

Sensori II

Tipi ed esempi

Tecniche Automatiche di
Acquisizione Dati
2005/2006

Fisica dei sensori

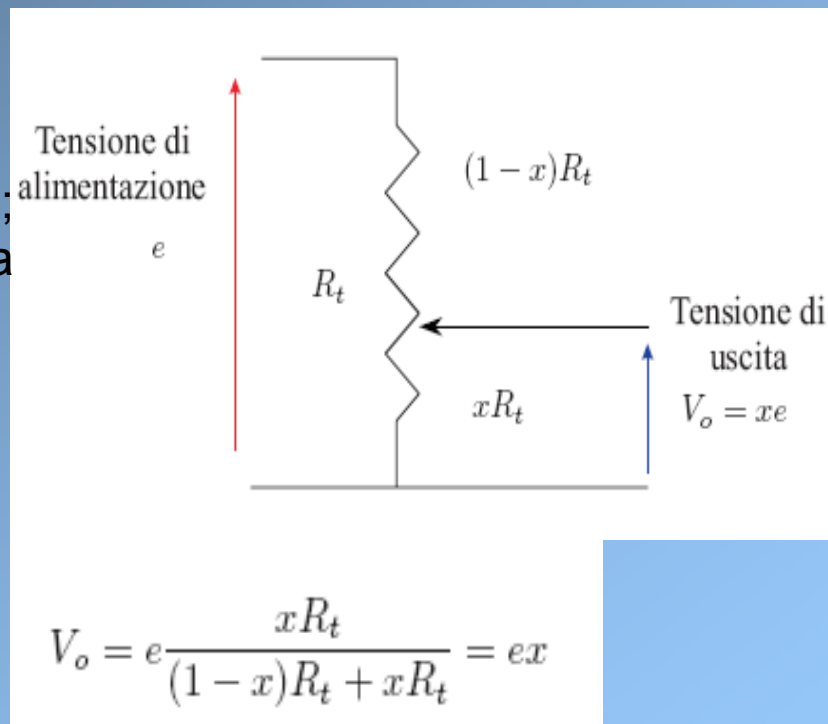
- Sensori Resistivi: $R = \rho \ell / A$
 - $\Delta \ell \Rightarrow \Delta R$ – Sensori di lunghezza, posizione
 - $\Delta A \Rightarrow \Delta R$ – Sensori di deformazione
 - $\rho = \rho(t^0, I)$
 - $\Delta t^0 = \Delta R$ – Sensori di temperatura
 - $\Delta I = \Delta R$ – Sensori di Illuminazione

Sensore di posizione: il potenziometro

Caratteristiche:

- Risoluzione: dipende dal numero delle spire; Nei potenziometri a film sottile è limitato dalla granularità del film e dal contatto.
- Linearità: errore $<0.1\%$
- Resistenza totale: $10^3 - 10^5 \Omega$; fino a $10^6 \Omega$ per quelli a film sottile.
- Variazione della resistenza con la temperatura: $10 - 1000 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$

Nell'interfacciamento si deve tener conto della resistenza di ingresso dello strumento di lettura, che, essendo in parallelo a xR_t , deve essere grande.



Fisica dei sensori II

- Sensori Induttivi: $L = \mu k N^2$
 - $\Delta \ell \Rightarrow \Delta \mu \Rightarrow \Delta L$
 - Sensori di posizione (LVDT)
 - Rotazione (resolver)
 - Esempio: LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

Un esempio: LVDT

- Misura uno spostamento
- È un sensore modulante
- In uscita ha un segnale modulato
- I secondari sono avvolti in senso inverso

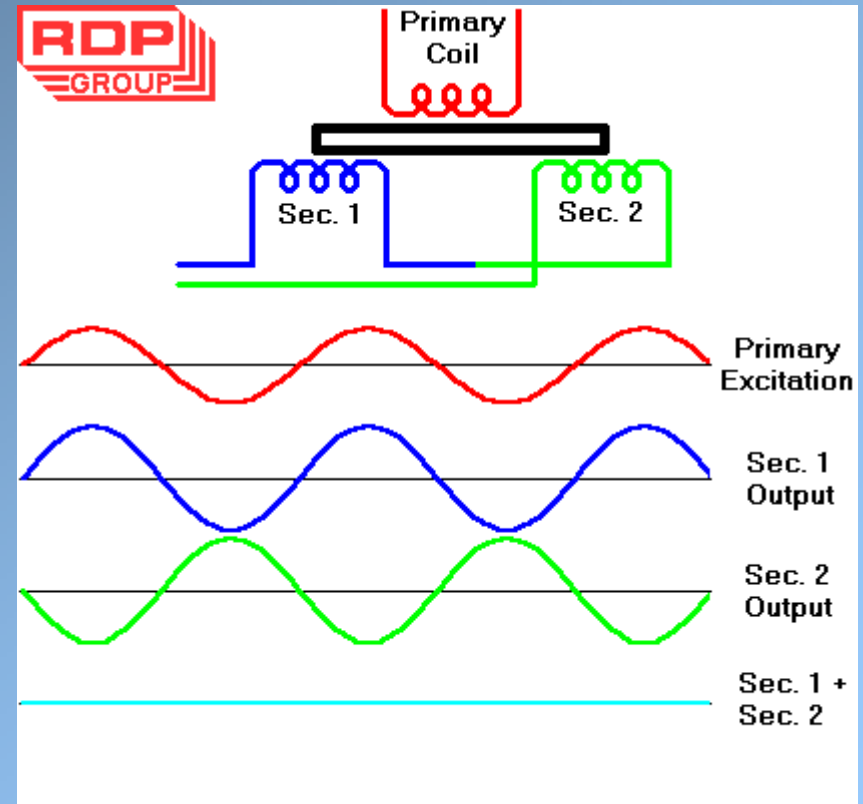
$$V_{out} = V_2 - V_1$$

$$V_m = V_0 e^{i\omega t} \quad \text{Primario}$$

$$V_k = L_k \frac{dV}{dt} = i\omega L_k V_0 e^{i\omega t} \quad \text{Secondari}$$

