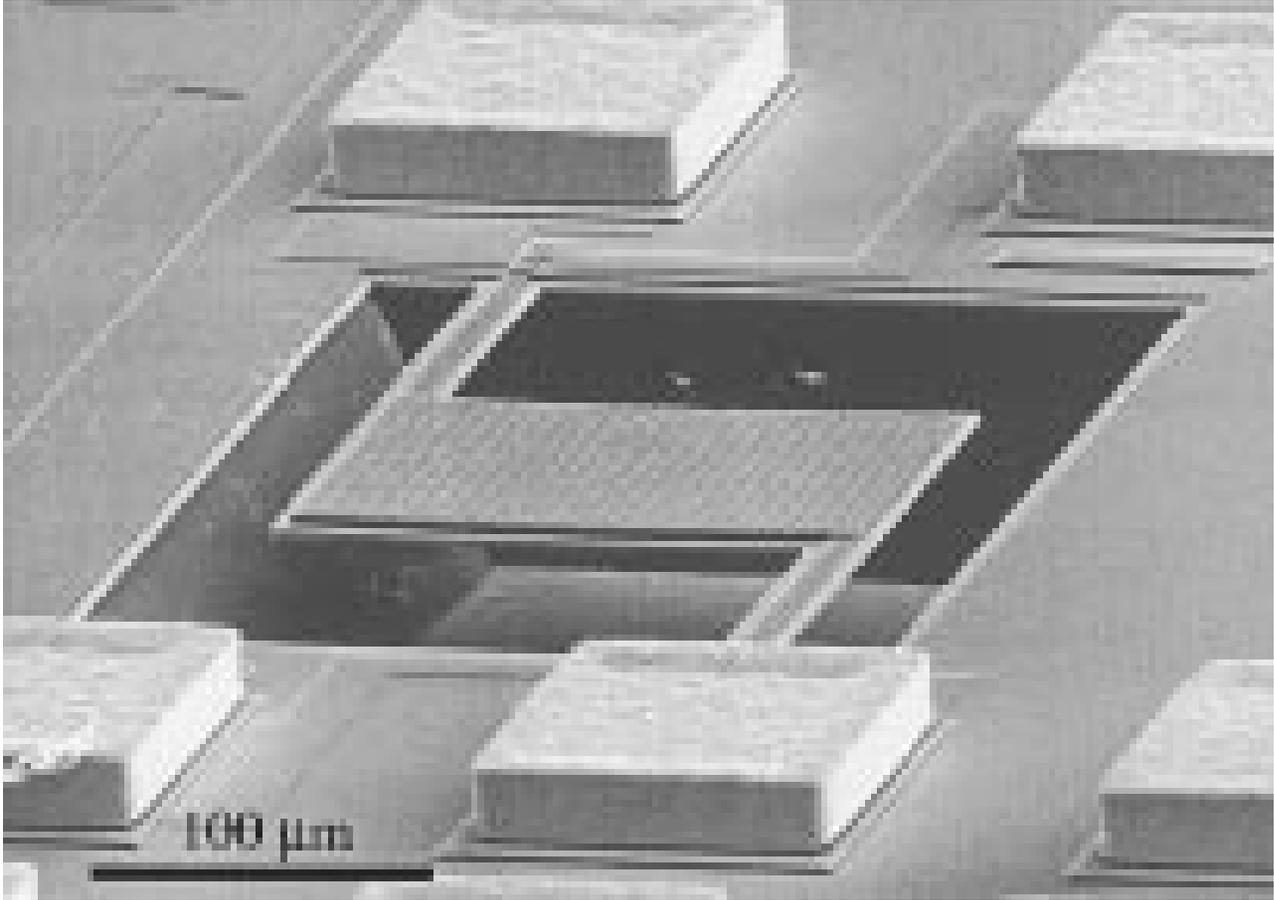
ATTUATORE: è un dispositivo che riceve una informazione mediante un segnale elettrico e restituisce un segnale d'uscita costituito da una grandezza fisica diversa (ad esempio, il monitor → immagine, l'altoparlante → suono, ...).

Tecnologie

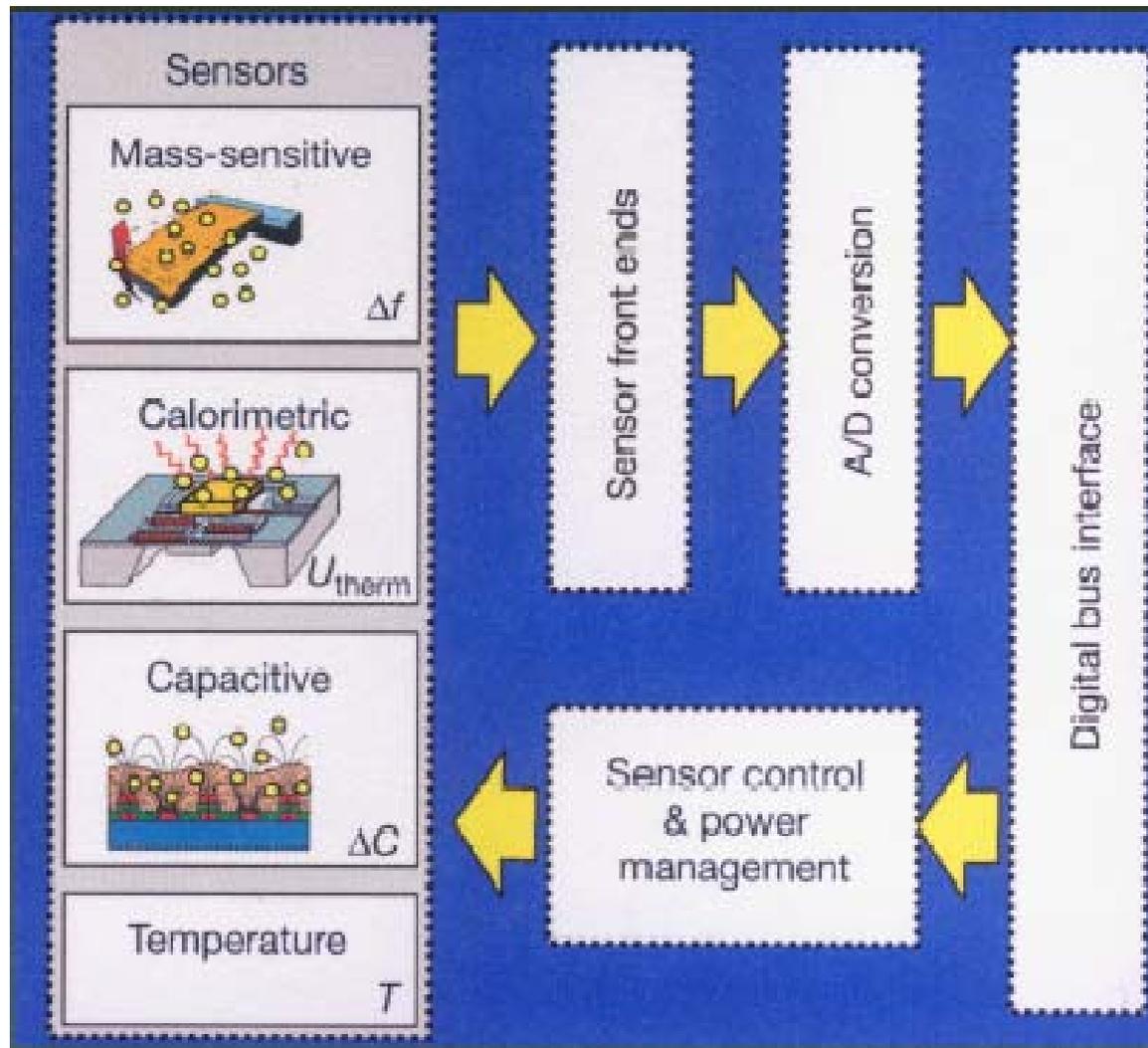
- tradizionali (es. termocoppie, estensimetri ecc.)

- a stato solido:
 - sensori di immagine (CMOS, CCD),
 - MEMS
(MicroElectroMechanicalSystems),
 - sensori chimici (micronose),
 - sensori biologici (lab-on-a-chip).

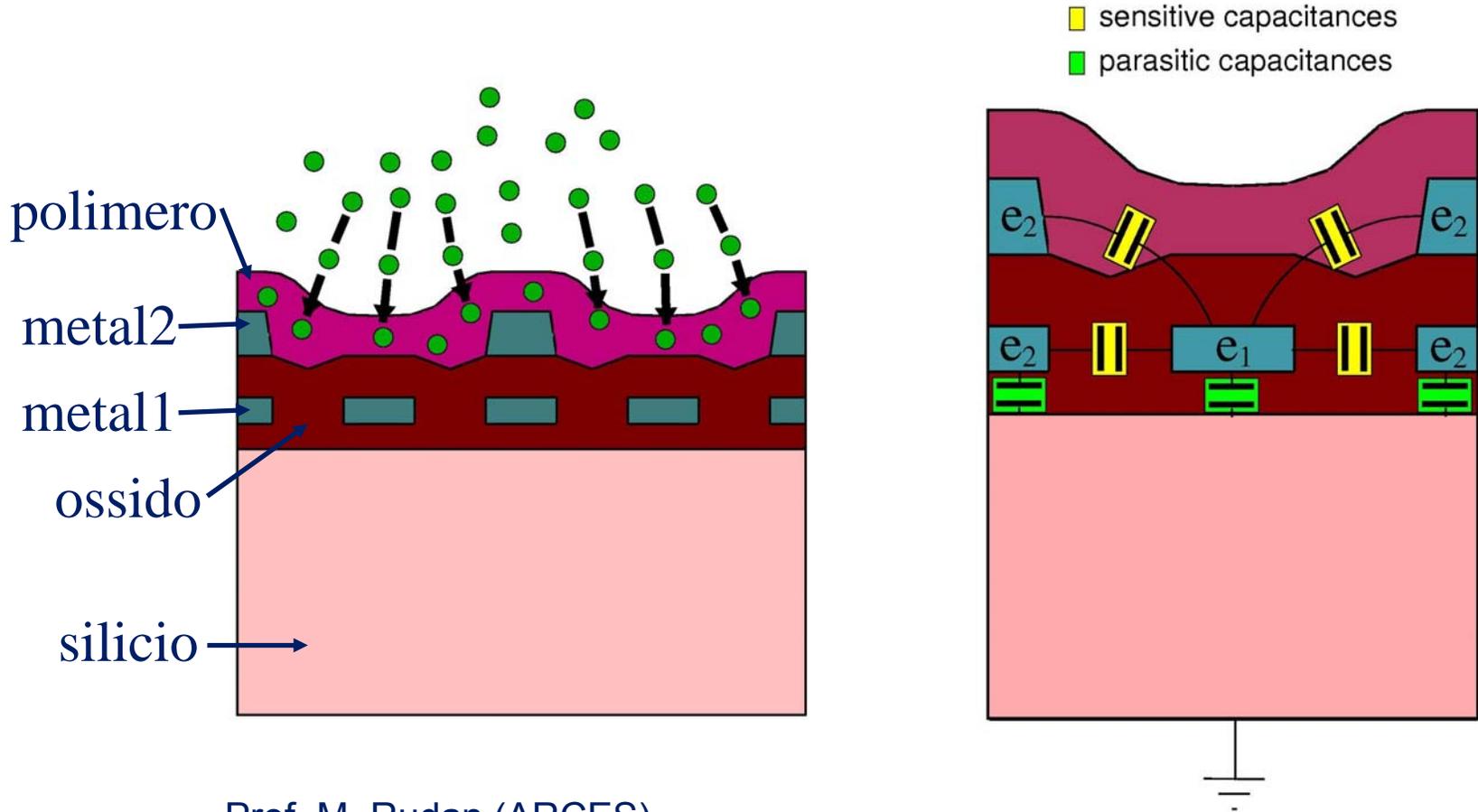
MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems)



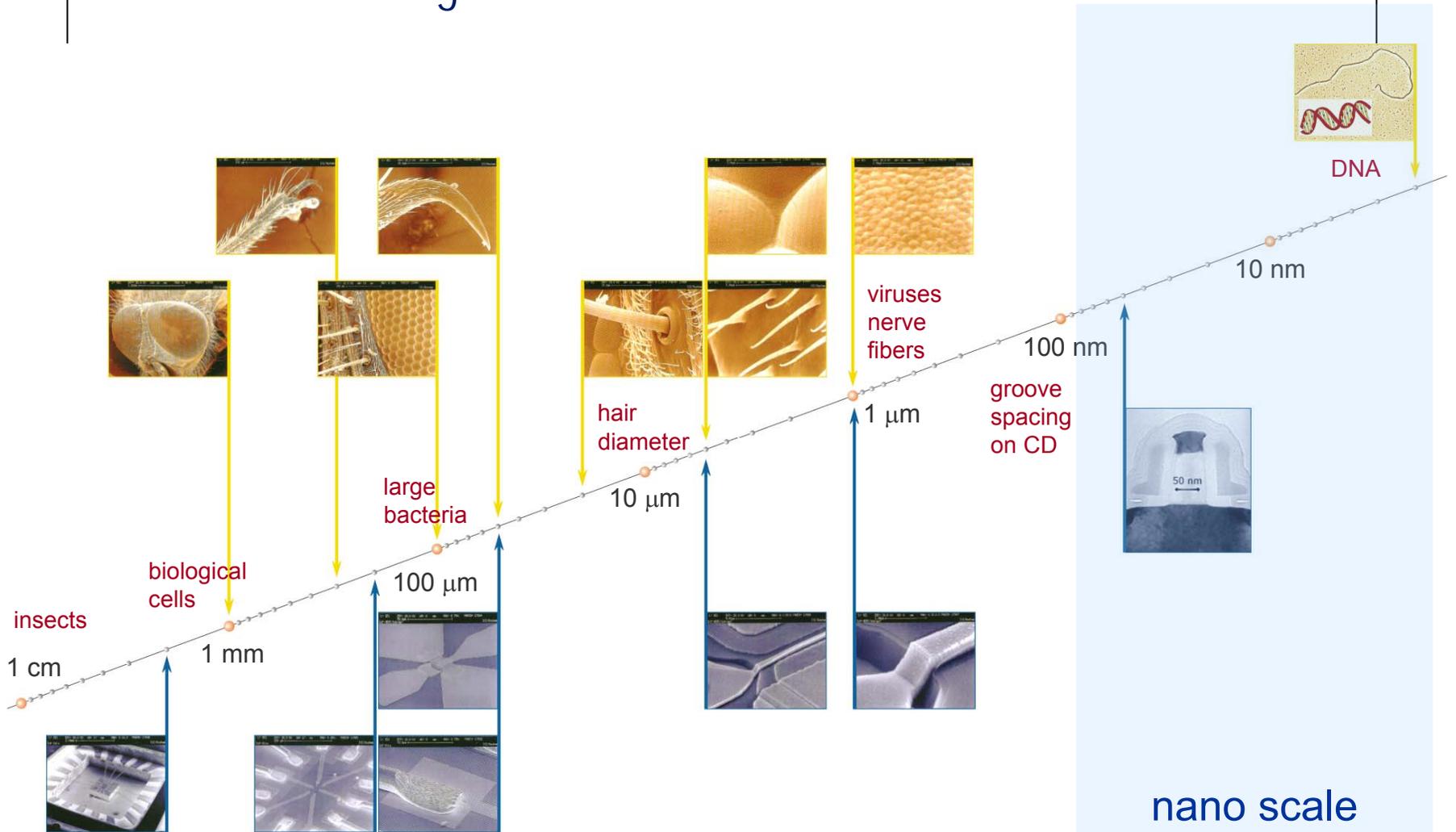
Sensori chimici: il micronaso



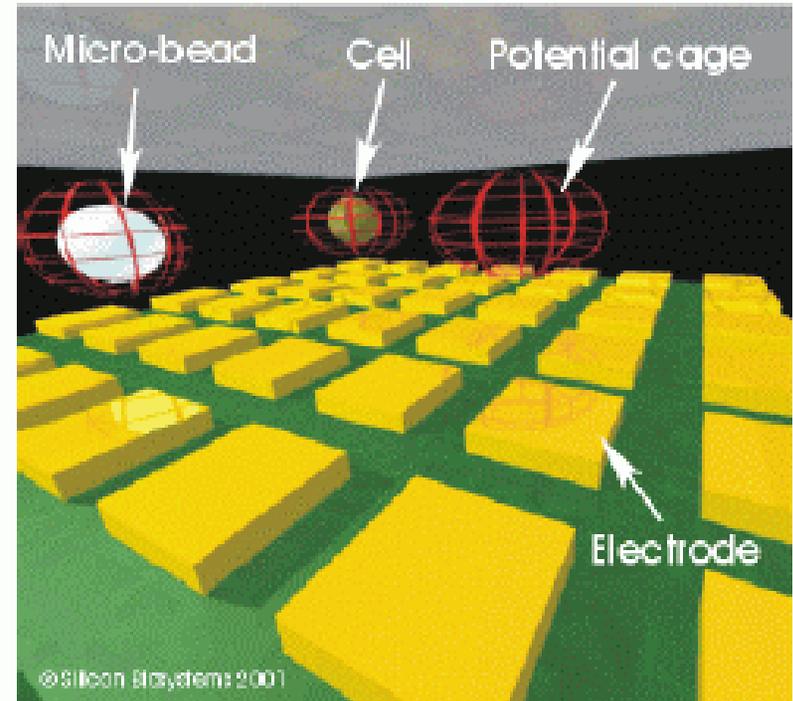
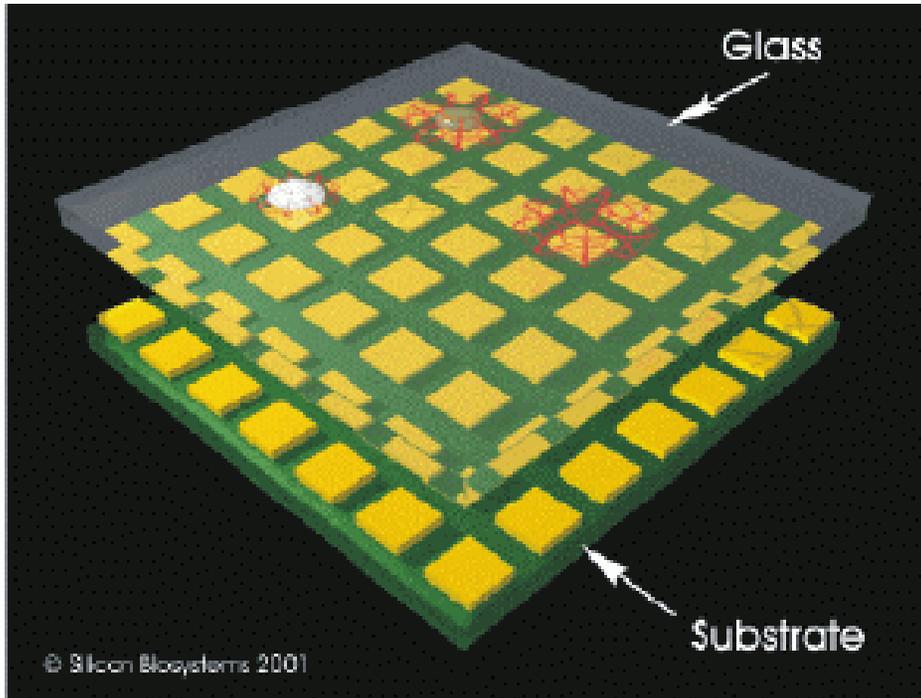
Sensori chimici capacitivi



Feature size scaling



When nano-electronics meets biology



Prof. R. Guerrieri (ARCES), Ing. N. Manaresi (www.siliconbiosystems.com)

Metodi di classificazione dei sensori

- ✓ Sulla base della tecnologia e del principio fisico utilizzato (piezoelettrici, MEMS, ...)
- ✓ Funzione svolta (di accelerazione, di pressione, ...)
- ✓ Particolare settore cui sono destinati (sensori chimici, biosensori, ...)

