



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



Dipartimento di
**Ingegneria
e Architettura**

MISURE MECCANICHE TERMICHE E COLLAUDI

MISURE DI SPOSTAMENTO E DIMENSIONALI

Prof. Marco Bogar

A.A. 2024-2025

Introduzione

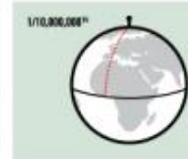
Nel Sistema Internazionale la lunghezza è una delle quattro grandezze fondamentali (assieme a massa, tempo e temperatura); le unità di misura e i campioni per tutte le altre grandezze sono derivate da queste.

What's a meter?

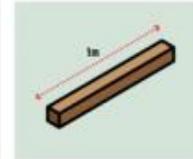
A history of the official definition



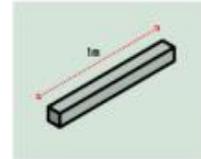
1790 The length of a pendulum that swings half of its maximum distance in one second



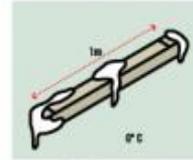
1791 The length of one ten-millionth of the distance between the North Pole and the equator



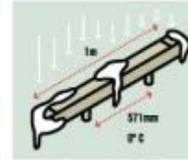
1795 The length of an official bar of brass fabricated to be exactly one meter, as determined in 1791



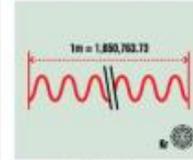
1799 The length of an official bar of platinum, measured from the brass bar and stored at the French National archives



1889 The distance between two lines on an official bar of platinum-iridium alloy, measured at zero degrees Celsius



1927 The same as 1889, but under standard atmospheric pressure and resting on two 1 cm diameter cylinders 571 mm apart on the same horizontal plane



1960 1,650,763.73 wavelengths of the radiation from the transition, in a vacuum, between levels $2p^{10}$ and $5d^9$ of the krypton-86 atom

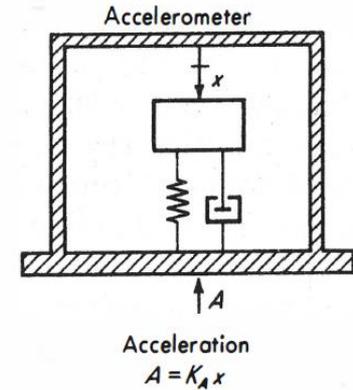
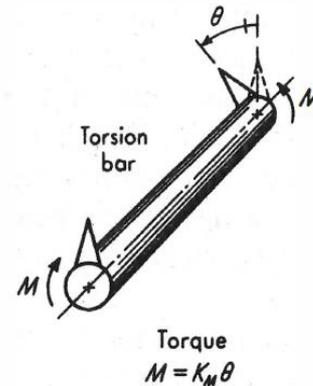
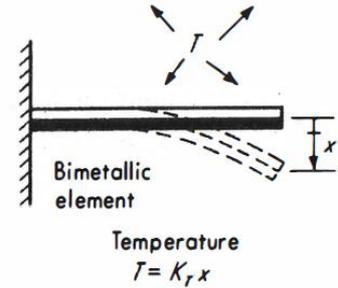
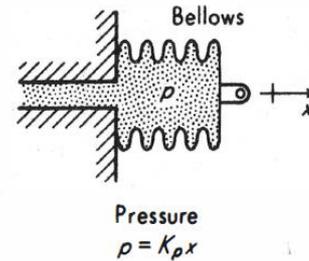