$$V_{out} = V_0 i\omega (L_2 - L_1) \exp[i(\omega t)]$$

Quando $L_2 > L_1$ è in fase col primario, altrimenti in controfase => verso del movimento



Sensore di velocità/posizione: il Resolver

- Ingresso: rotazione
- Uscita: Segnale analogico modulato: $V = d\Phi_c/dt$
- Sensore modulante: c'è un campo magnetico che viene modulato

Resolver a 4 poli:

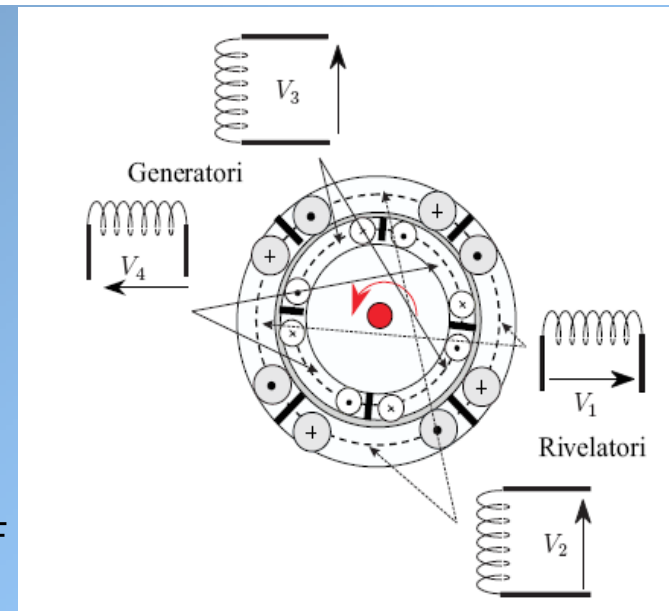
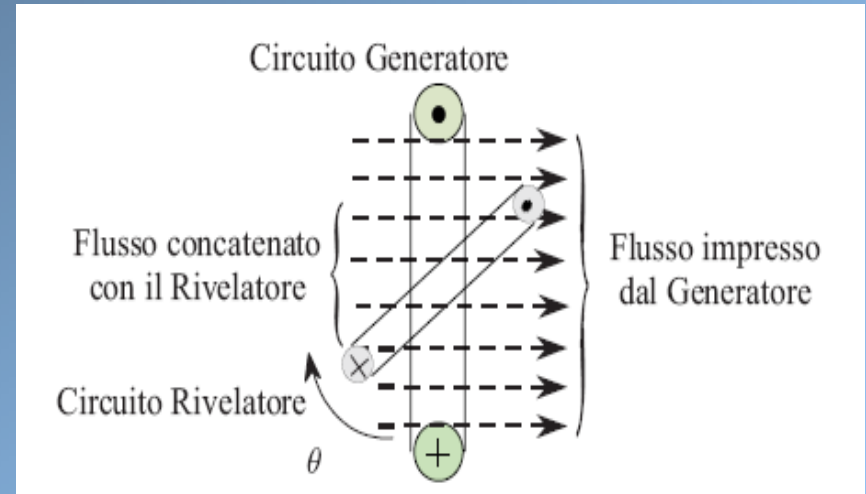
Generatori di riferimento: V_3 e V_4

Sensori: V_1 e V_2

$$V_3 = V_m \sin(\omega t) \quad V_4 = V_m \sin(\omega t)$$

$$V_1 = V_3 \cos \theta + V_4 \sin \theta$$

$$V_2 = V_4 \cos \theta - V_3 \sin \theta; \text{ se } V_3 = 0 \Rightarrow \text{due segnali modulati, in quadratura}$$



Fisica dei sensori III

Effetto termoelettrico (Seebeck 1826 - Peltier 1834)

Un conduttore con le estremità poste a temperature differenti diventa sede di un passaggio di energia dalla parte calda a quella fredda. Il gradiente termico genera un campo elettrico che si manifesta in una tensione.

$$dV = \alpha dT.$$

Se si usano due materiali diversi A e B (termocoppia) =>

$$\alpha = \alpha_A - \alpha_B$$

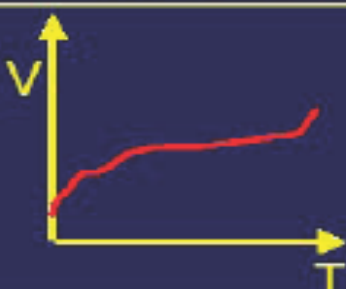
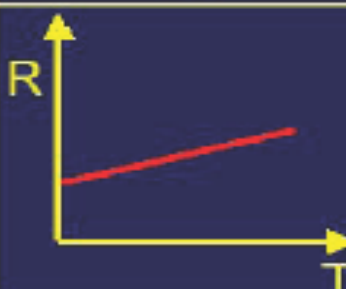
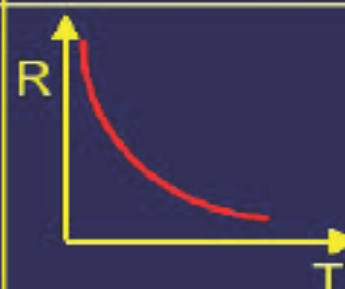
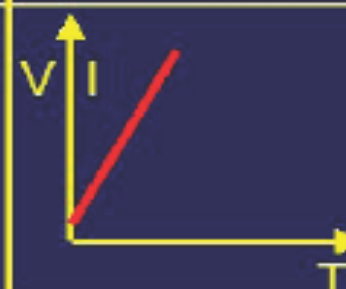
Per aumentare la sensibilità si scelgono materiali con coefficienti di segno opposto.