- In base al loro comportamento energetico
- In base alle grandezze fisiche da misurare

- in base al comportamento energetico

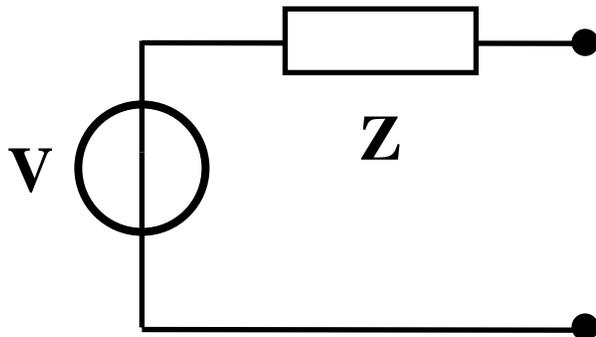
SENSORI ATTIVI : convertono direttamente l'energia dell'ingresso in energia di uscita, senza l'ausilio di sorgenti esterne.

→ forniscono in uscita un segnale elettrico ottenuto mediante trasformazione d'energia.

SENSORI PASSIVI : richiedono energia dall'esterno (eccitazione) per la conversione.

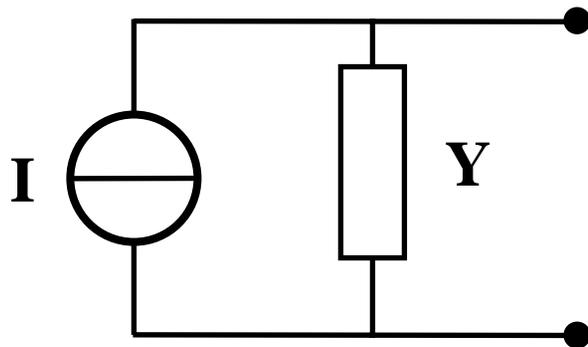
→ la grandezza da misurare influenza una grandezza elettrica passiva alimentata da sorgenti esterne.

Circuito equivalente di un sensore attivo



X misurando

$$V = f(X) \text{ (Thevenin)}$$



$$I = f(X) \text{ (Norton)}$$

f è la funzione che
definisce il modello
del sensore

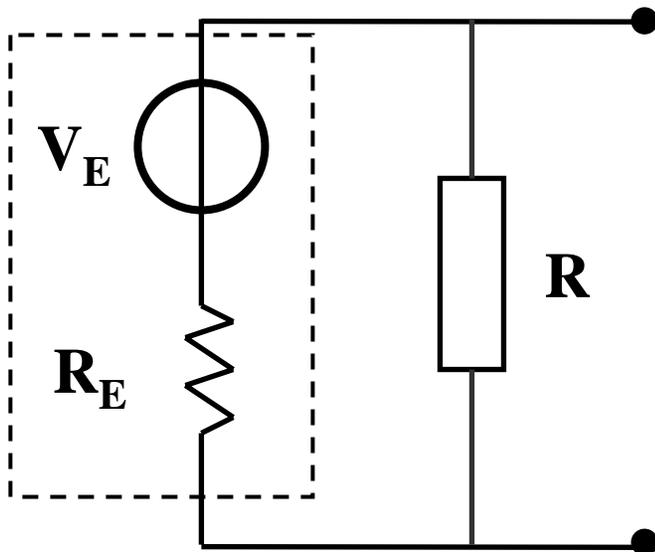
Osservazioni:

- non è detto che il legame tra V ed X o I ed X sia lineare (dipende dalla funzione f)
- è sempre verificata la condizione

$$V(X) = 0 \text{ per } X = 0; \quad I(X) = 0 \text{ per } X = 0$$

perchè la funzione f deriva dalle interazioni energetiche del sensore

Circuito equivalente di un sensore passivo



X misurando

$$R = f(X)$$

modello del sensore:

$$R \cong R_0(1 + A(X - X_0) + \dots)$$

$$\Delta R = k \Delta X$$

Tipi di sensori attivi:

1. sensori fotoelettrici
2. sensori piezoelettrici
3. termocoppie

Tipi di sensori passivi:

1. fotoresistori
2. estensimetri e strain-gauge piezoresistivi
3. termometro a resistenza di platino
4. sensori ad effetto Hall
5. sensori capacitivi

- in base alle grandezze fisiche da misurare

Forme di energia

1. energia atomica
 2. energia magnetica
 3. energia gravitazionale
 4. energia elettrica
 5. energia della massa
 6. energia meccanica
 7. energia molecolare
 8. energia nucleare
 9. energia della radiazione elettromagnetica
 10. energia termica
-

- in base alle grandezze fisiche da misurare

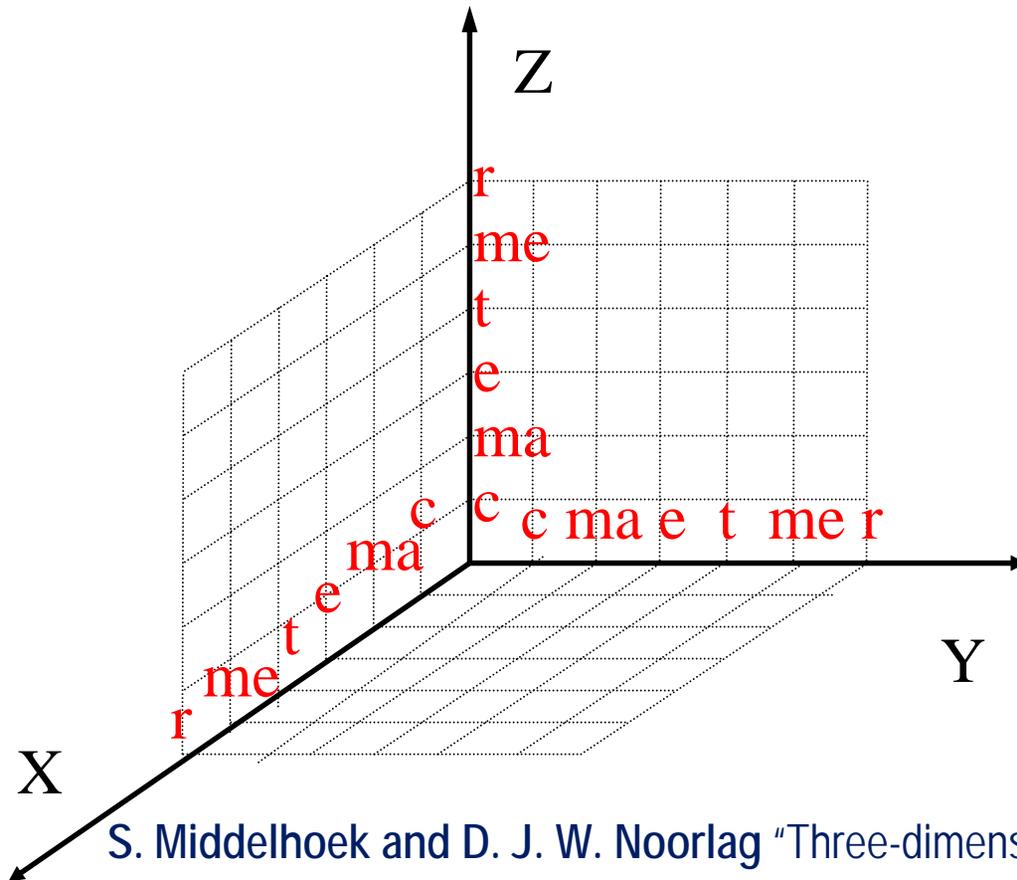
Forme di energia

1. energia atomica
 2. energia magnetica
 3. energia gravitazionale
 4. energia elettrica
 - ~~5. energia della massa~~
 6. energia meccanica
 7. energia molecolare
 - ~~8. energia nucleare~~
 9. energia della radiazione elettromagnetica
 10. energia termica
- 

Forme di energia

- 1) energia chimica \rightarrow c
- 2) energia magnetica \rightarrow ma
- 3) energia elettrica \rightarrow e
- 4) energia termica \rightarrow t
- 5) energia meccanica \rightarrow me
- 6) energia della radiazione elettromagnetica \rightarrow r

Rappresentazione tridimensionale dei sensori (Cubo di Middelhoek e Noorlag, 1981)



trasduzioni attive:

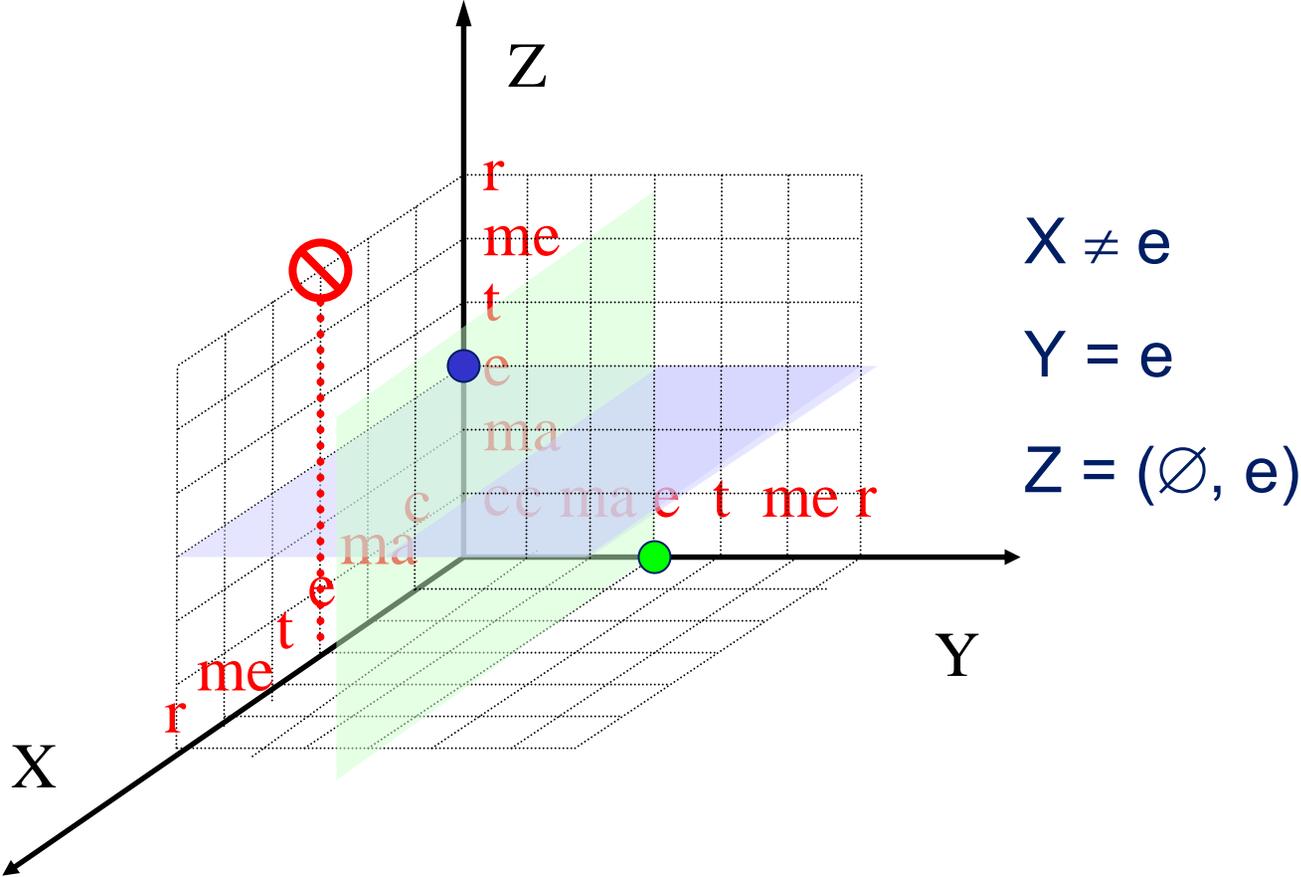
$$XY = 6 \times 6 = 36$$

trasduzioni passive:

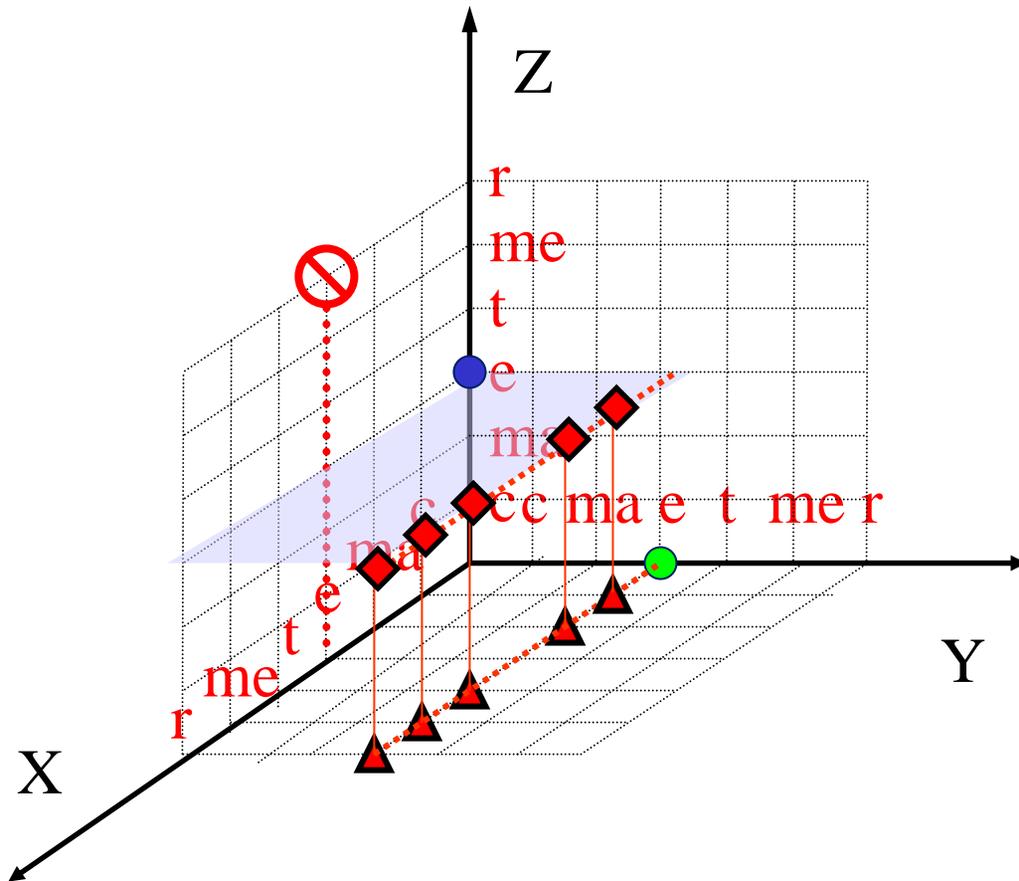
$$XYZ = 6 \times 6 \times 6 = \\ 36 \times 6 = 216$$

S. Middelhoek and D. J. W. Noorlag "Three-dimensional representation of input and output transducers", Sensors and Actuators, V. 2, pp. 29-41, 1981.

Rappresentazione tridimensionale dei sensori (Cubo di Middelhoek e Noorlag, 1981)



Rappresentazione tridimensionale dei sensori (Cubo di Middelhoek e Noorlag, 1981)



▲
sensori attivi:

$$6 - 1 = 5$$

◆
sensori passivi:

$$6 - 1 = 5$$

energia di
eccitazione: 1

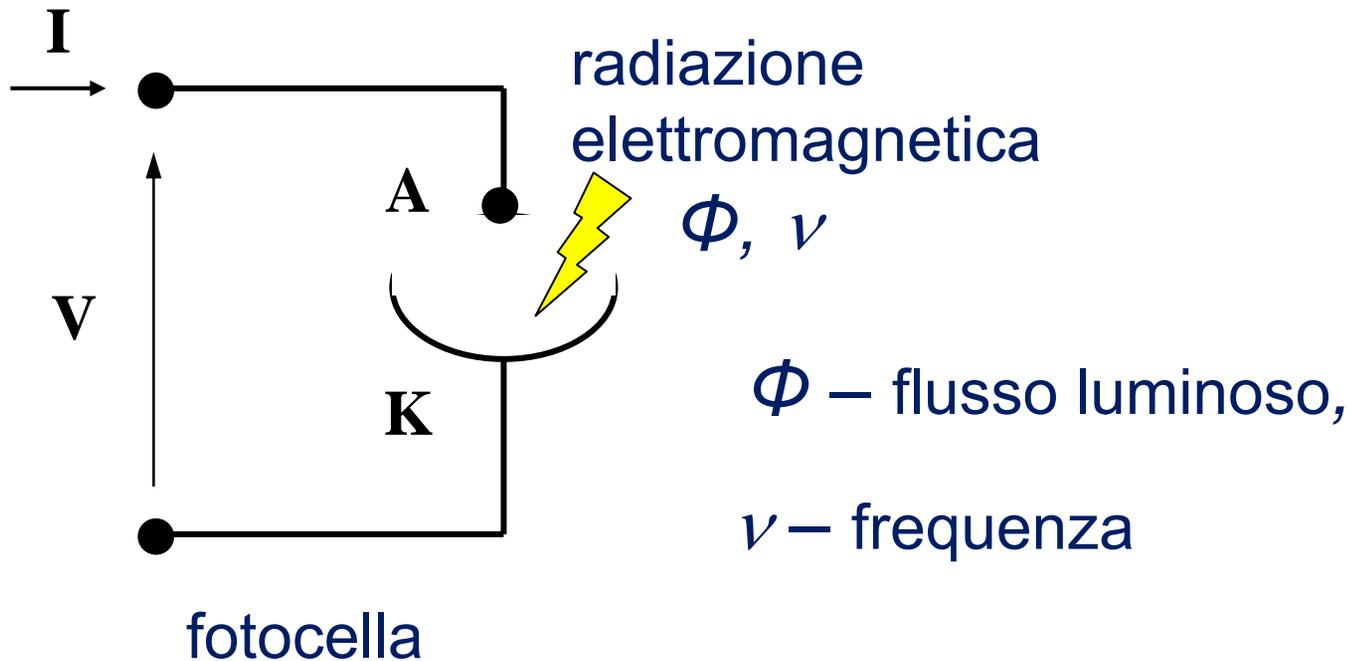
Sensori a stato solido

- ① sensori ottici (r)
- ② sensori meccanici (me)
- ③ sensori termici (t)
- ④ sensori magnetici (ma)
- ⑤ sensori chimici (c)

Principali effetti fisici nei sensori a stato solido

- ① effetto fotoelettrico
- ② effetto piezoelettrico ed effetto piezoresistivo
- ③ effetto termoelettrico ed effetto termoresistivo
- ④ effetto Hall

EFFETTO FOTOELETTRICO (Albert Einstein, 1905)



E. De Castro "Fondamenti di Elettronica", UTET

La luce e i fotoni

l'effetto fotoelettrico fu spiegato da Einstein estendendo l'idea della quantizzazione dell'energia associata alla radiazione elettromagnetica del corpo nero di Plank (1900) a tutte le onde elettromagnetiche.