Fisica dei sensori IV

- Effetto termoresistivo:
 - $\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$ con α = coefficiente resistivo di temperatura (TCR)
 - Termistori: hanno una caratteristica $R - T$ approssimabile con una esponenziale in un intervallo ristretto di temperature:

$$R_T = R_0 \exp[\beta(1/T - 1/T_0)]$$

Sensori di temperatura

	Termocoppie	RTD	Termistori	Sensori a c.i.
				
Pro	• autoeccitante • robusto • poco costoso • alte temperatur.	• molto stabile • molto accurato • molto lineare	• molto sensibile • veloce • misura a 2 fili	• molto lineare • output elevato • poco costoso
Con tro	• non lineare • bassa V_{out} • temp. di riferim. • bassa sensibilità	• costoso • rifer. di corrente • bassa resist. • autoriscald.	• non lineare • range limitato • rifer. di corrente • autoriscald.	• $T < 200^{\circ}\text{C}$ • serve aliment. • lento • autoriscald.

Termocoppia

- J=ferro/costante
- K=Ni-Cr/Ni-Al
- E=Cr/Costante
- T=Cu/costante
- R=Pt/Pt-Rd

		J	K	E	T	R
T_{min}	°C	0	-200	-200	-200	0
T_{max}	°C	750	1250	900	350	1450
V_{max}	mV	42.25	50.63	68.78	17.81	16.74
Errore	°C	2.2	2.2	1.7	0.8	1.4

- Sensore autoeccitante
- Basso costo
- Fino a temperature elevate
- Uscita non lineare
- Compensazione del giunto freddo
- Giunzioni parassite
- Segnale basso.

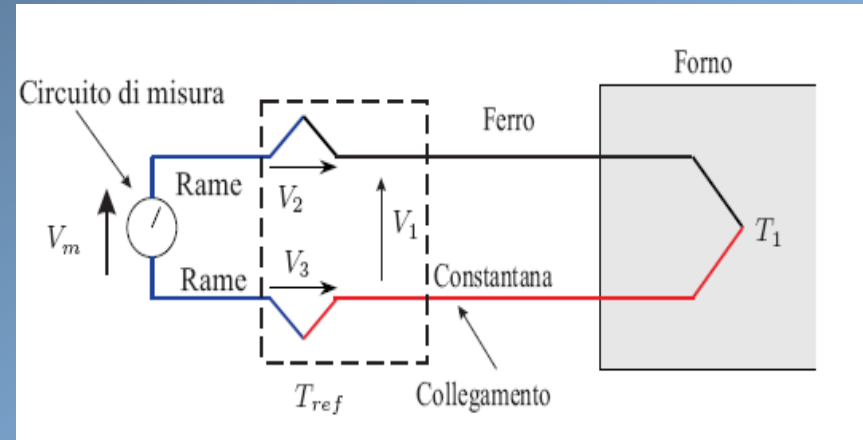
Interfacciamento della termocoppia

- La termocoppia non necessita di una alimentazione esterna, in quanto l'effetto Seebeck, genera direttamente una tensione di uscita.
- Il segnale di uscita deve essere opportunamente elaborato per estrarre la temperatura reale della giunzione calda, in quanto la relazione temperatura-tensione è non lineare.
- i conduttori che collegano la termocoppia al circuito elettronico di acquisizione creano una giunzione parassita di cui si deve tenere conto per effettuare una misura corretta.

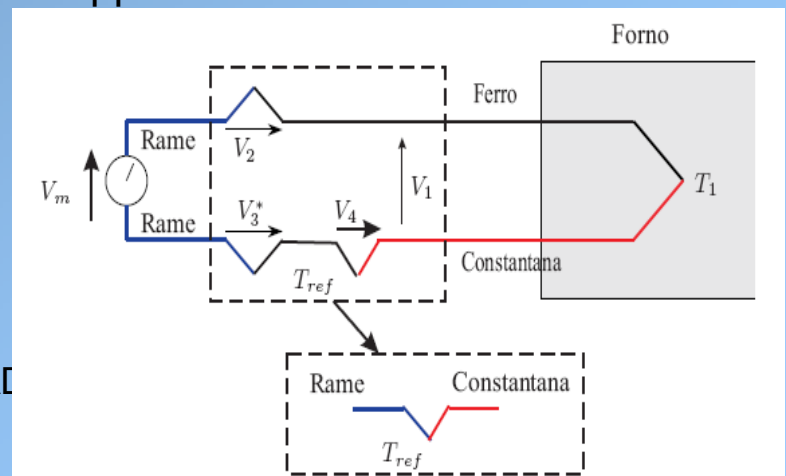
$$V_m = V_1 - V_2 + V_3^* + V_4$$

Se le due giunzioni ferro-rame sono alla stessa temperatura T_{ref}

$$V_2 = V_3^* \Rightarrow V_m = V_1 + V_4$$



Regola empirica: Due termocoppie in serie che condividono lo stesso materiale centrale e sono alla stessa temperatura, generano la stessa tensione che genererebbe una sola termocoppia realizzata con i due materiali esterni



Termoresistenza

- Sensore modulante
- Da in uscita una resistenza variabile che va trasformata in una tensione.
- Si trova spesso indicata come RTD (Resistive Temperature Detector)

- Basso costo
- Molto lineare
- Elevata velocità di risposta
- Temperatura massima minore della termocoppia
- Necessita di alimentazione.
- Attenzione all'autoriscaldamento

Realizzazione tecnologica

■ materiale di supporto

- ceramica $-200 < T < 750\text{ }^{\circ}\text{C}$
- vetro $-200 < T < 500\text{ }^{\circ}\text{C}$

■ materiale termoresistivo

- platino $\alpha = 0.0038\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$
 - a filo avvolto $\Rightarrow$ realizzazione standard
 - film spesso $\Rightarrow$ sostituzione più veloce
 - film sottile $\Rightarrow$ piccolo, rapidissimo

Termistori

- Sono semiconduttori e la loro termoresistenza può variare negativamente o positivamente al variare della temperatura.
- La dipendenza di R dalla temperatura può essere espressa come:

$$R(T) = R_0 e^{\frac{B}{T} - \frac{B}{T_0}}$$

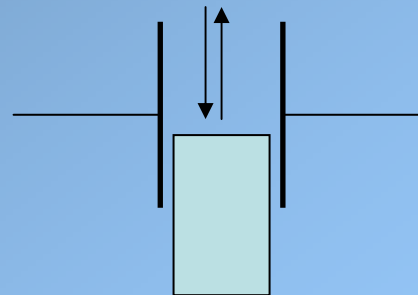
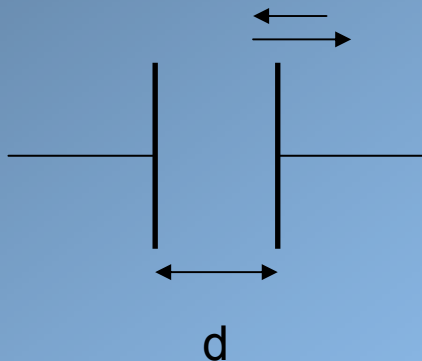
$$B = \frac{T_0 T_{max}}{T_0 - T_{max}} \ln\left(\frac{R_{max}}{R_0}\right)$$

Essendo B un parametro chiamato Temperatura caratteristica ed in relazione con la sensibilità del dispositivo

- Campo di misura: da -100°C a +150°C, (da -30°C a +100 °C per versioni lineari)
- Accuratezza: da 3 a 20°C
- Resistenza termica molto elevata (1000°C/W)
- Sensibilità: elevatissima. Spesso utilizzato in sistemi di protezione termica in cui l'elevato guadagno e la notevole non linearità sono utilizzati per realizzare un sensore ad uscita logica, in grado di rilevare il superamento di una certa soglia di temperatura.
- Abbastanza delicato ed inadatto ad impieghi in condizioni di elevato stress meccanico.

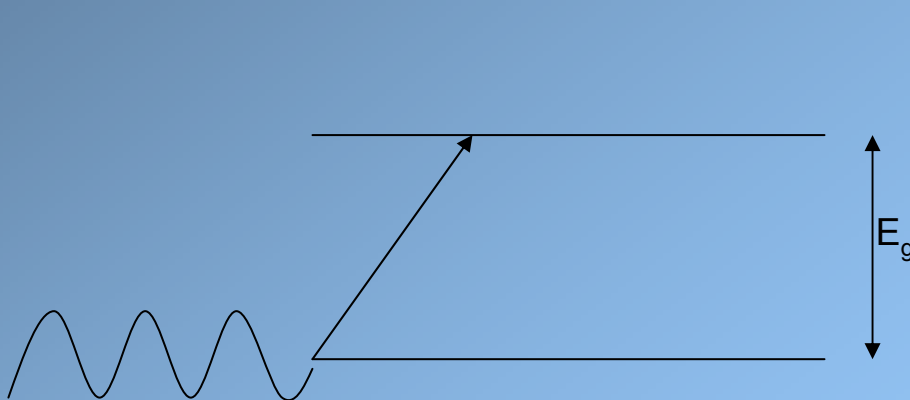
Fisica dei Sensori V

- Sensori Capacitivi: $C = \varepsilon A/d$
 - $\Delta d \Rightarrow \Delta C$ – Sensori di posizione
 - $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$; $\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_r \Rightarrow$ Sensori di posizione



Fisica dei sensori VI

- Effetto Fotoelettrico: generazione di cariche elettriche tramite fotoni:
 - $\frac{1}{2}mv^2 = \hbar\omega - \Phi$: l'energia dell'elettrone è proporzionale alla frequenza del fotone incidente, il numero, all'intensità della luce incidente.
- Passaggio in banda di conduzione:



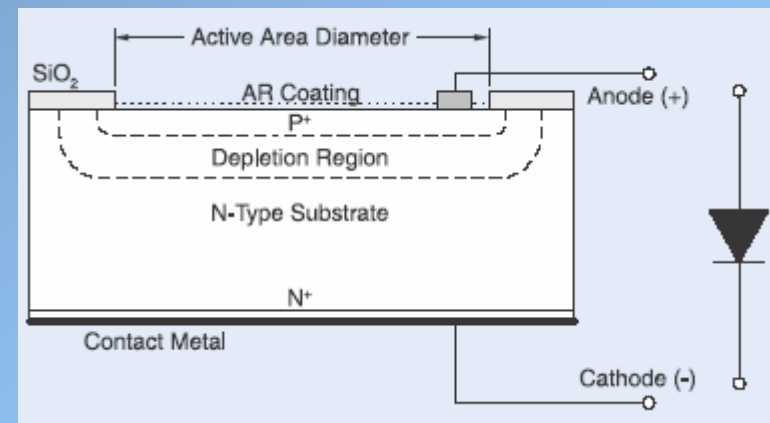
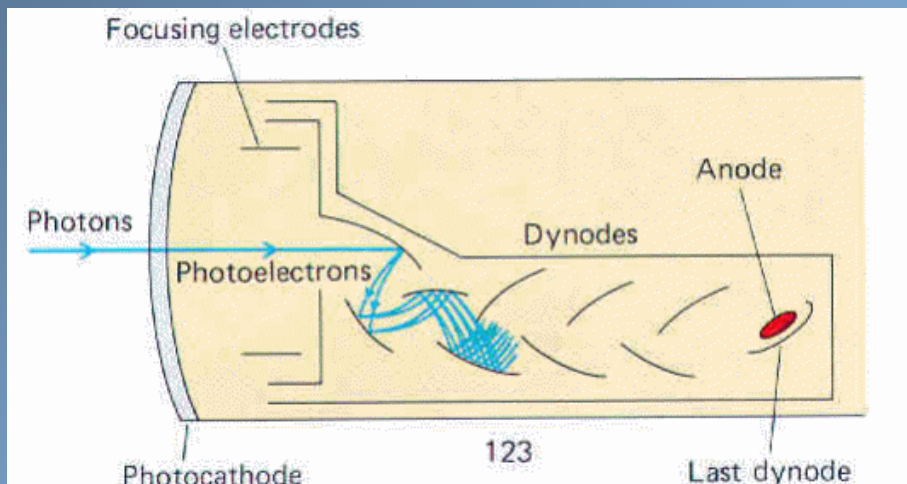
$$\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$$

$$N = N_0 \frac{1}{1 + e^{(E - E_g)/kT}} \cong N_0 e^{(E - E_g)/kT}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{Ne^2\tau}{m}$$

Sensori di luce

- Effetto fotoelettrico: Fotomoltiplicatori
- Promozione in banda di conduzione: fotoresistenze, fotodiodi, fototransistor
 - Correnti termiche $\sim T^{3/2}e^{-(E_g/kT)}$



Alcune caratteristiche di un fotomoltiplicatore

http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/ETD/pmt_handbook_complete.pdf

Efficienza accoppiamento ottico

Fotoni $\rightarrow$ fotocatodo 0.9

Efficienza del fotocatodo

frazione di fotoni che produce 1 fotoelettrone

0.1 – 0.9

Efficienza di raccolta del primo dinodo

$K = 0.9$

Numero di elettroni secondari emessi per ogni elettrone incidente sul

dinodo $G_D = 2 - 4$,

Guadagno del fotomoltiplicatore $G = k G_D^n$

n numero di dinodi. $G \sim 10^6$

Guadagno del fotomoltiplicatore $G = k G_D^n$

n numero di dinodi. $G \sim 10^6$

Alcune caratteristiche del fotodiodo

- Risposta spettrale: è la relazione tra la lunghezza d'onda della luce incidente e la corrente prodotta. È espressa in termini di:
 - Fotosensitività: rapporto tra la potenza della luce incidente in Watt e la corrente in uscita in Ampere. Può essere espressa in termini assoluti (W/A) o in percentuale rispetto al valore di picco (in funzione della lunghezza d'onda)
 - Efficienza quantica (QE): rapporto tra il numero di elettroni o lacune rivelati come una corrente ed i fotoni incidenti. Espressa in termini della sensitività $S(W/A)$ vale $QE = [(1250 \times S) / \lambda] \times 100$
- Corrente di corto circuito: è la corrente di uscita per carico pari a 0.
- Dark current: è la corrente di uscita che scorre quando il fotodiodo è polarizzato inversamente e la luce incidente è nulla. È una causa di rumore nelle applicazioni in cui si deve polarizzare inversamente, nel caso opposto, è rilevante la resistenza di shunt, definita come il rapporto tra la tensione e la dark current nell'intorno di $V=0$.

[photodiode_technical_information.pdf](#)

Sensori di luce II

- Charge Coupled Device (dispositivi a scorrimento di carica o CCD)
 - È essenzialmente una matrice di fotodiodi
 - Una volta che la carica è immagazzinata nelle buche di potenziale di ciascun fotodiodo, una tensione periodica applicata ai loro terminali, la fa scorrere dall'uno all'altro.
 - Nel periodo di scorrimento la CCD deve essere “accecata”.