Il quanto di energia elettromagnetica è associato ai fotoni

$$E = h \nu$$

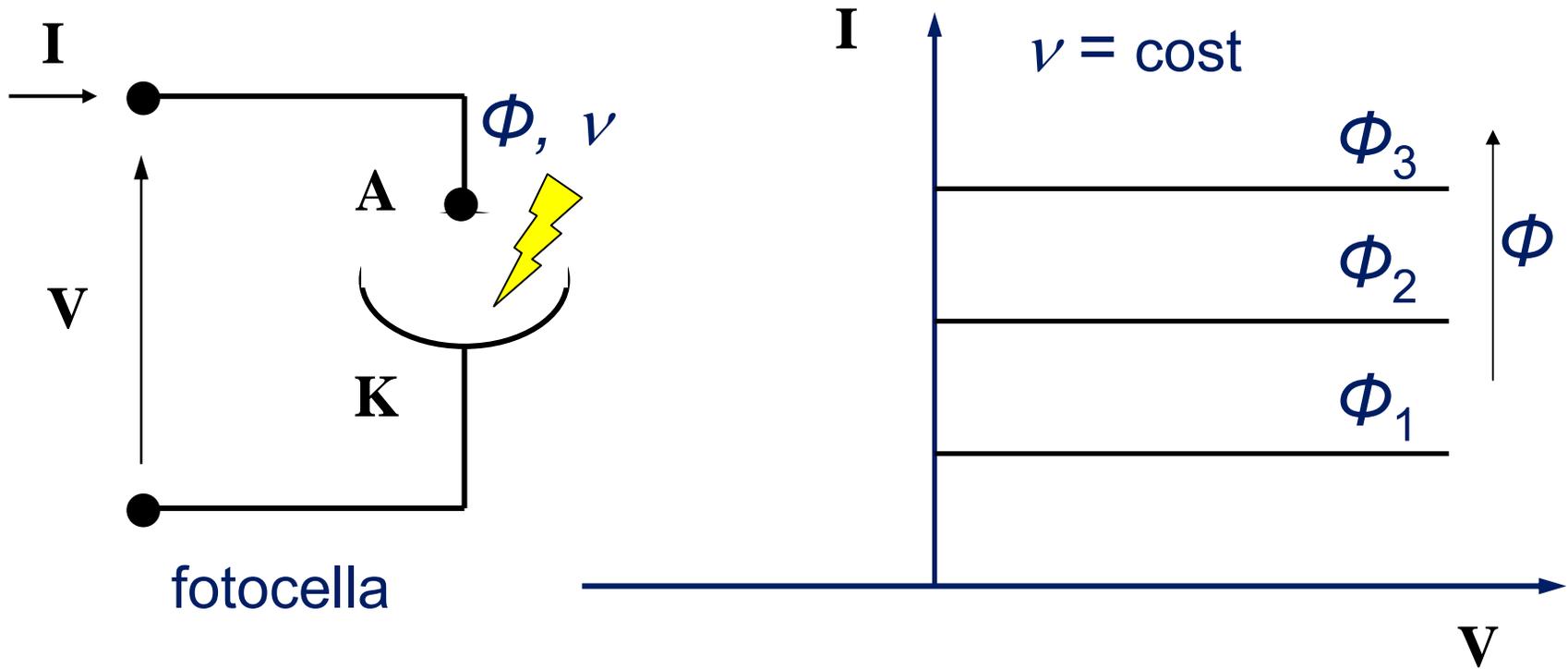
$h = 6,62 \times 10^{-34}$ Js (costante di Plank)

ν frequenza della radiazione

Φ flusso luminoso (misurato in W): per l'onda monocromatica è

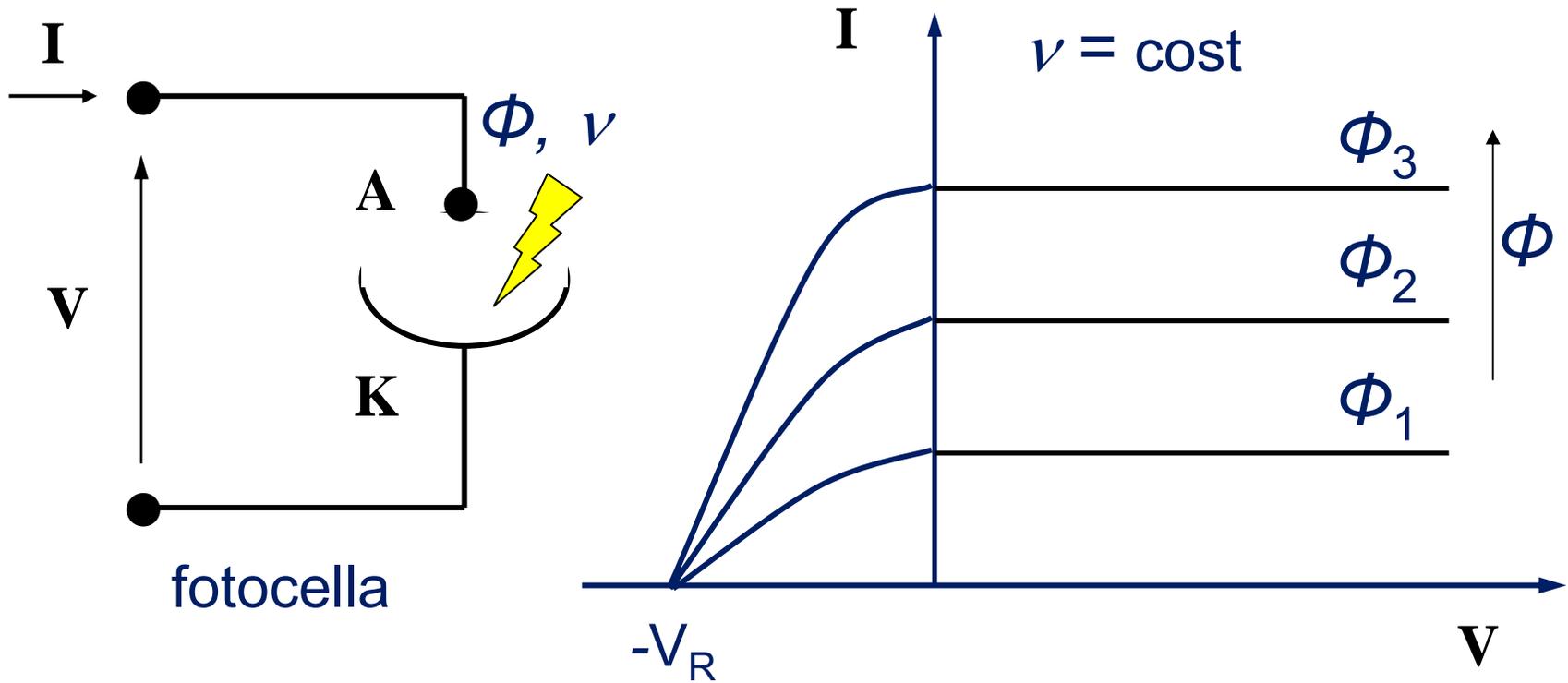
$\Phi = E \Phi_{\text{ph}}$, con Φ_{ph} – flusso di fotoni $\Phi_{\text{ph}} = dN_{\text{ph}}/dt$

Esperimento dell'effetto fotoelettrico - I



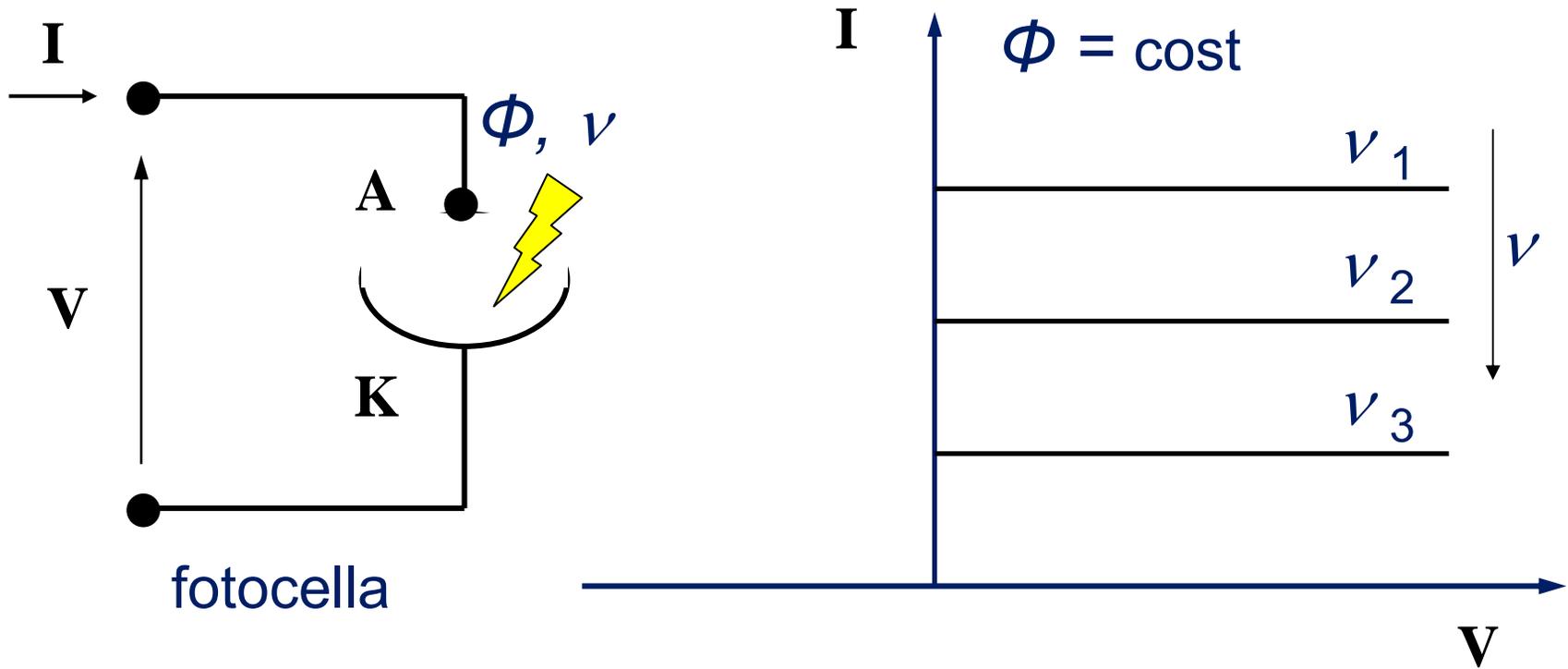
1. I indipendente da V e crescente con Φ

Esperimento dell'effetto fotoelettrico - II



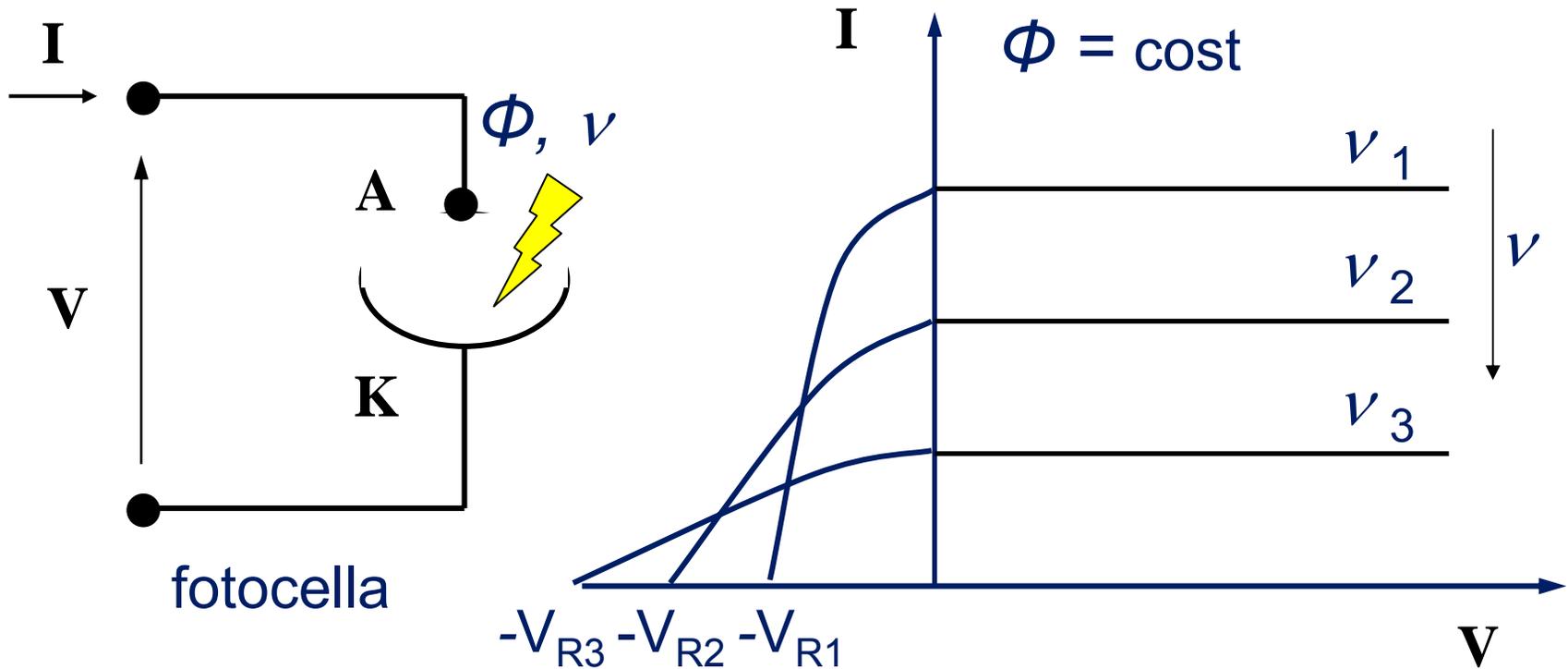
2. V_R indipendente da Φ

Esperimento dell'effetto fotoelettrico - III



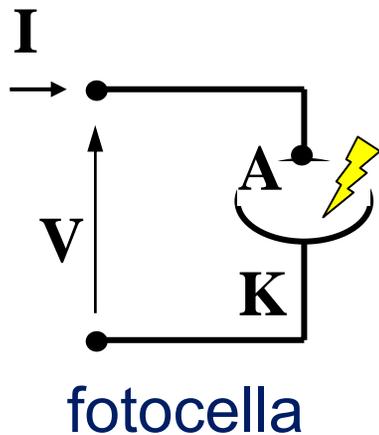
3. I indipendente da V e decrescente con ν

Esperimento dell'effetto fotoelettrico - IV



4. V_R proporzionale a ν

Interpretazione dell'effetto fotoelettrico - I



ϕ_M – lavoro di estrazione

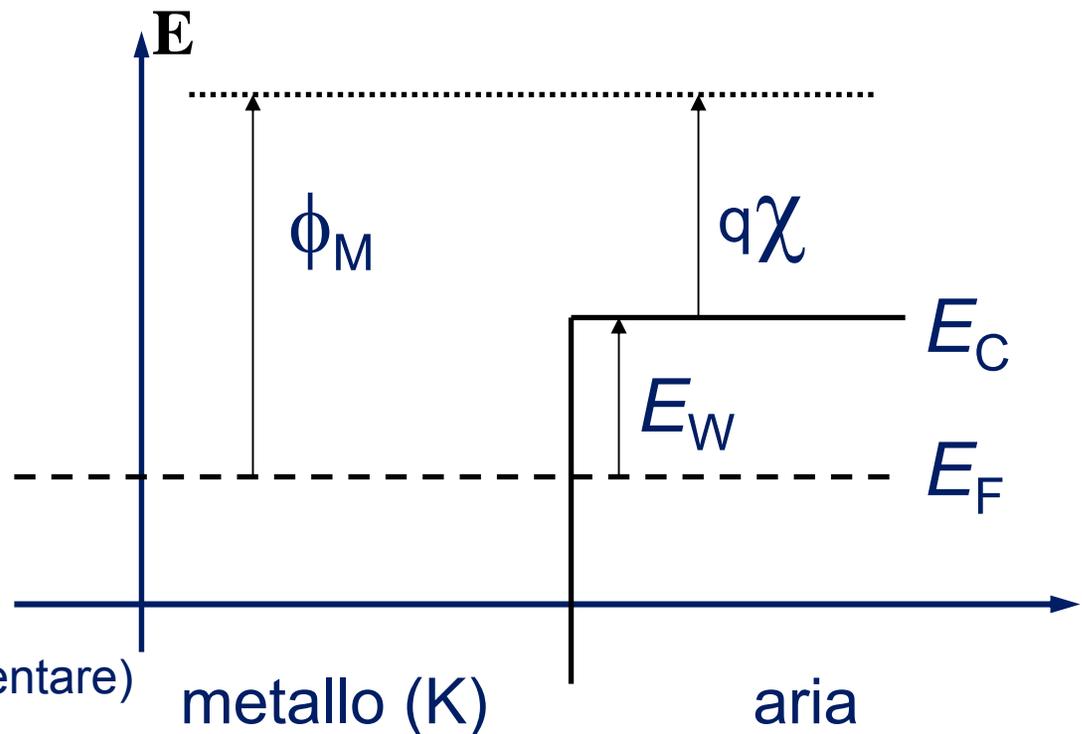
$q\chi$ – affinità elettronica

$q = 1,602 \times 10^{-19}$ C (carica elementare)