[Characteristics and use of FFT-CCD.pdf](#)

Fabio Garufi - TAA

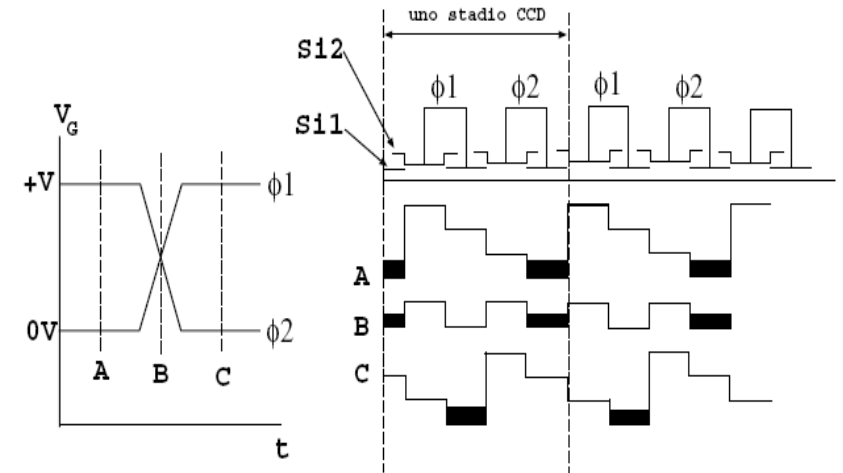
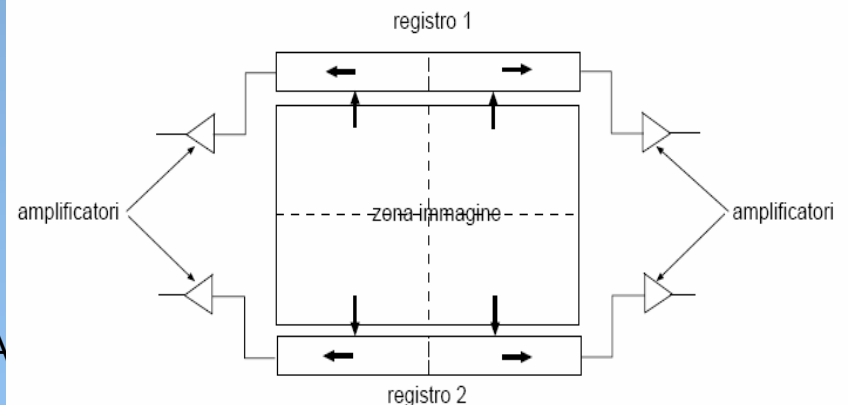


Figura 3.9: Operazione di trasferimento a due fasi



Fisica dei sensori: Fosforescenza e scintillazione.

- Cristalli inorganici: in genere cristalli di materiali alcalini.
 - Essi sono esclusivamente solidi e in essi il fenomeno della luminescenza è legato alla natura cristallina del mezzo.
 - Sono isolanti drogati con atomi detti attivatori, con livelli energetici che cadono nella banda proibita del cristallo.
 - Un elettrone può essere trasferito dalla banda di valenza alla banda di conduzione e le lacune viaggiano per qualche μm o vengono catturate dagli attivatori.
 - L'atomo attivatore, poi decade con i suoi tempi caratteristici
- Organici: in genere idrocarburi con carbonio nello stato di ibridizzazione sp^2 (tipo benzene). L'orbitale p_z non prende parte alla ibridizzazione e ed è detto π . Gli orbitali π , interagiscono fra loro per formare degli orbitali delocalizzati la cui eccitazione è responsabile della luminescenza.

...ancora scintillazione e fosforescenza

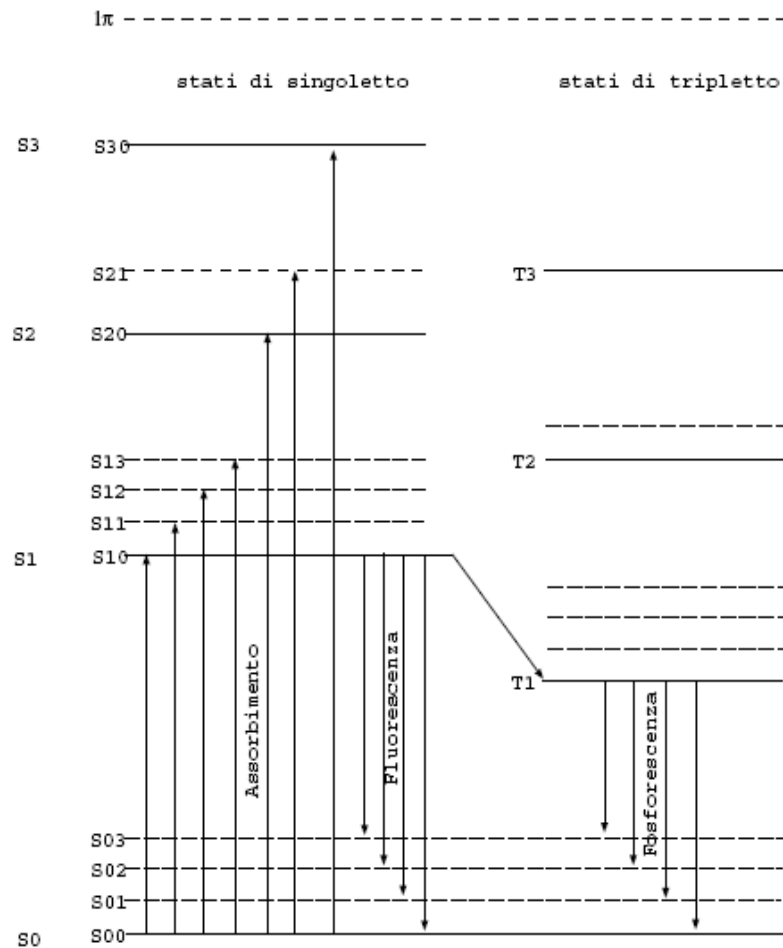
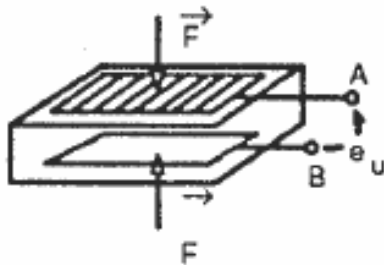


Figura 1.2: Livelli energetici π in una molecola organica. S_0 è lo stato fondamentale, S_i gli stati di singoletto, T_i di tripletto; il secondo indice è relativo al sottolivello vibrazionale.