E_F – livello di Fermi

E_W – barriera tra metallo e aria

Interfaccia metallo-aria

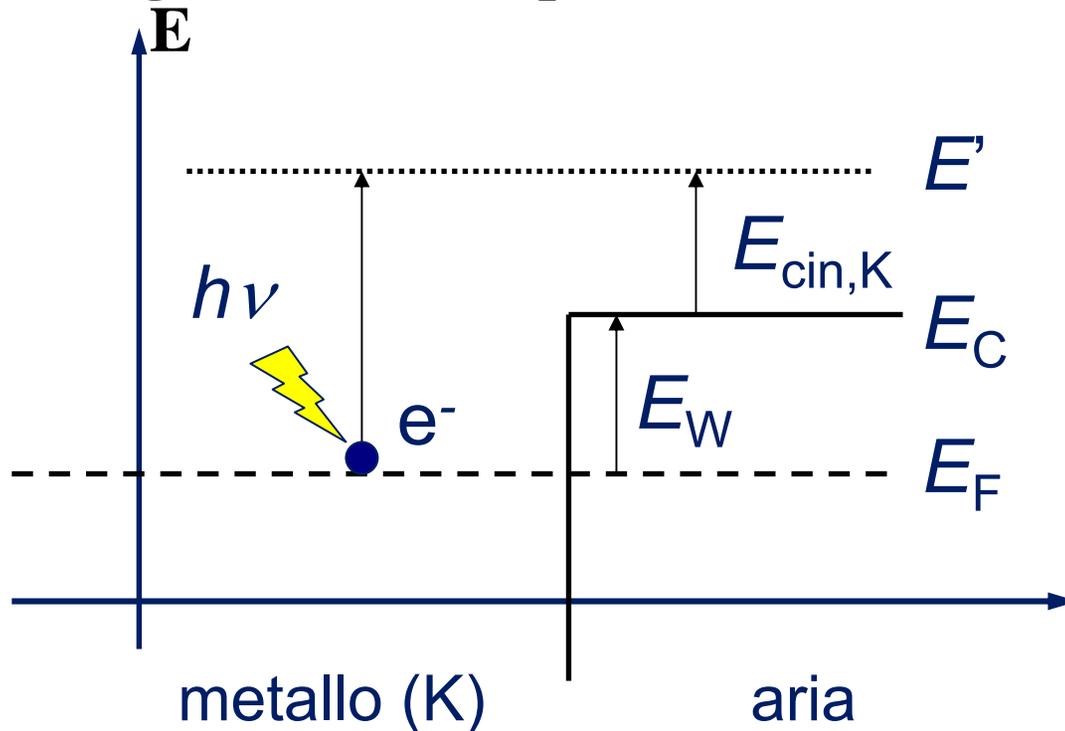


E_C – minimo della banda di conduzione

$$E_W = \phi_M - q\chi$$

Interpretazione dell'effetto fotoelettrico - II

Energia cinetica acquisita con l'assorbimento di un fotone



$$E_{cin,K} = m u_K^2/2 = E' - E_C = (h\nu + E_F) - (E_W + E_F) = h\nu - E_W$$

$$E_{cin,A} = m u_K^2/2 + qV$$

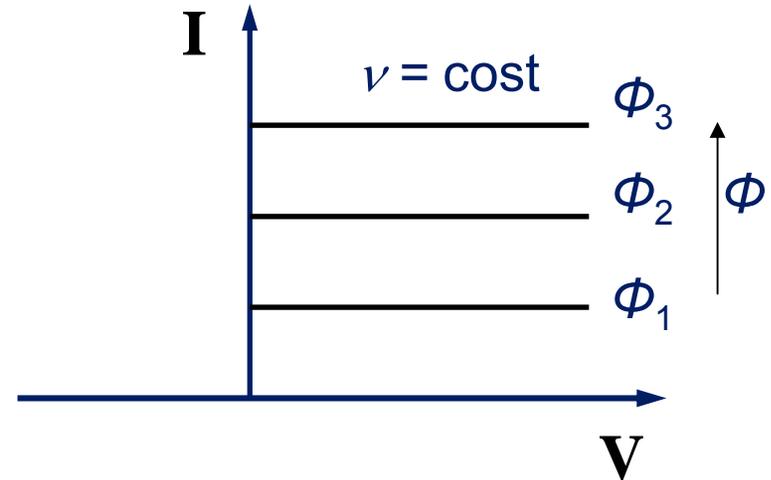
Interpretazione dell'effetto fotoelettrico - III

1. I indipendente da V e crescente con Φ

$$I = q \frac{dN_e}{dt} = q \Phi_{ph}$$

$$E_{cin,A} = m u_K^2/2 + qV > 0$$

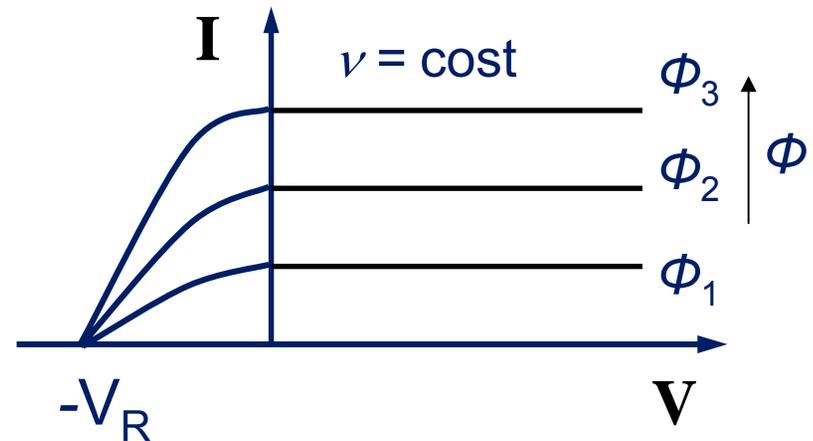
$$\Phi = E \Phi_{ph} = h \nu \Phi_{ph}$$



2. V_R indipendente da Φ

$$E_{cin,A} = m u_K^2/2 - qV_R = 0$$

$$qV_R = h \nu - E_W$$



Interpretazione dell'effetto fotoelettrico - IV

3. I indipendente da V e decrescente con ν

$$I = q \frac{dN_e}{dt} = q \Phi_{ph}$$

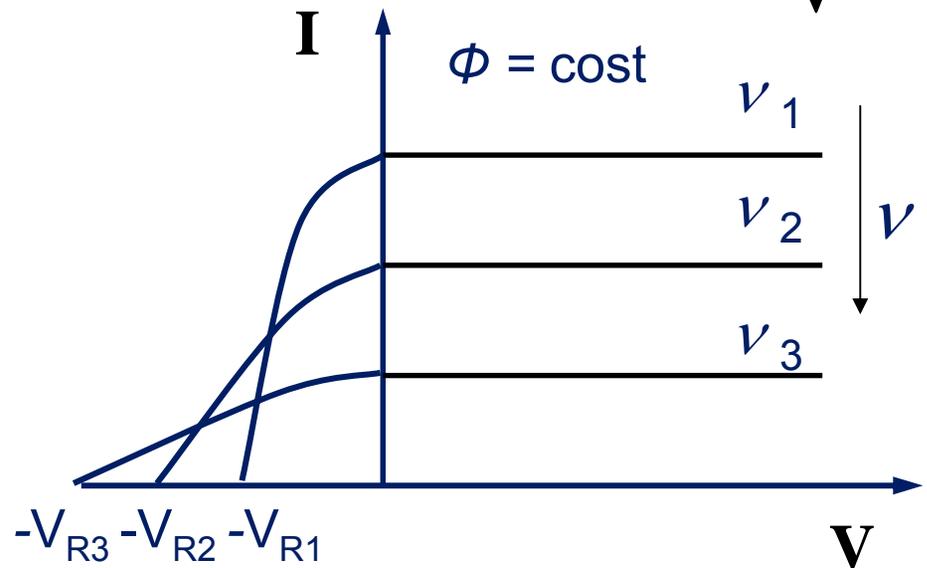
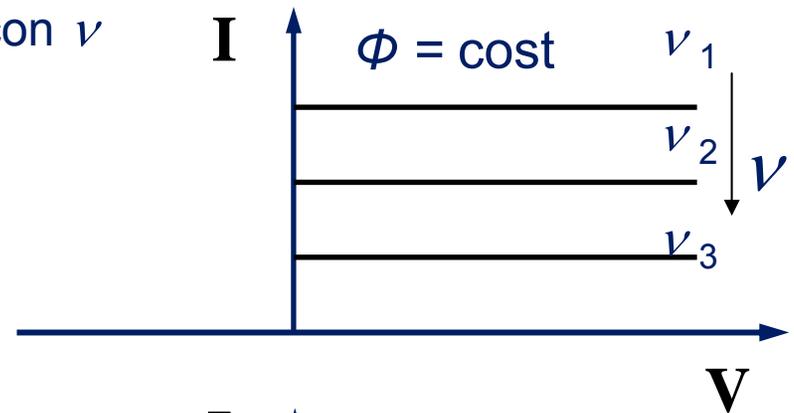
$$E_{cin,A} = m u_K^2/2 + qV > 0$$

$$\Phi = E \Phi_{ph} = h \nu \Phi_{ph}$$

4. V_R proporzionale a ν

$$E_{cin,A} = m u_K^2/2 - qV_R = 0$$

$$qV_R = h\nu - E_W$$



EFFETTO PIEZOELETTRICO

(Pierre e Jacques Curie, 1880)

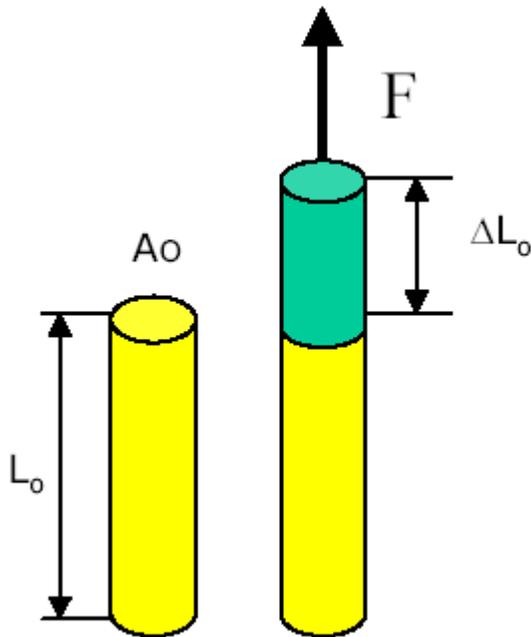
- Esiste in cristalli naturali (quarzo, ossido di zinco) e in ceramiche e polimeri artificiali opportunamente polarizzati (PTZ)
- Consiste nella generazione di carica elettrica da parte di un materiale cristallino sottoposto ad una sollecitazione meccanica (piezo – pressione)
- E' un effetto reversibile:

energia meccanica  energia elettrica

S. M. Sze “Semiconductor Sensors”, Wiley Interscience

La forza e la deformazione dei solidi

COMPORTAMENTO ELASTICO: l'effetto di una sollecitazione meccanica (trazione, pressione) su un solido è di produrre una deformazione (allungamento, compressione).



sforzo (stress): $\sigma = F/A_0$ [Pa = N/m²]

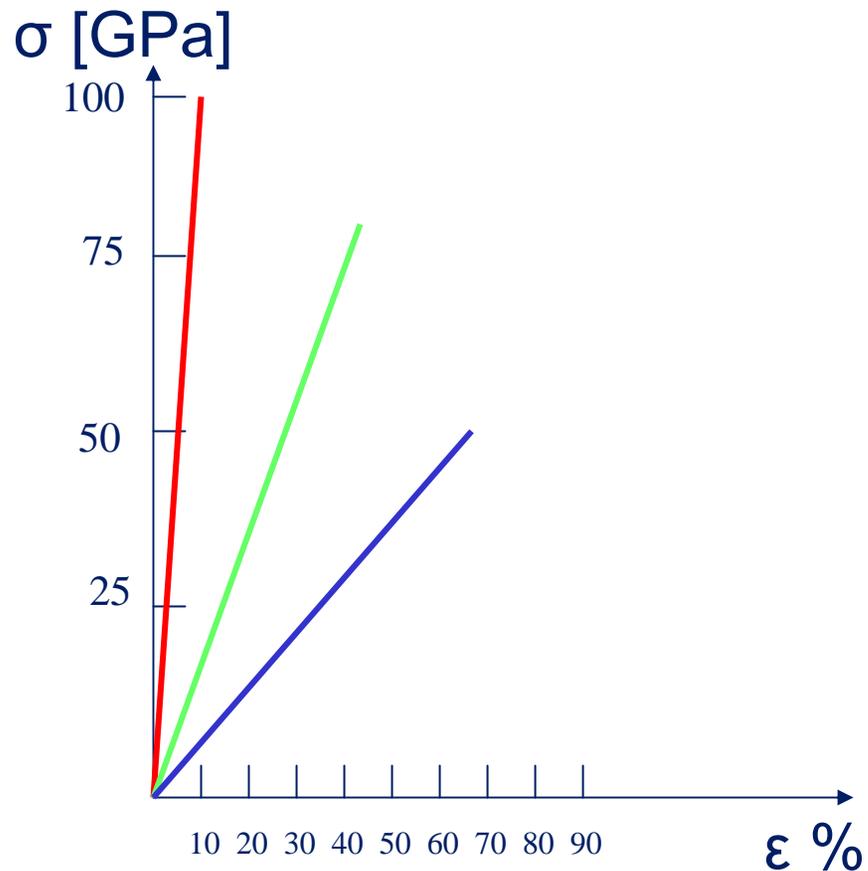
deformazione (strain): $\varepsilon = \Delta L_0/L_0$

LEGGE DI HOOKE:

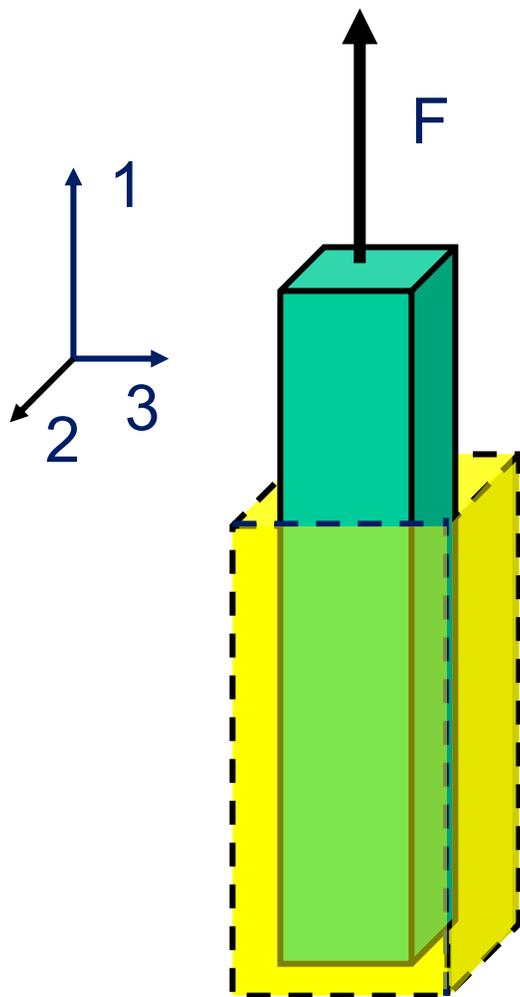
$E = \sigma / \varepsilon$ modulo di Young [Pa]

Rigidità dei materiali:

MATERIALE	E (GPa)
diamante	1035
silicio	190
quarzo (SiO ₂)	73
acciaio inossidabile	200
ferro	196
alluminio	70



COEFFICIENTE DI POISSON ν :



deformazione nominale:

$$\varepsilon_1 = \Delta L_0 / L_0$$

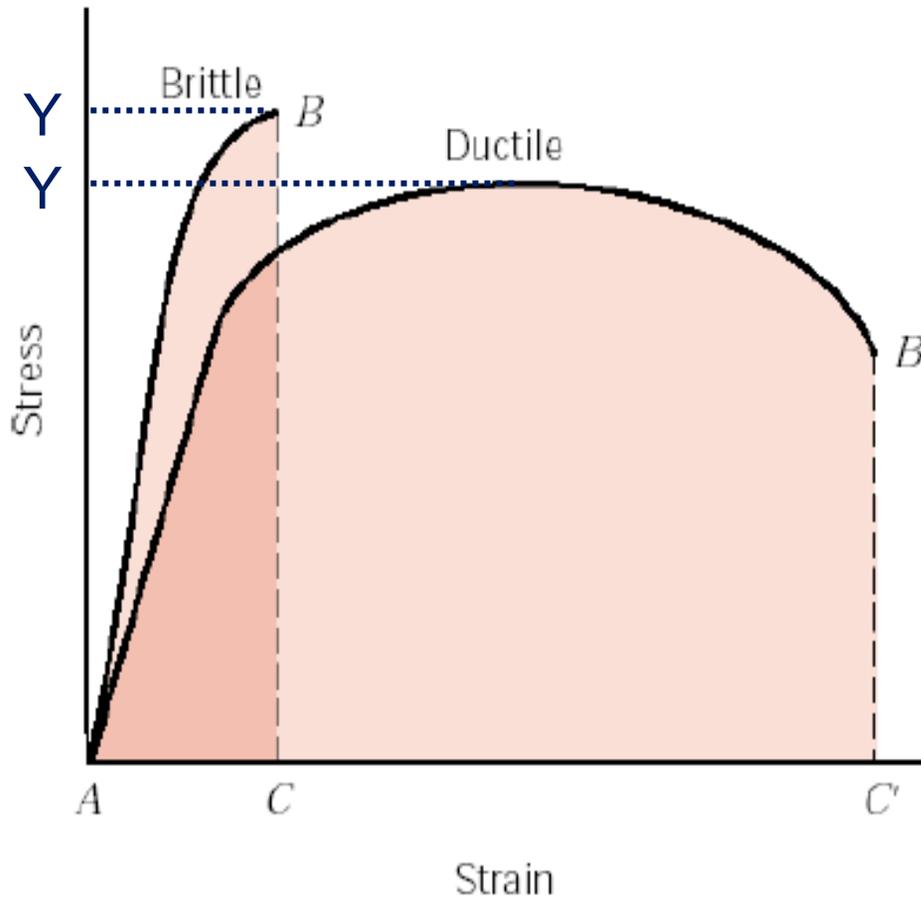
$$\nu = - \varepsilon_2 / \varepsilon_1 = - \varepsilon_3 / \varepsilon_1$$

$$\Delta V / V = \varepsilon_1 (1 - 2\nu)$$

<u>materiale</u>	<u>ν</u>
caucciù	0,5
metalli	0,35
ceramici	0,17

Fragilità dei materiali:

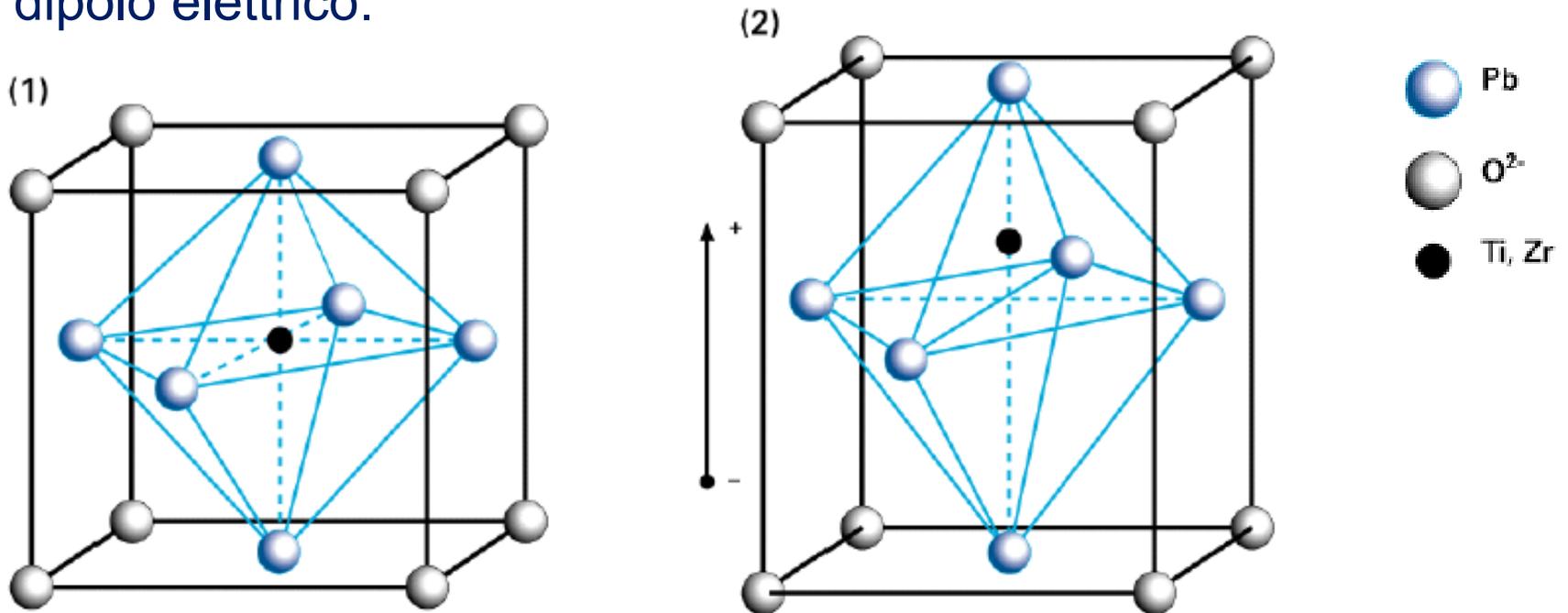
Yield stress (limite di snervamento)



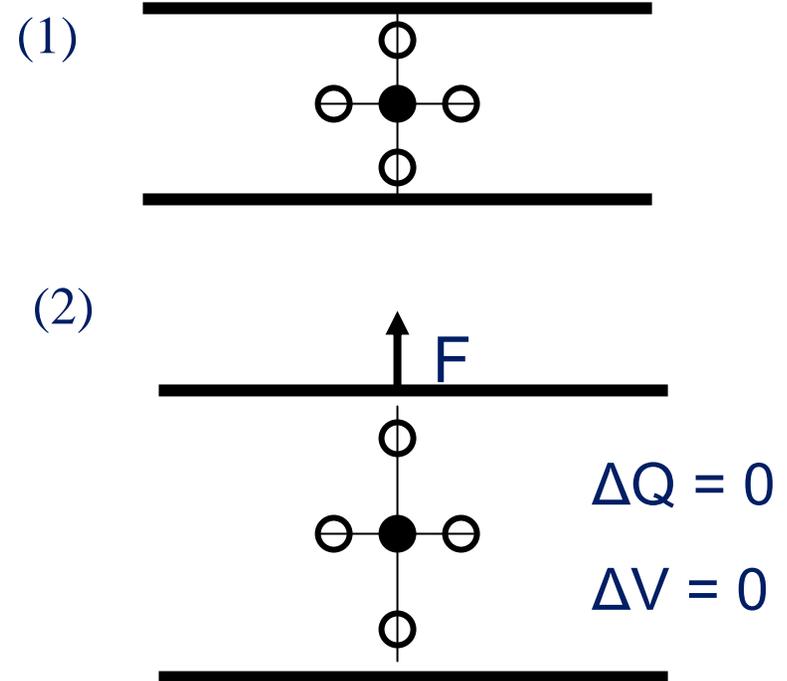
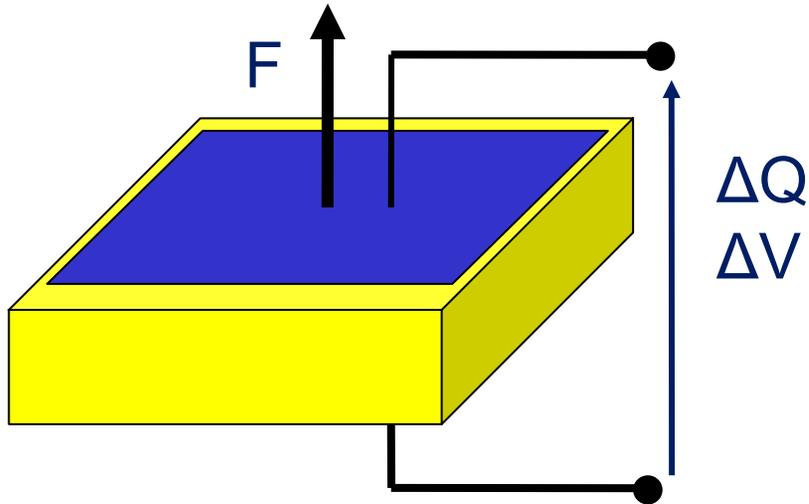
MATERIALE	Y (GPa)
diamante	53
silicio	7
quarzo (SiO ₂)	8,4
acciaio inossidabile	2,1
ferro	12,6
alluminio	0,17

La deformazione di un ceramico policristallino PZT (Piombo Zirconio Titanio: $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$)

Nel centro del reticolo CFC l'atomo pesante è confinato in una posizione metastabile: sotto l'azione di una forza o di un campo elettrico, esso si sposta causando uno squilibrio nelle cariche \rightarrow dipolo elettrico.

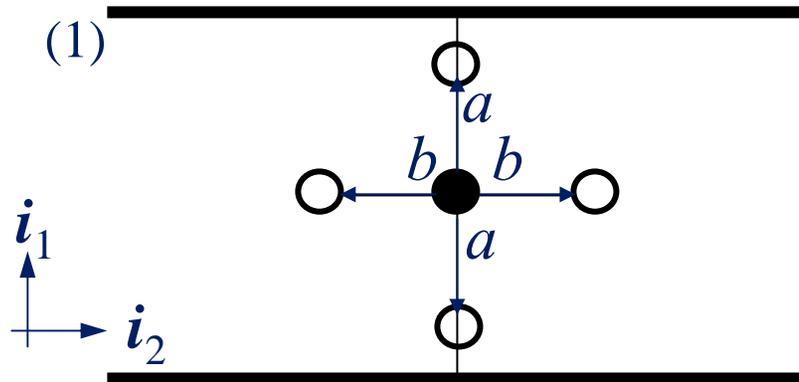


Esperimento dell'effetto piezoelettrico - I

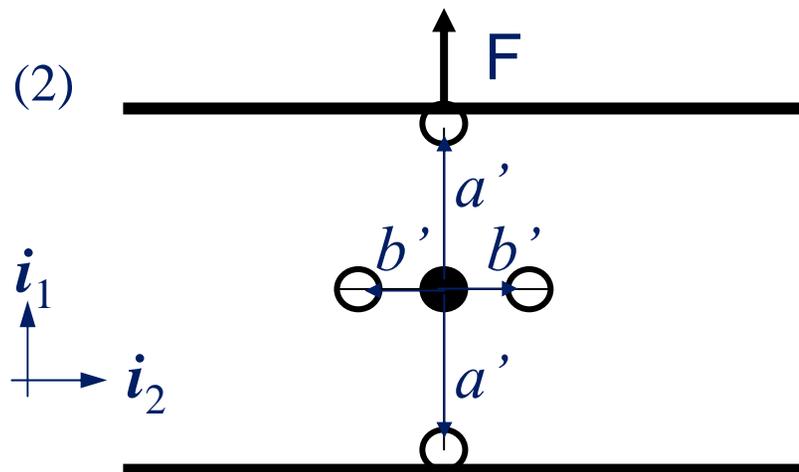


I cristalli centrosimmetrici (Si, Ge) non sono piezoelettrici. I centri risultanti delle cariche positive e negative non si muovono, e quindi non si formano dipoli.

Esperimento dell'effetto piezoelettrico - II

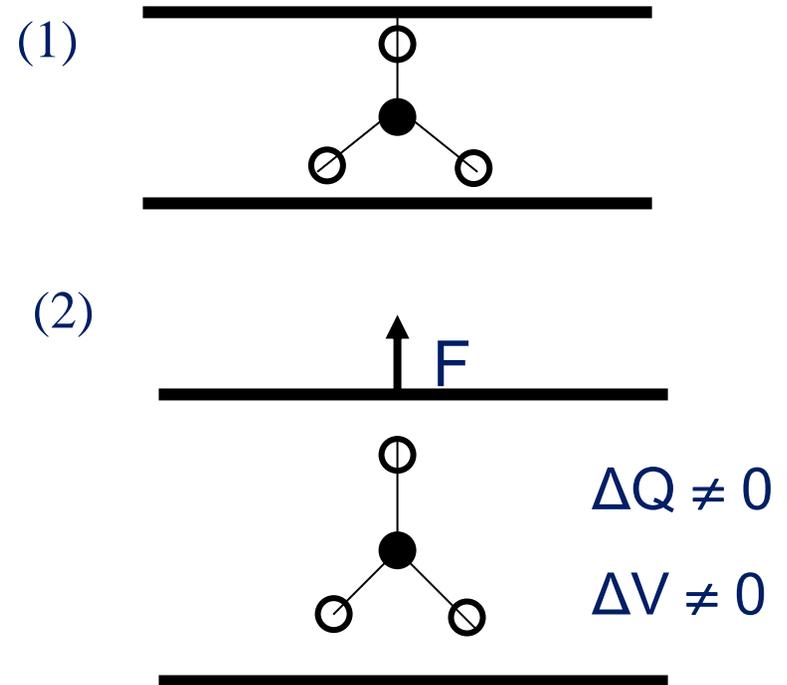
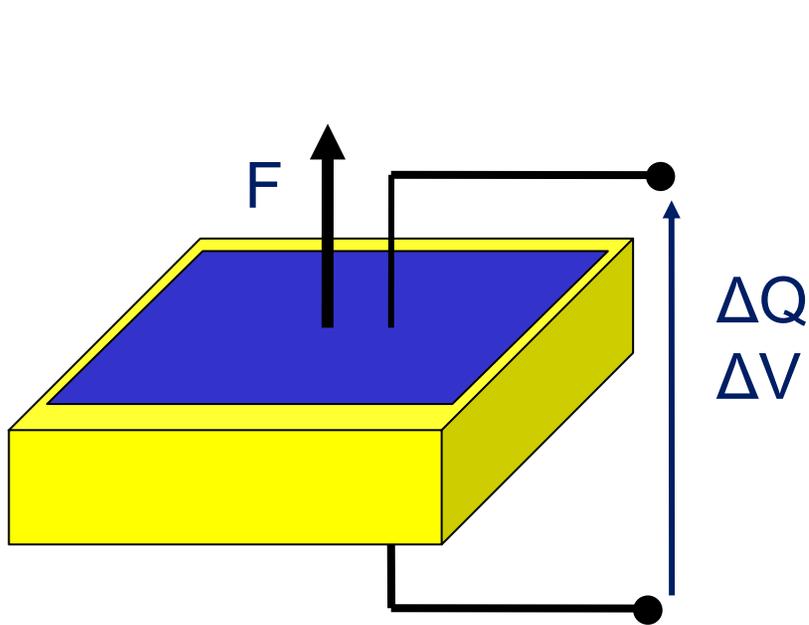


$$P = ai_1 - ai_1 + bi_2 - bi_2 = 0$$



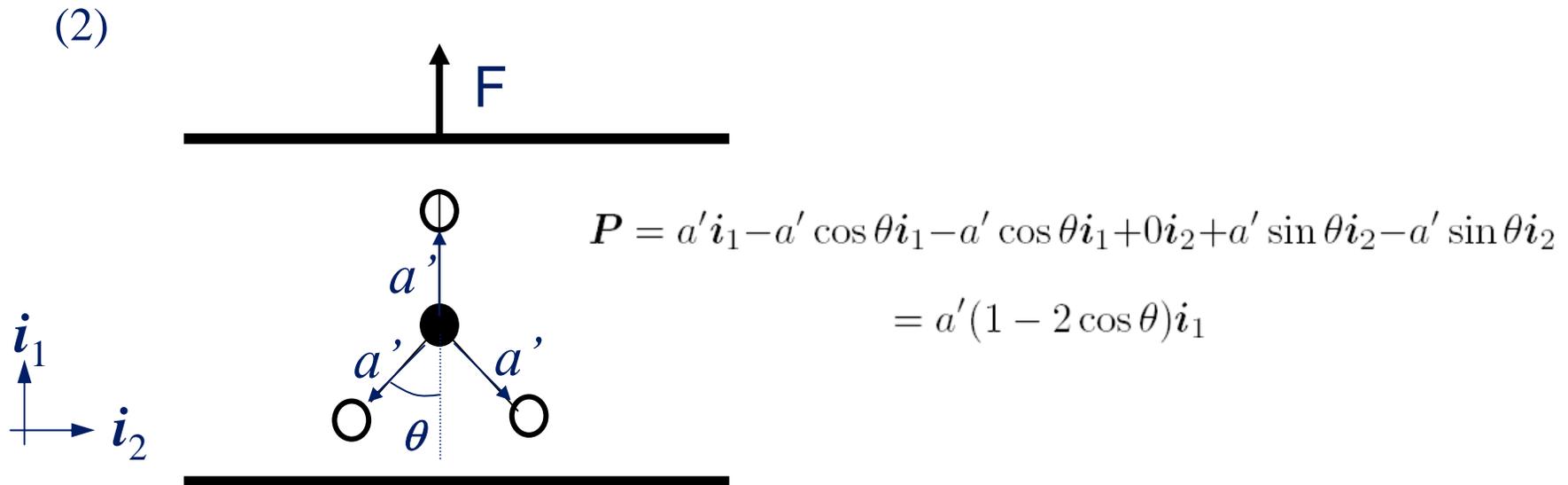
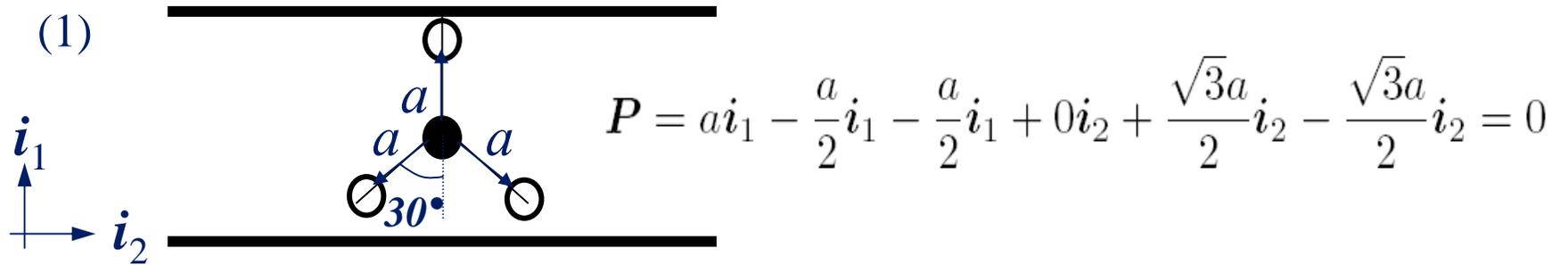
$$P = a'i_1 - a'i_1 + b'i_2 - b'i_2 = 0$$

Esperimento dell'effetto piezoelettrico - III



I cristalli non centrosimmetrici (quarzo, PTZ) sono piezoelettrici. I centri risultanti delle cariche positive e negative si muovono, e quindi la struttura non è più bilanciata (polarizzazione).

Esperimento dell'effetto piezoelettrico - IV



Interpretazione dell'effetto piezoelettrico - I

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}_e + \mathbf{P} \quad \text{spostamento elettrico}$$

$$\mathbf{P}_e = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E}, \quad \chi_e - \text{suscettività dielettrica}$$

$$\varepsilon_0(1 + \chi_e) = \varepsilon \quad \text{costante dielettrica}$$

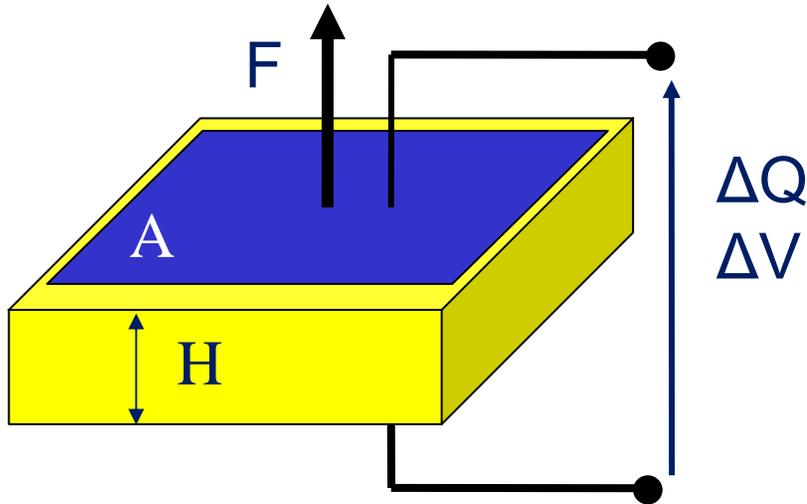
$$\mathbf{P} = d \sigma \mathbf{i}_1 \quad \begin{array}{l} \text{polarizzazione indotta} \\ \text{dall'effetto piezoelettrico} \end{array}$$

d è il coefficiente piezoelettrico:

$$d_{\text{SiO}_2} = 2,33 \text{ pC/N}$$

$$d_{\text{PZT}} = 370 \text{ pC/N}$$

Interpretazione dell'effetto piezoelettrico - II



$$\mathbf{E} = 0, \quad \mathbf{F} = A\sigma \mathbf{i}_1$$

$$\mathbf{D} = d \sigma \mathbf{i}_1, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\int_{\Omega} \nabla \cdot \mathbf{D} d\Omega = \Delta Q, \quad \frac{\Delta Q}{C} = \Delta V$$

$$\int_{\Sigma} \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\nu} d\Sigma = DA$$

$$\Delta Q = DA = d\sigma A = dF$$

$$\mathbf{Q} = 0, \quad \mathbf{F} = A\sigma \mathbf{i}_1$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} + d \sigma \mathbf{i}_1,$$

$$\mathbf{D} = 0, \quad \mathbf{E} = -d \sigma / \varepsilon$$

$$\Delta V = \frac{dF}{\varepsilon A / H} = \frac{dH\sigma}{\varepsilon}$$

Gli effetti legati alla polarizzazione dei dielettrici

Dalla stessa causa fisica (polarizzazione di dipoli in cristalli con bassa simmetria) nascono anche gli effetti piroelettrico e ferroelettrico.

effetto piroelettrico: la polarizzazione del cristallo dipende linearmente dalla temperatura a causa del fatto che l'espansione termica varia la lunghezza dei dipoli. Es. ZnO (ossido di zinco). Normalmente l'effetto è rilevabile soltanto quando il cristallo viene riscaldato con modifica di polarizzazione.

effetto ferroelettrico: la polarizzazione del cristallo presenta un ciclo di isteresi (il comportamento di polarizzazione che viene osservato aumentando la tensione non è seguito nel corso della sua diminuzione a causa della polarizzazione di saturazione). Es. BaTiO₃ (titanato di bario).

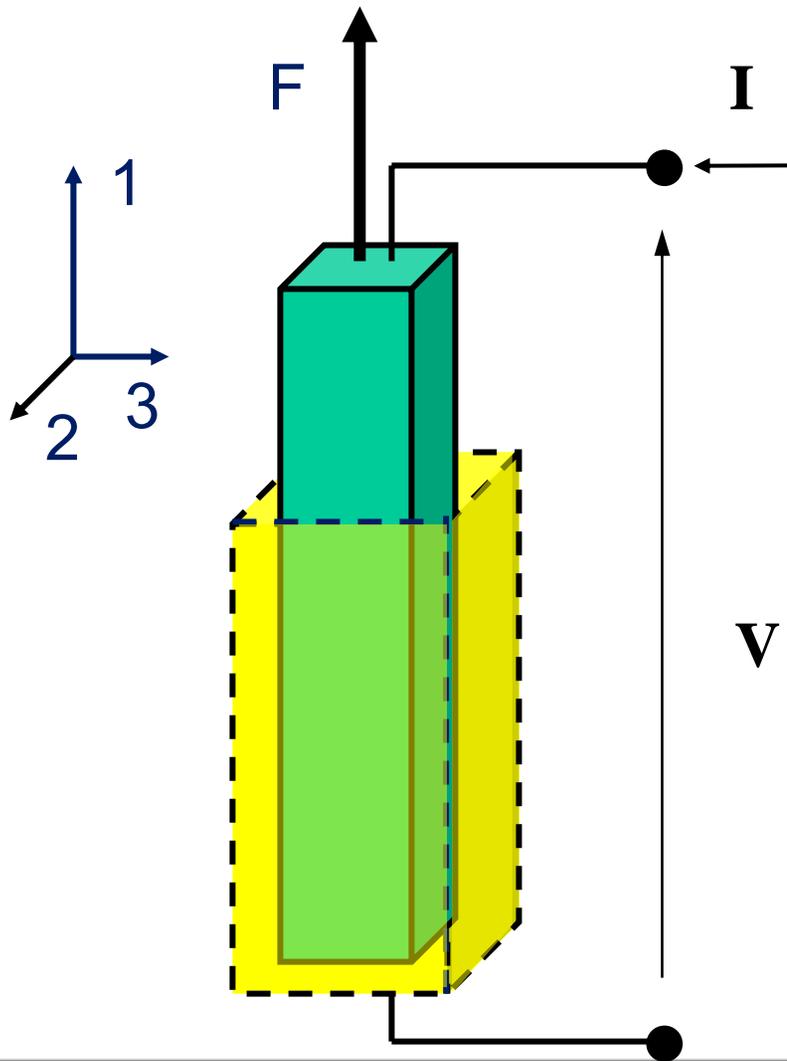
EFFETTO PIEZORESISTIVO

(Lord Kelvin, 1856)

- Consiste nella variazione della resistività di un materiale quando è soggetto ad una deformazione dovuta ad uno sforzo ad esso applicato
- E' molto piccolo nei metalli, è prevalente nei semiconduttori (silicio, germanio)

S. M. Sze "Semiconductor Sensors", Wiley Interscience

Esperimento dell'effetto piezoresistivo



$$R = f(\sigma)$$

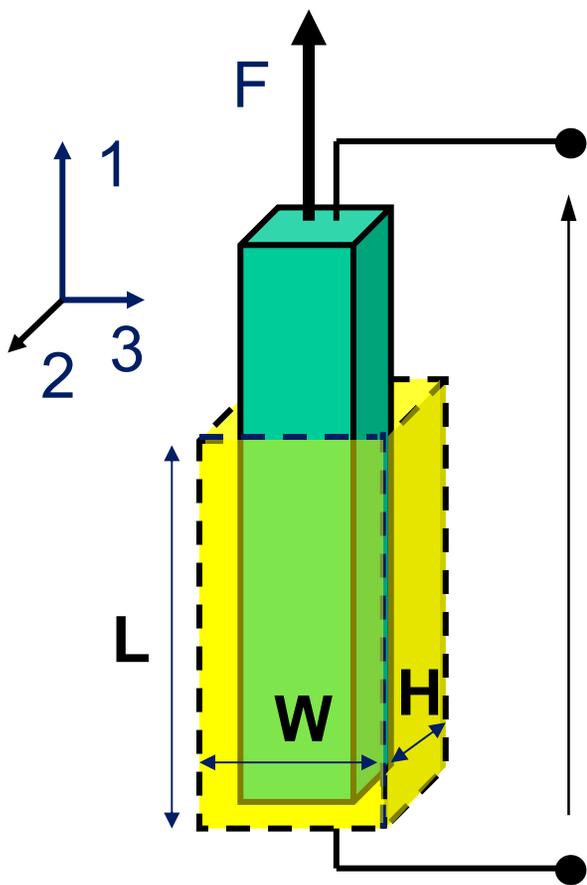
modello del sensore:

$$\Delta R/R_0 = GF \Delta L/L_0$$

GF – Gauge Factor

materiali	GF
metalli	1 - 5
semiconduttori	80 - 200

Interpretazione dell'effetto piezoresistivo - I



$$R_0 = \rho_0 L_0 / (W_0 H_0)$$

$$\Delta R = (\partial R / \partial L) \Delta L + (\partial R / \partial W) \Delta W + (\partial R / \partial H) \Delta H + (\partial R / \partial \rho) \Delta \rho$$

$$\partial R / \partial L = \rho_0 / (W_0 H_0) = R_0 / L_0$$

$$\partial R / \partial W = -\rho_0 L_0 / (W_0^2 H_0) = -R_0 / W_0$$

$$\partial R / \partial H = -\rho_0 L_0 / (W_0 H_0^2) = -R_0 / H_0$$

$$\partial R / \partial \rho = L_0 / (W_0 H_0) = R_0 / \rho_0$$

$$\Delta R / R_0 = GF \Delta L / L_0$$

$$\Delta R / R_0 = \Delta L / L_0 - \Delta W / W_0 - \Delta H / H_0 + \Delta \rho / \rho_0$$

$$\Delta R / R_0 = \Delta L / L_0 [1 + 2\nu + (\Delta \rho / \rho_0) / (\Delta L / L_0)]$$

The drift-diffusion equations

Transport equations in the drift-diffusion model:

$$\mathbf{J} = q \hat{\mu} n \mathbf{E} + q \hat{D} \text{grad } n \quad \text{current density}$$



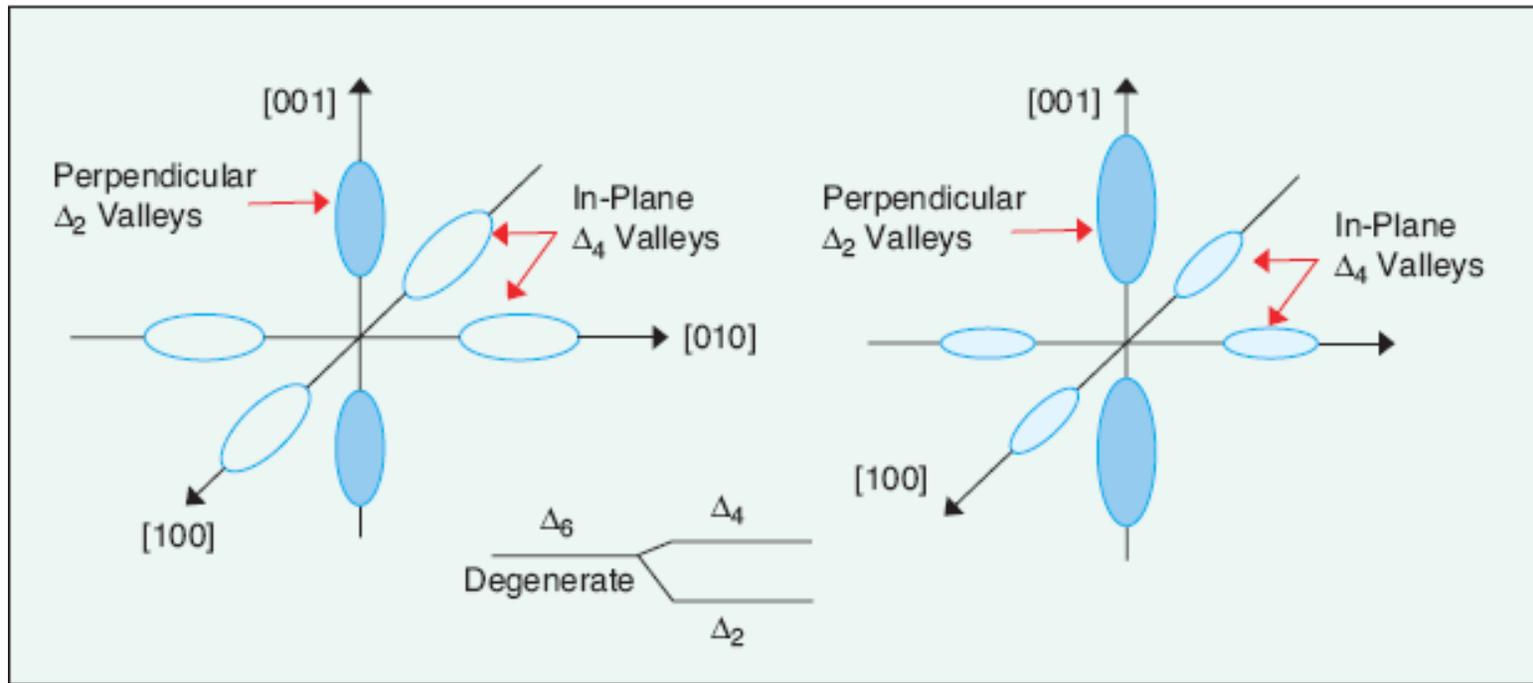
\hat{D} = carrier diffusivity

Einstein's relationship $\hat{D} = \frac{k_B T}{q} \hat{\mu}$

$\hat{\mu}$ = carrier mobility

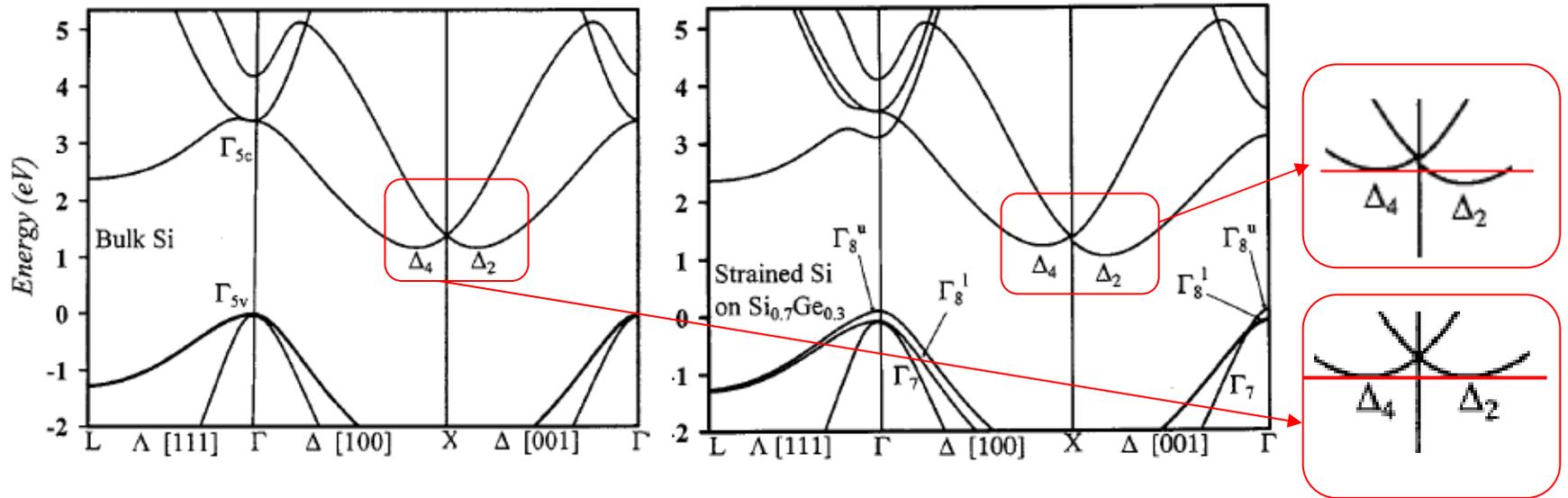
n = carrier concentration

ELECTRON MOBILITY: $\hat{\mu}_n = \sum_{i=1,3} n_i \hat{\mu}_{n,i} = \sum_{i=1,3} n_i \frac{q \tau_n}{\hat{m}_{c,i}}$



- Lo stress influisce sui minimi delle sottobande energetiche degli elettroni
- Lo stress è in grado di differenziare le 3 diverse sottovalli, eliminando la degenerazione lungo i 3 assi cristallografici

M.V. Fischetti, F. Gamiz, W. Hansch, "On the enhanced electron mobility in strained-silicon inversion layers", J. Appl. Phys., Vol. 92, No. 12, Dec. 2002, pag.7320-7324.



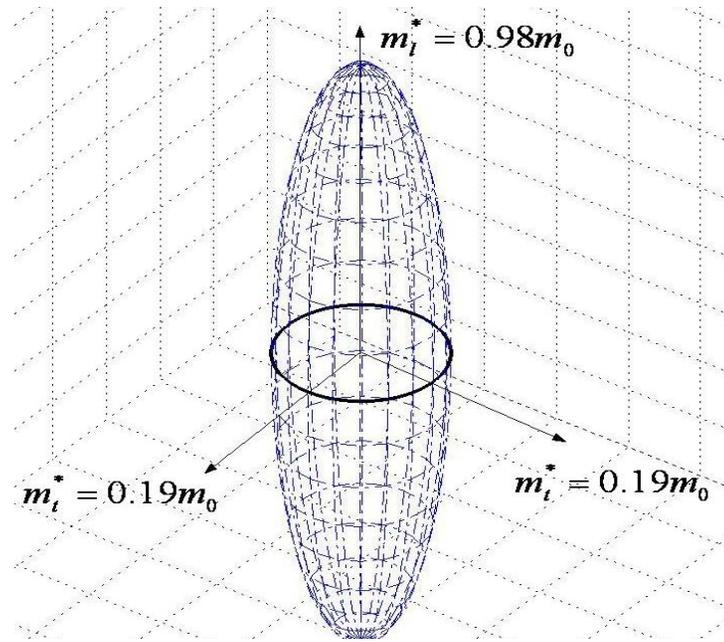
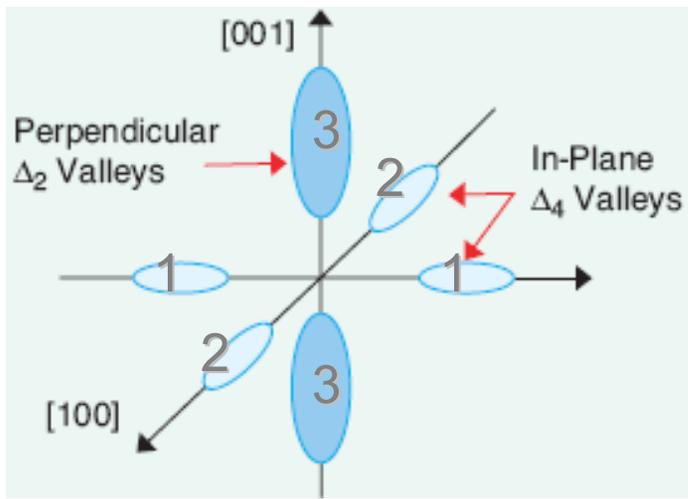
I. Balslev, "Influence of uniaxial stress on the indirect absorption edge in silicon and germanium," Phys. Rev., vol. 143, pp. 636–647, 1966.

$$\hat{\mu}_n = \sum_{i=1,3} n_i \hat{\mu}_{n,i} = \sum_{i=1,3} n_i \frac{q\tau_n}{\hat{m}_{c,i}}$$

Relative valley population by assuming Boltzmann statistics



$$n_i = \frac{e^{-\Delta E_{c_i} / kT}}{\sum_{i=1,3} e^{-\Delta E_{c_i} / kT}}$$



- Conduction mass tensors

$$\frac{1}{\hat{m}_{c,[100]}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m_l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_t} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_t} \end{pmatrix} \quad \frac{1}{\hat{m}_{c,[010]}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m_t} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_l} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_t} \end{pmatrix} \quad \frac{1}{\hat{m}_{c,[001]}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m_t} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_t} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_l} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{J} = q \hat{\mu} n \mathbf{E} + q \hat{D} \text{grad } n$$

$$J_x = q \mu_{xx} n E_x \quad \mu_{xx} = \sum_{i=1,3} n_i \frac{q \tau}{m_{c,i,xx}}$$

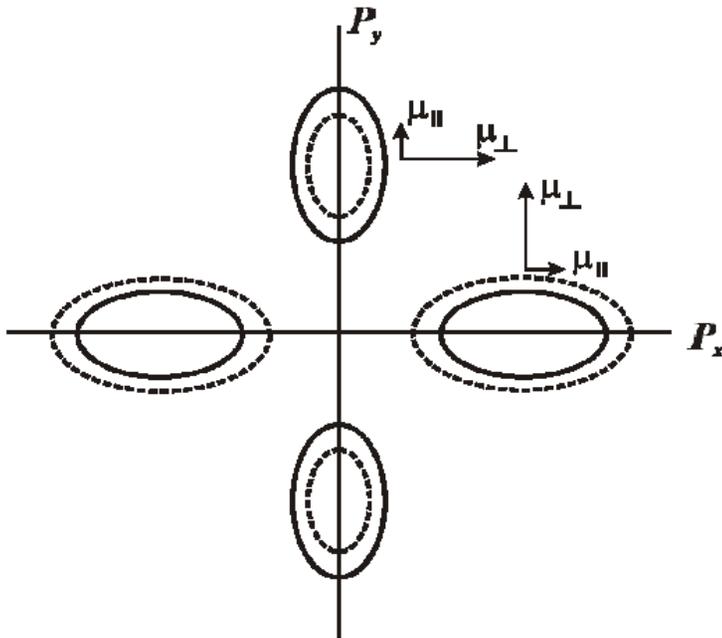
Unstrained silicon

$$n_1 = n_2 = n_3 = \frac{1}{3} \quad \mu_{xx} = \sum_{i=1,3} \frac{1}{3} \frac{q \tau}{m_{c,i,xx}} = \frac{q \tau}{3} \left(\frac{1}{m_l} + \frac{1}{m_t} + \frac{1}{m_t} \right)$$

Strained silicon

$$n_1 = n_2 \neq n_3 \quad \mu_{xx} = q \tau \left(\frac{n_1}{m_l} + \frac{n_2}{m_t} + \frac{n_3}{m_t} \right)$$