Fisica dei sensori VII

- Effetto Piezoelettrico (Curie 1880)
 - Generazione di carica elettrica in seguito a una sollecitazione meccanica
 - Esiste in alcuni cristalli naturali, ceramiche e polimeri polarizzati.
 - È un effetto reversibile



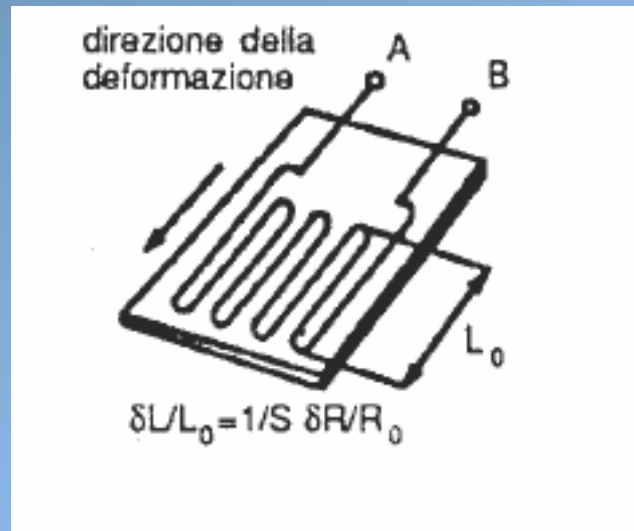
$$e_u = kF$$

$$e_u = \text{f.e.m. ai morsetti A e B}$$

$$F = \text{Forza applicata}$$

Fisica dei sensori VIII

- Effetto piezoresistivo
 - Variazione della resistività in seguito ad una deformazione dovuta ad uno sforzo.
 - È ridotto nei metalli e consistente nei semiconduttori



Effetto piezoresistivo: l'estensimetro

- Misura la deformazione
- E' di tipo autoeccitante
- Da in uscita una resistenza che va trasformata in una tensione variabile.

Strain $\Rightarrow \epsilon = \Delta L/L$ = deformazione relativa
↳ ϵ adimensionale