Interpretazione dell'effetto piezoresistivo -II



-> la carica si ridistribuisce in modo anisotropo nei minimi in modo proporzionale allo sforzo;

-> la mobilità mediata sui minimi cambia.

$$\rho = 1/\sigma_e$$

in un semiconduttore è $\sigma_e = q(n\mu_n + p\mu_p)$

in un smc drogato di tipo n è

$$\sigma_e = qn\mu_n$$

nel caso del silicio la mobilità è una grandezza mediata sui minimi energetici della banda di conduzione: se viene applicato uno sforzo al cristallo i minimi subiscono una deformazione. In particolare sono traslati verso l'alto o il basso in energia lungo la direzione della forza.

$$\Delta\mu_n/\mu_{n0} = \Delta\sigma_e/\sigma_{e0} = -\Delta\rho/\rho_0 = -\pi \sigma$$

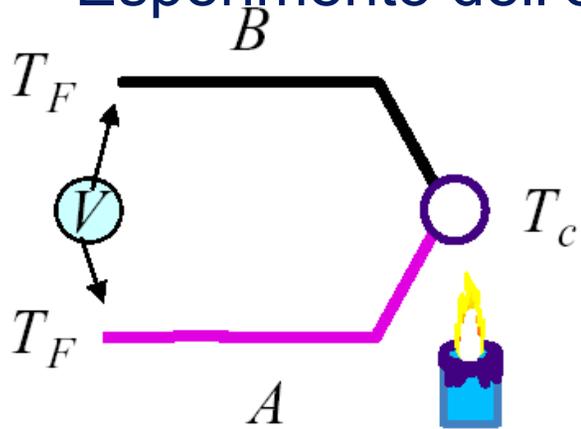
EFFETTO TERMOELETTRICO

(Thomas Joan Seebeck, 1821)

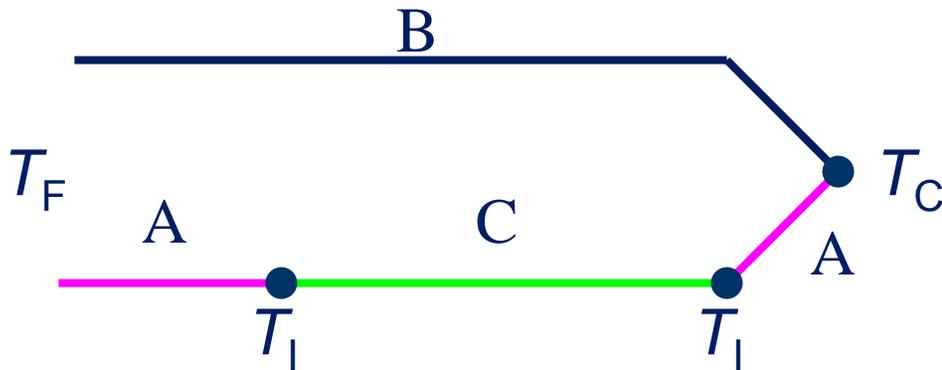
- Un conduttore, con una estremità posta ad una temperatura T_1 e con l'altra ad una temperatura T_2 , diventa sede di un passaggio di energia dalla parte calda alla parte fredda
- il gradiente termico genera un campo elettrico che si manifesta con un incremento di tensione: $dV_A = \alpha_A dT$, con α_A – coefficiente di Seebeck assoluto
- usando due materiali diversi si osserva che:
 $dV_{AB} = (\alpha_A - \alpha_B)dT = \alpha_{AB} dT$ (principio delle termocoppie),
con α_{AB} – coefficiente di Seebeck relativo

S. M. Sze “Semiconductor Sensors”, Wiley Interscience

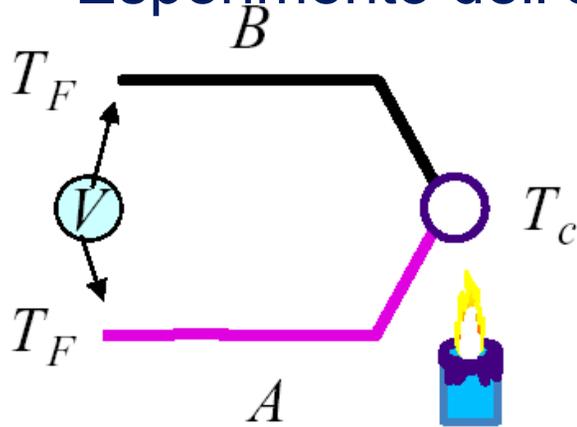
Esperimento dell'effetto termoelettrico - I



1. In assenza di un gradiente di temperatura fra due giunzioni di una coppia di fili non si presenta alcuna tensione.
(legge dei metalli intermedi)



Esperimento dell'effetto termoelettrico - II



2. Dati tre metalli A, B e C e fatte le giunzioni AB, BC e AC le tensioni che si sviluppano tra le giunzioni sono legati dalla relazione $V_{AB} = V_{AC} + V_{CB}$.
(legge dei metalli successivi)
3. Se una termocoppia sviluppa una tensione V_A con le giunzioni alle temperature T_1 e T_2 e una tensione V_B con le giunzioni alle temperature T_2 e T_3 , allora svilupperà una tensione $V_A + V_B$ con le giunzioni alle temperatura T_1 e T_3
(legge della temperatura intermedia)

Interpretazione dell'effetto termoelettrico - I

Nei metalli:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + q \nabla(nD_n) = \sigma \mathbf{E} + qn \nabla D_n$$

$$D_n = \mu_n \frac{K_B T}{q} \quad \text{relazione di Einstein (1905)}$$

$$\mu_n = \frac{q \tau_{pn}}{m_e} \quad \text{con } \tau_{pn} - \text{tempo di rilassamento del momento}$$

$$\tau_{pn} = \tau_{pn0} (T/T_0)^r \quad r - \text{parametro che dipende dai meccanismi di collisione nel metallo } (-5 \div -1)$$

$$\mu_n = \frac{q \tau_{pn0}}{m_e} (T/T_0)^r = \mu_{n0} (T/T_0)^r$$

$$D_n = \mu_{n0} (T/T_0)^r \frac{K_B T}{q} = D_{n0} (T/T_0)^{r+1}$$

M. Rudan "Tavole di Microelettronica", Pitagora

Interpretazione dell'effetto termoelettrico - II

$$D_n = \mu_{n0} (T/T_0)^r \frac{K_B T}{q} = D_{n0} (T/T_0)^{r+1}$$

$$\begin{aligned} \nabla D_n &= D_{n0} \frac{1}{T_0^{r+1}} (r+1) T^r \nabla T = D_{n0} \frac{1}{T_0^{r+1}} (r+1) T^{r+1} \frac{\nabla T}{T} \\ &= (r+1) D_n \frac{\nabla T}{T} \end{aligned}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + qn(r+1) D_n \frac{\nabla T}{T} = \sigma \mathbf{E} + (r+1) \sigma \frac{K_B}{q} \nabla T$$



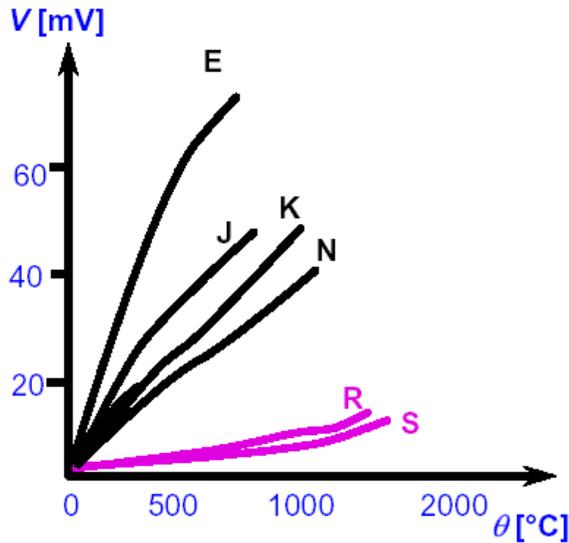
A horizontal line represents a material A. At the left end, there is a black dot labeled T_F . At the right end, there is a black dot labeled T_C . The label A is centered below the line. To the right of the line, the text $\mathbf{J} = 0$ is written.

$$E = - (r+1) K_B / q (dT/dx) = - \alpha_A (dT/dx)$$

Termocoppie

Tipo	Materiale bimetallo	Campo T°C	V_u [mV]	Caratteristiche
J	Ferro-Costantana	-200...780	30 con $\Delta T=500^{\circ}\text{C}$	Economica
T	Rame-Costantana	-200...400	15 con $\Delta T=320^{\circ}\text{C}$	Piccole dimensioni
E	Cromel-Costantana	-200...1250	>70 con $\Delta T=1000^{\circ}\text{C}$	Elevata f.e.m.
S	Pt-Pt90%, Rd10%	0...1760	10 con $\Delta T=1000^{\circ}\text{C}$	Robusta, affidabile
C	Tungsteno- Tungsteno,Iridio	0...2400	Dipende dalla % della lega	Alta temperatura

Caratterizzazione delle termocoppie



$$V = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + \dots$$

$$T_0 = 0^\circ\text{C}$$

$$E \quad 59 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

$$K \quad 40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

$$R, S \quad 10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

Materiali	Coefficienti di Seebeck ($\mu\text{V}/\text{K}$)
Pt	-4,45
Ni	-18
Cr	18,8
Si (n-type)	- 450
n-polySi	- 420
Ge	420

Nei semiconduttori:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + q \nabla (n D_n) = \sigma \mathbf{E} + q n \nabla D_n + q D_n \nabla n$$

$$n = N_C \exp \left(\frac{E_{F_n} - E_C}{K_B T} \right)$$

$$N_C = N_{C0} (T/T_0)^{3/2} \quad \text{densità equivalente di stati}$$

$$\nabla N_C = N_C \frac{3}{2} \frac{\nabla T}{T}$$

$$\nabla \exp \left(\frac{E_{F_n} - E_C}{K_B T} \right) = - (E_{F_n} - E_C) \frac{\nabla T}{K_B T^2} \exp \left(\frac{E_{F_n} - E_C}{K_B T} \right)$$

$$\nabla n = \nabla N_C \exp \left(\frac{E_{F_n} - E_C}{K_B T} \right) + N_C \nabla \exp \left(\frac{E_{F_n} - E_C}{K_B T} \right)$$

$$\begin{aligned}
\nabla n &= \nabla N_C \exp\left(\frac{E_{F_n} - E_C}{K_B T}\right) + N_C \nabla \exp\left(\frac{E_{F_n} - E_C}{K_B T}\right) \\
&= N_C \left[\frac{3}{2} \frac{\nabla T}{T} - (E_{F_n} - E_C) \frac{\nabla T}{K_B T^2} \right] \exp\left(\frac{E_{F_n} - E_C}{K_B T}\right) \\
&= n \frac{\nabla T}{T} \left[\frac{3}{2} - \frac{(E_{F_n} - E_C)}{K_B T} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} + (r + 1) \sigma \frac{K_B}{q} \nabla T + \sigma \frac{K_B}{q} \nabla T \left[\frac{3}{2} - \frac{(E_{F_n} - E_C)}{K_B T} \right] \\
&= \sigma \mathbf{E} + \sigma \frac{K_B}{q} \nabla T \left[r + 1 + \frac{3}{2} - \frac{(E_{F_n} - E_C)}{K_B T} \right]
\end{aligned}$$

$$\alpha_A = \frac{K_B}{q} \left[r + 1 + \frac{3}{2} - \frac{(E_{F_n} - E_C)}{K_B T} \right]$$

Effetto Peltier (Jean-Charles Peltier, 1834)

Consiste nel manifestarsi di una certa quantità di calore, assorbita o ceduta da una termocoppia quando questa è attraversata da corrente elettrica: $Q_P = \Pi_P I$

Effetto Thomson (William Thomson- Lord Kelvin, 1857)

Quando una corrente elettrica percorre un conduttore omogeneo con una differenza di temperatura ($T_2 - T_1$), viene generata o assorbita una quantità di calore pari a $Q_T = - \tau I (T_2 - T_1)$

EFFETTO TERMORESISTIVO

(Sir Humphry Davy, 1802)

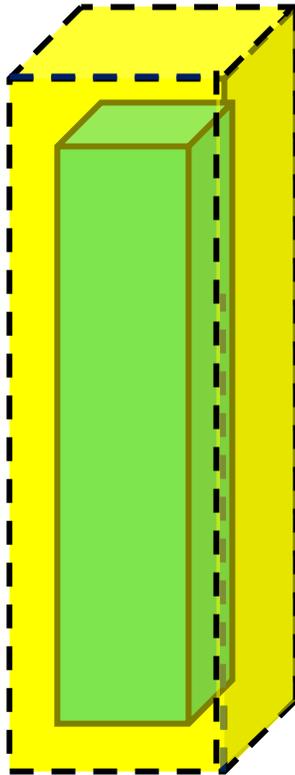
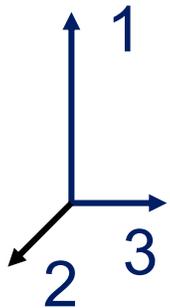
- Consiste nella variazione della resistività di un materiale con la temperatura
- E' presente in tutti i materiali: nei materiali più comuni (metalli) il coefficiente di temperatura è positivo (PTC), alcuni materiali ceramici, gli ossidi e i semiconduttori mostrano un coefficiente di temperatura negativo (NTC).

S. M. Sze "Semiconductor Sensors", Wiley Interscience

La temperatura e la deformazione dei solidi

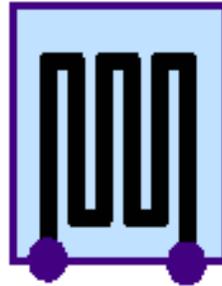
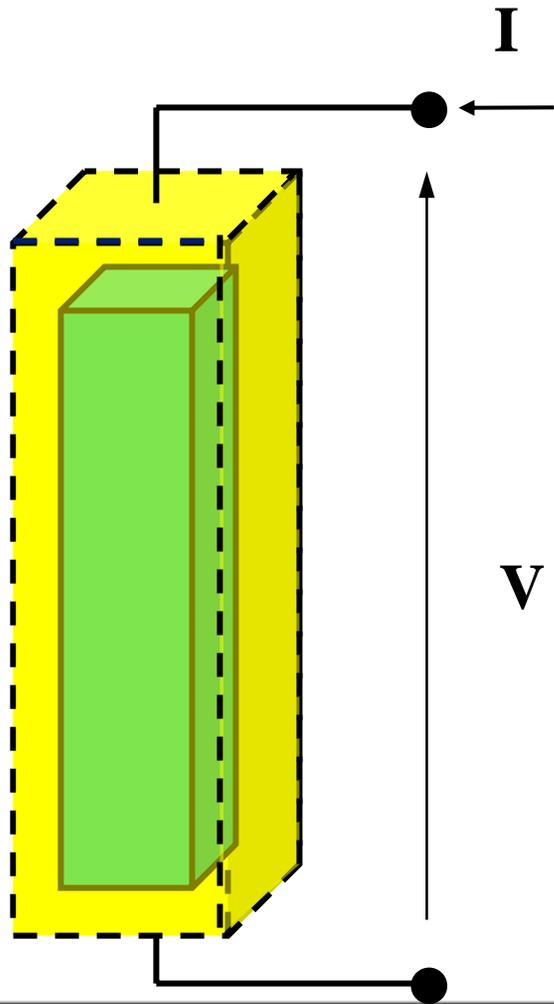
COEFFICIENTE DI ESPANSIONE TERMICA LINEARE:

$$\Delta L/L_0 = \alpha_T \Delta T = \Delta W/W_0 = \Delta H/H_0$$



<u>materiale</u>	<u>α_T ($10^{-6}/K$)</u>
alluminio	25
rame	16,5
oro	14,2
platino	8,8
GaAs	5,4
Ge	6,1
Si	2,6
polySi	2,33

L'esperimento dell'effetto termoresistivo - I



$$R = f(T)$$

modello del sensore:

$$R(T) = R_0[1+a(T-T_0)]$$

a– Temperature Coefficient
of Resistance (TCR)

L'esperimento dell'effetto termoresistivo - II

Metalli: dipendenza lineare con la temperatura e **PTC**

materiale	TCR (ppm/°C)
Platino	3927
Tungsteno	4500
Oro	8300

Semiconduttori: dipendenza esponenziale con T e **NTC**

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

con β tra 3000 e 5000 K

$$\text{TCR} = - \beta / T^2$$

Interpretazione dell'effetto termoresistivo - I

$$R_0 = \rho_0 L_0 / (W_0 H_0)$$

$$\Delta R = (\partial R / \partial L) \Delta L + (\partial R / \partial W) \Delta W$$

$$+ (\partial R / \partial H) \Delta H + (\partial R / \partial \rho) \Delta \rho$$

$$\partial R / \partial L = \rho_0 / (W_0 H_0) = R_0 / L_0$$

$$\partial R / \partial W = -\rho_0 L_0 / (W_0^2 H_0) = -R_0 / W_0$$

$$\partial R / \partial H = -\rho_0 L_0 / (W_0 H_0^2) = -R_0 / H_0$$

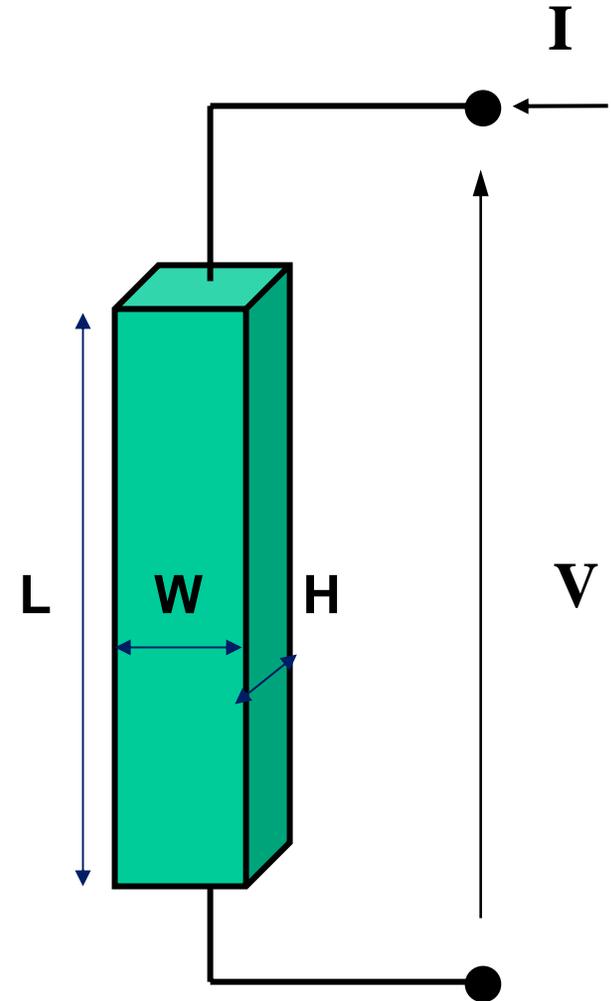
$$\partial R / \partial \rho = L_0 / (W_0 H_0) = R_0 / \rho_0$$

$$\Delta R / R_0 = a \Delta T$$

$$\Delta R / R_0 = \Delta L / L_0 - \Delta W / W_0 - \Delta H / H_0 + \Delta \rho / \rho_0$$

$$= \alpha_T \Delta T - \alpha_T \Delta T - \alpha_T \Delta T + [\Delta \rho / (\rho_0 \Delta T)] \Delta T$$

$$= -\alpha_T \Delta T + [\Delta \rho / (\rho_0 \Delta T)] \Delta T$$



Interpretazione dell'effetto termoresistivo - II

$$\Delta R/R_0 = a \Delta T$$

$$\Delta R/R_0 = -\alpha_T \Delta T + [\Delta\rho/(\rho_0 \Delta T)] \Delta T$$

$$a = -\alpha_T + [\Delta\rho/(\rho_0 \Delta T)]$$

$$\Delta\rho/\Delta T = (\Delta\rho/\Delta\sigma) (\Delta\sigma/\Delta T) = -(1/\sigma_0^2) (\Delta\sigma/\Delta T)$$

$$\Delta\rho/(\rho_0 \Delta T) = -\Delta\sigma/(\sigma_0 \Delta T)$$

nei metalli:

$$\sigma = qn\mu_n \quad \rightarrow \quad \mu_n = \frac{q\tau_{pn}}{m_e} \quad \rightarrow \quad \tau_{pn} = \tau_{pn0} (T/T_0)^r$$

r – parametro che dipende dai meccanismi di collisione nel metallo
($-5 \div -1$)

$a > 0$ Positive Temperature Coefficient (PTC)

Interpretazione dell'effetto termoresistivo - III

nei semiconduttori:

$$\sigma = qn\mu_n \rightarrow \mu_n = \frac{q\tau_{pn}}{m_e} \rightarrow \tau_{pn} = \tau_{pn0}(T/T_0)^r, \quad r = -2,5$$

$$\rightarrow n = N_C \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_C}{K_B T}\right), \quad N_C = N_{C0}(T/T_0)^{3/2}$$

$$\sigma = q\mu_{n0} N_{C0} (T/T_0)^{(r+3/2)} \exp[-(E_C - E_{Fn})/(K_B T)]$$

$a < 0$ Negative Temperature Coefficient (NTC)

modello esponenziale:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{(E_C - E_{Fn})}{K_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad R_T = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

RTD (Resistance Temperature Detector) e Termistori

RTD: il Platino (Pt100) opera da -200°C a 600°C

Tarando R_0 a 0°C ($100\ \Omega$):

$$R = R_0(1.0036 + 36.79 \cdot 10^{-4} T)$$

Termistori: β tra 3000 e 5000 K
e $R_0 = 1, 5, 10\ \Omega$

operano da -100°C a 500°C

$\text{TCR} = -\beta / T^2$, con $\beta = 3600\ \text{K}$ è
 $\text{TCR}(300\ \text{K}) = 0,04\ \text{K}^{-1}$

PTC elevato, stabilità nel tempo, resistenza elettrica complessiva abbastanza elevata, caratteristica resistenza-temperatura il più possibile vicina alla linearità.

NTC più elevato degli RTD.

Sono fortemente non lineari e meno stabili degli RTD.

Si prestano molto bene alla realizzazione di anelli di controllo della temperatura.

EFFETTO HALL

(Edwin Hall, 1879)

In un materiale conduttore sottoposto ad un campo di induzione magnetica B_z normale al flusso di una corrente elettrica di intensità I_x , si manifesta una d.d.p. V_y in direzione perpendicolare alle direzioni sia di B_z sia di I_x .

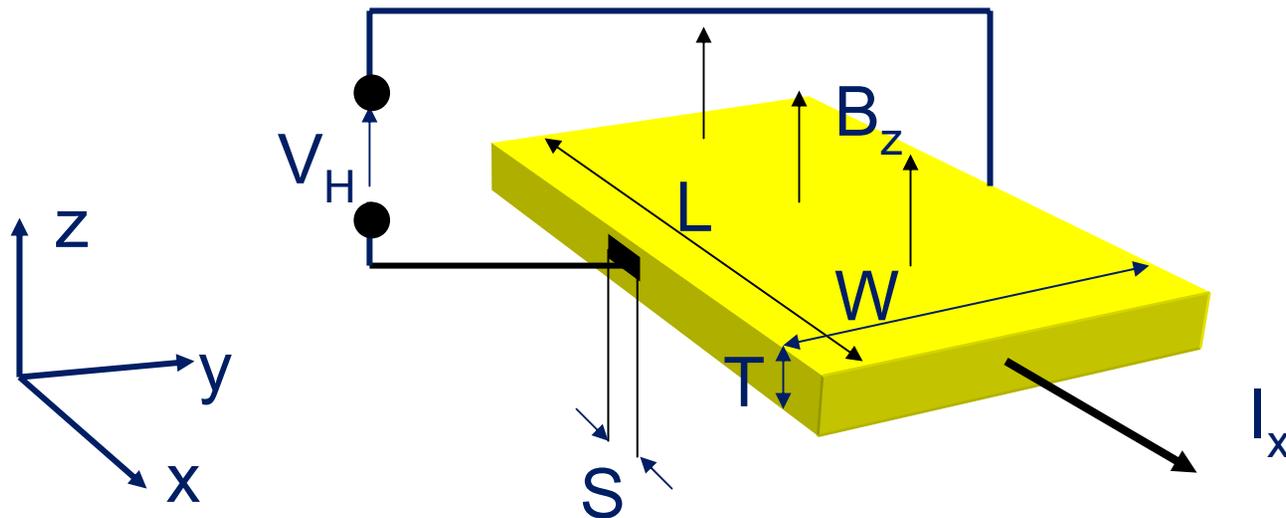
materiali: sia conduttori che semiconduttori

L'esperimento dell'effetto Hall

Il piatto, di conduttore o semiconduttore, ideale per l'applicazione della teoria di Hall ha $T \ll W \ll L$. I contatti di Hall per la misura della tensione trasversale devono essere piccoli: $S \ll W$.

Risulta che $V_H = R_H I_x B_z / T$

con R_H il coefficiente di Hall (in cm^3/C), dipende dal materiale.

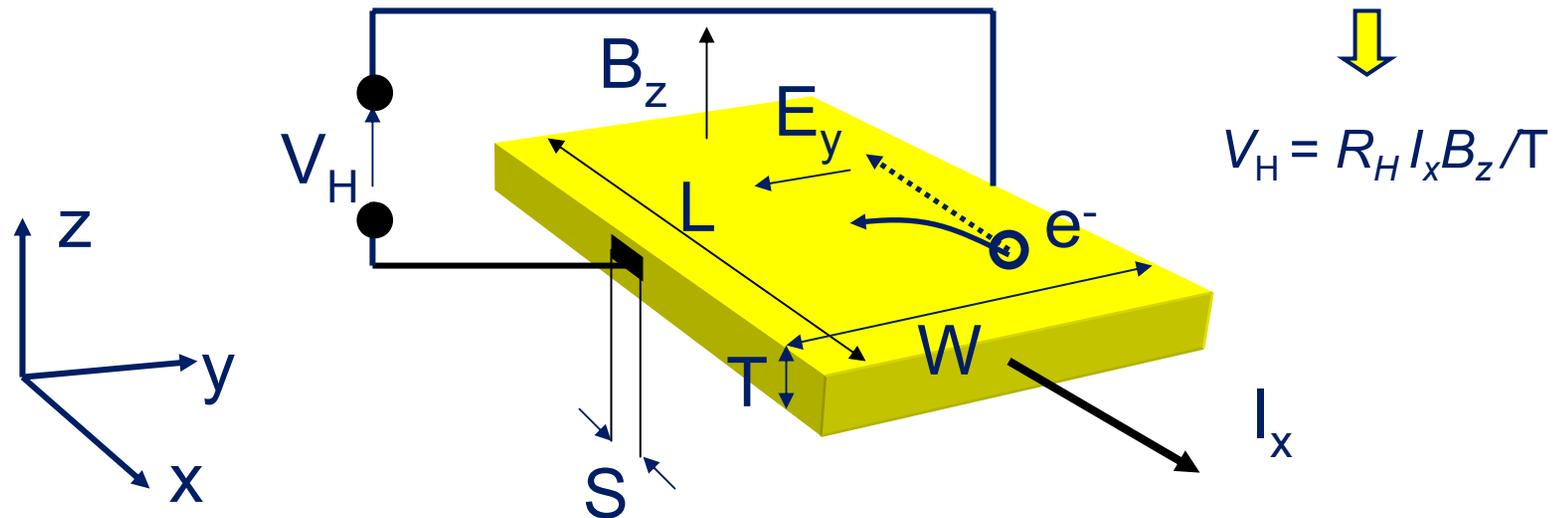


Interpretazione dell'effetto Hall - I

$T \ll W, L$: in questo modo si ha uniformità di carica nella barretta nella direzione del campo di induzione \mathbf{B} . $W \ll L$: in questo modo si garantisce che la tensione di Hall non sia influenzata dalla vicinanza delle regioni equipotenziali di contatto. $S \ll W$: in questo modo si garantisce che la regione equipotenziale di contatto non alteri la distribuzione di potenziale dovuta a \mathbf{B} .

Forza di Lorentz: $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B} = -q v_x B_z \mathbf{i}_y$

$q\mathbf{E} = \mathbf{F} \rightarrow E_y = v_x B_z = R_H J_x B_z = R_H I_x B_z / (TW), E_y = V_H / W$



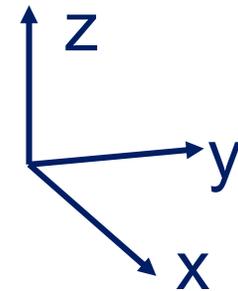
Interpretazione dell'effetto Hall - II

$$\mathbf{J}_{n0} = \sigma_n \mathbf{E}$$

$$\mathbf{J}_n = \sigma_n (\mathbf{E} - \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \mathbf{J}_{n0} - \mu_n^* \mathbf{J}_n \times \mathbf{B}$$

$$\mu_n^* = r_n \mu_n \quad r_n - \text{fattore di Hall}$$

$$\mathbf{B} = B_z \mathbf{i}_z \quad \mathbf{J}_n = J_{nx} \mathbf{i}_x$$



$$\mu_n^* \mathbf{B} \times \mathbf{J}_n = \mu_n^* \mathbf{B} \times \mathbf{J}_{n0} - \mu_n^{*2} \mathbf{B} \times \mathbf{J}_n \times \mathbf{B} = \mu_n^* \mathbf{B} \times \mathbf{J}_{n0} - \mu_n^{*2} B_z^2 \mathbf{J}_n$$

$$\mathbf{J}_n [1 + \mu_n^{*2} B_z^2] = \mathbf{J}_{n0} + \mu_n^* \mathbf{B} \times \mathbf{J}_{n0}$$

$$\mathbf{J}_n = \sigma_n B (\mathbf{E} + \mu_n^* \mathbf{B} \times \mathbf{E}) \quad \sigma_n B = \frac{\sigma_n}{1 + \mu_n^{*2} B_z^2}$$

Interpretazione dell'effetto Hall - III

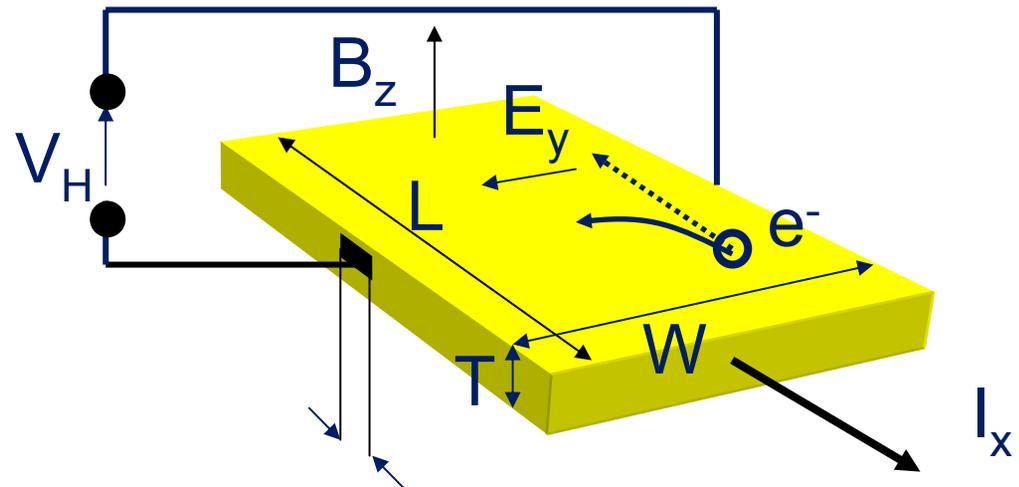
$$\mathbf{J}_n = \sigma_n B (\mathbf{E} + \mu_n^* \mathbf{B} \times \mathbf{E})$$

$$J_{ny} = 0$$

$$E_y + \mu_n^* B_z E_x = 0$$

$$E_y = -\mu_n^* B_z E_x = -\mu_n^* B_z J_{nx} / \sigma_n$$

$$R_H = -\mu_n^* / \sigma_n = -r_n / qn$$



EFFETTO MAGNETORESISTIVO

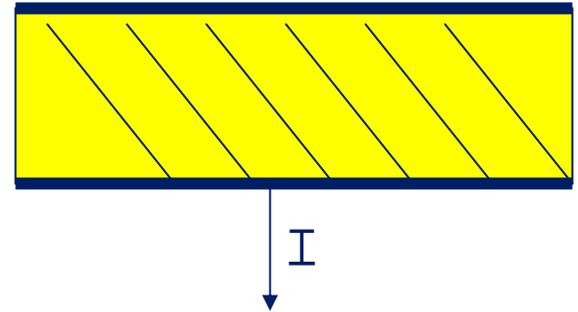
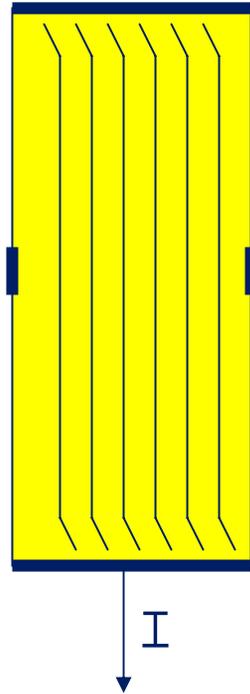
$$\mathbf{J}_n = \sigma_{nB}(\mathbf{E} + \mu_n^* \mathbf{B} \times \mathbf{E})$$

$$E_y = 0$$

$$J_{nx} = \sigma_{nB} E_x$$

$$\sigma_{nB} = \frac{\sigma_n}{1 + \mu_n^{*2} B_z^2}$$

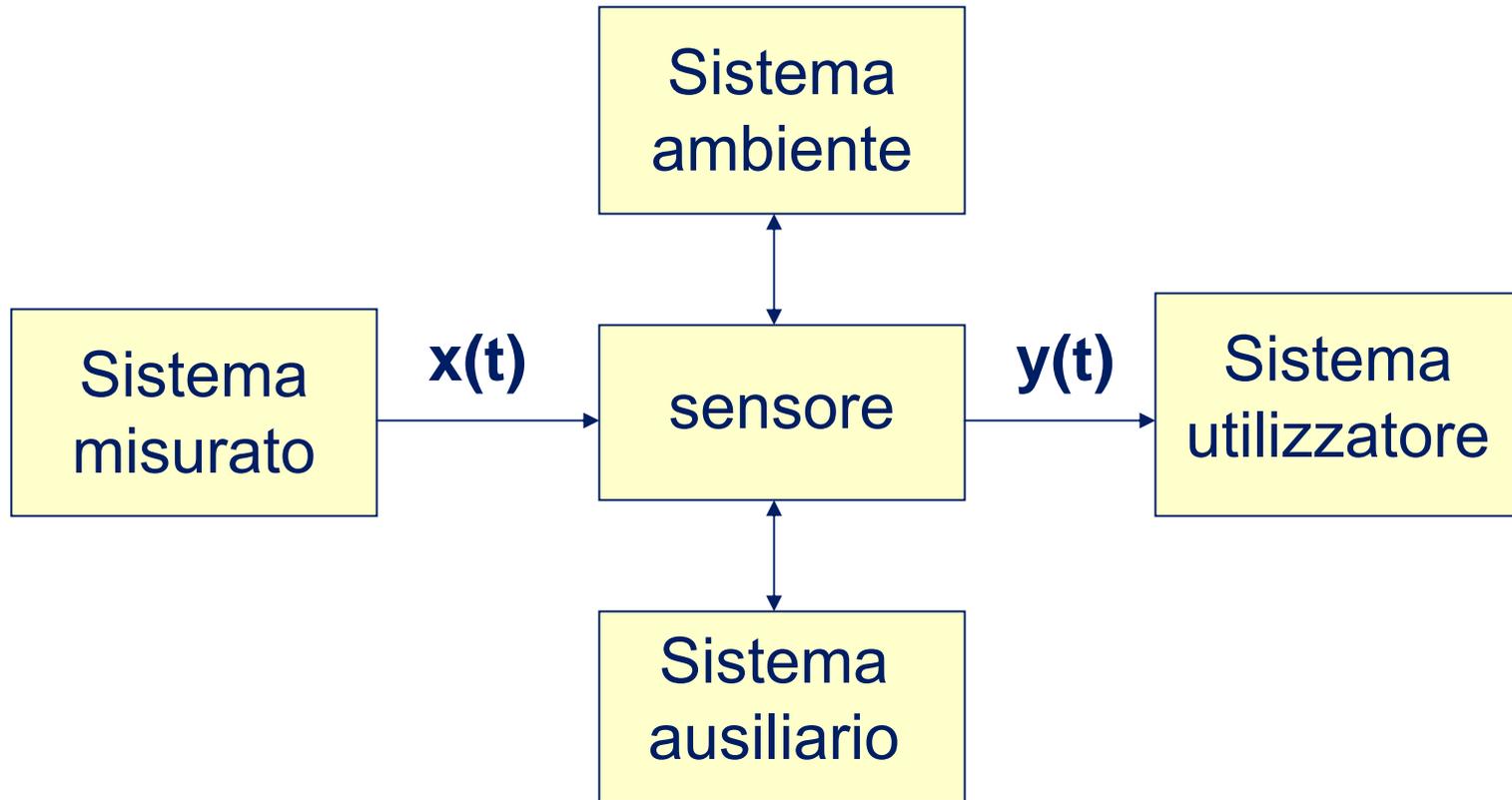
$$\frac{\rho_{nB}}{\rho_n} = 1 + \mu_n^{*2} B_z^2$$



CARATTERIZZAZIONE DI UN SENSORE

- Principio di funzionamento;
- grandezza misurata;
- eccitazione (eventuale);
- caratteristiche metrologiche (modello del sensore);
- condizioni operative (interazioni del sensore con il sistema ausiliario di alimentazione ed il sistema ambiente).

Interazioni del sensore



il tempo rappresenta una grandezza d'influenza ulteriore da considerare nella caratterizzazione (tempi di risposta/stabilità/affidabilità)