a film metallico
↳ più comune



a semiconduttore
↳ per applicazioni integrate



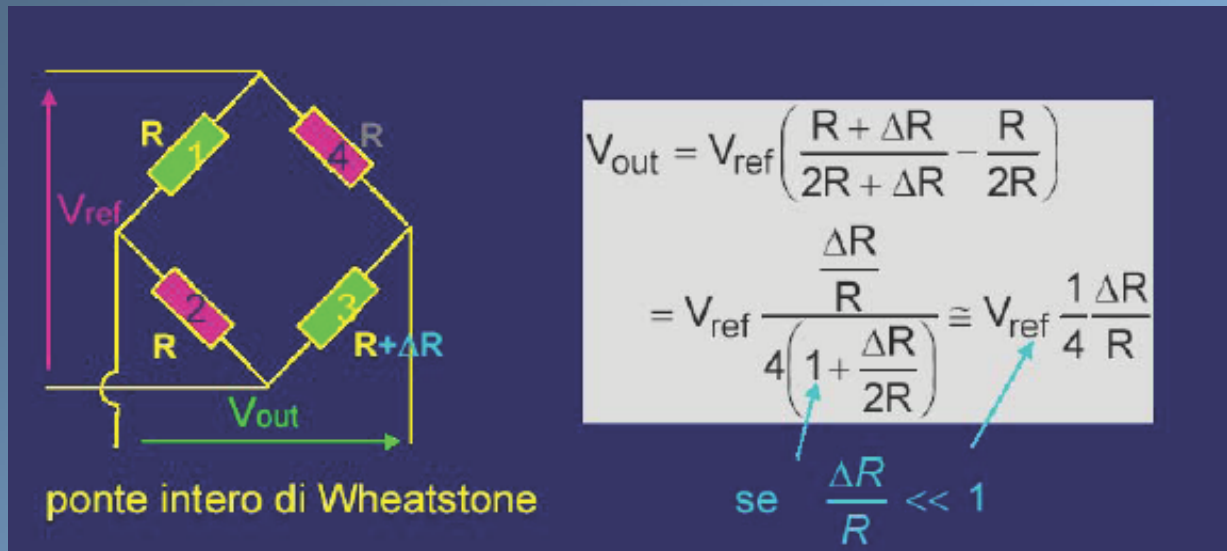
10mm

0.5mm

piezoresistenza

Trasformazione resistenza-tensione

- Ponte intero di Wheatstone



$$I_1 = V_{ref} / (R_1 + R_2)$$

$$I_2 = V_{ref} / (R_3 + R_4)$$

$$V(R_2) = I_1 R_2 = [R_1 / (R_1 + R_2)] V_{ref}$$

$$V(R_3) = [R_3 / (R_3 + R_4)] V_{ref}$$

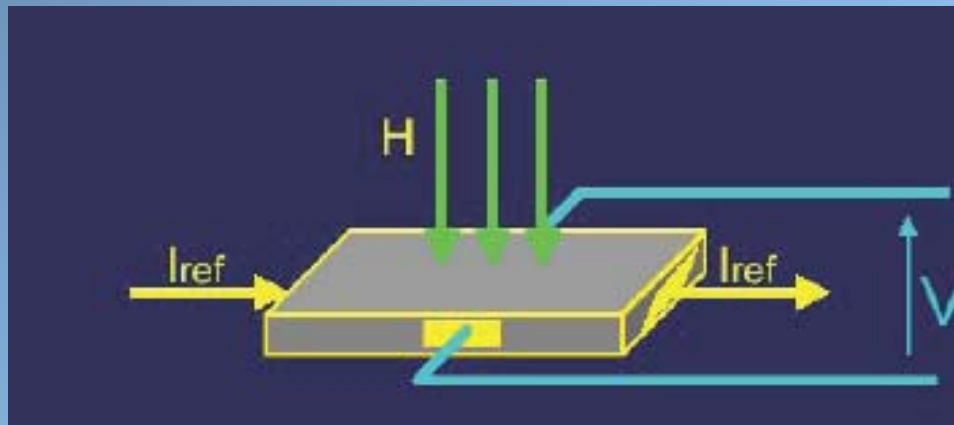
$$V_{out} = V(R_3) - V(R_2)$$

Fattore caratteristico dell'estensimetro: Gauge Factor

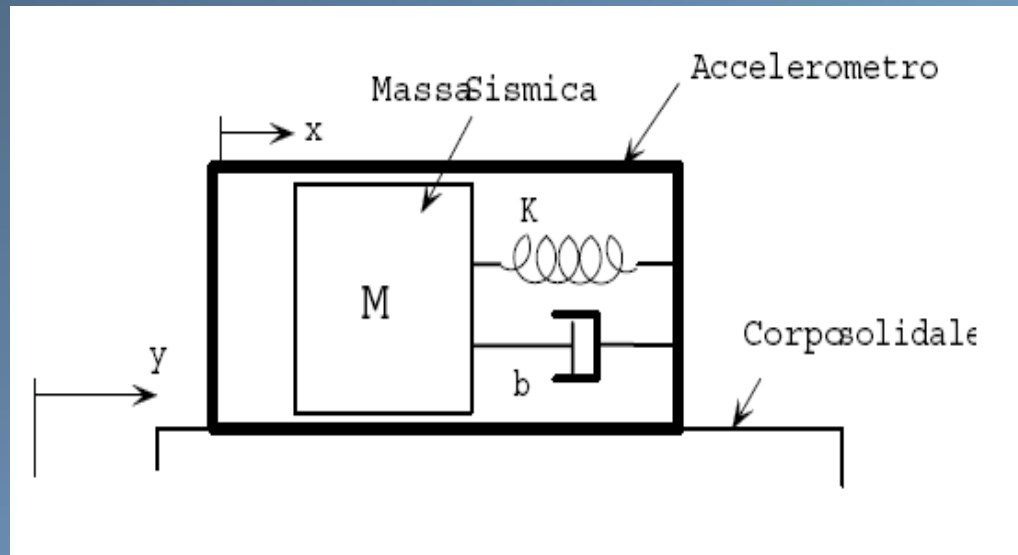
$$GF = (\Delta R / R) / (\Delta L / L) \text{ in questo caso } GF = 4V_{out} / \epsilon V_{ref} \Rightarrow \epsilon = KV_{out}$$

Fisica dei sensori IX

- Effetto Hall (E. Hall 1879)
 - Un materiale conduttore sottoposto all'effetto di un campo di induzione magnetica B_z normale al flusso di una corrente I_x , manifesta una differenza di potenziale V_y ortogonale al campo ed alla corrente.



Accelerometri



- Massa collegata ad una molla di costante elastica k e ad uno smorzatore di coefficiente di viscosità b .

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + Kx = -M \frac{d^2 y}{dt^2}$$

All'equilibrio $\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{dx}{dt} = 0$ dunque $\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{K}{M} x$

L'accelerazione è proporzionale ad uno spostamento. Sensore di spostamento; per es. capacitivo tra M e la parete

Rivelatori di gas

- Si tratta di dispositivi che sfruttano le proprietà di un minuscolo elemento composto da SnO_2 (biossido di stagno) sinterizzato, la cui conduttività elettrica aumenta in presenza di gas come idrogeno, monossido di carbonio, metano, propano; oppure di vapori organici come alcoli, chetoni, esteri, composti del benzene ecc.
- La conducibilità di questi sensori, quando esposti a sostanze riducenti, è fino a 20 volte quella in aria pulita
- Questi sensori sono costituiti praticamente da un supporto in materiale ceramico, da una resistenza riscaldante e da un blocchetto di materiale sensibile collegato ad una coppia di elettrodi
- Una reazione elettrochimica sulla superficie del sensore, tra l'ossigeno atmosferico e i granuli di biossido di stagno sinterizzato produce uno strato di ioni O_2^- che scambia elettroni con i granuli di SnO_2
- In presenza di gas riducenti, parte delle molecole di ossigeno superficiali reagiscono col gas, liberando elettroni che abbassano la resistività tra i granuli