1983 The length traveled by light in vacuum during $1/299,792,458$ of a second

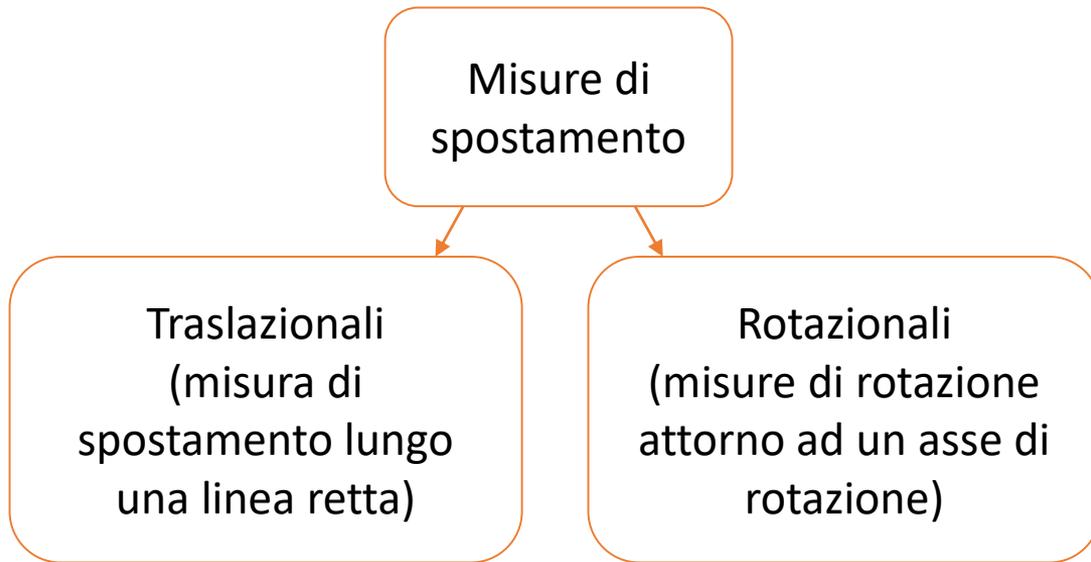
<https://www.swiss-miss.com/2007/08/whats-a-meter.html>

Introduzione

Le misure di spostamento sono alla base di altri tipi di misura perché alla base di misure di altre grandezze (come ad esempio forza, pressione, temperatura).



Misure di spostamento



I trasduttori dedicati alla misura di spostamento si possono classificare in accordo:

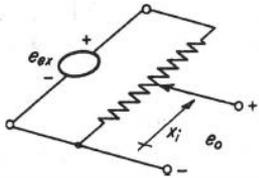
- alla natura di elaborazione elettronica del segnale (analogica o digitale)
- alla natura del principio fisico di misura
- al fatto che la misura venga effettuata con o senza contatto con l'oggetto di misura



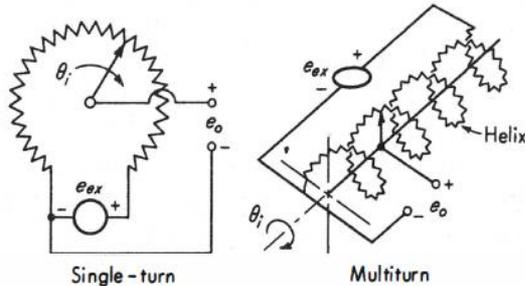
I potenziometri resistivi

Potenzimetri resistivi

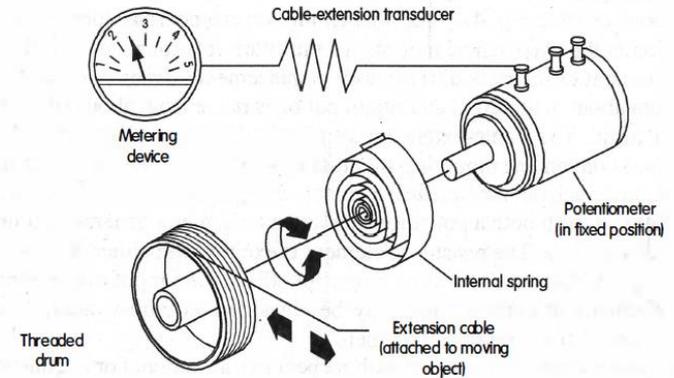
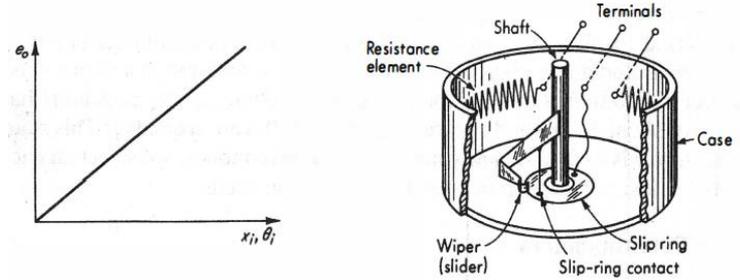
Composti da un elemento resistivo al quale è aggiunto un contatto mobile, trasducono un movimento traslazionale, rotazionale o una loro combinazione (es. movimento elicoidale) in una variazione di resistenza elettrica. L'elemento resistivo può essere alimentato sia in corrente continua che alternata



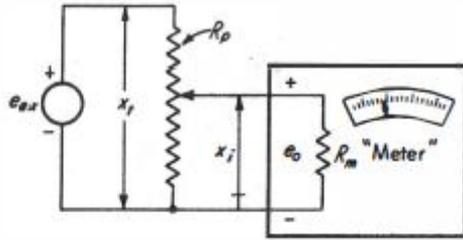
Translational



Rotational

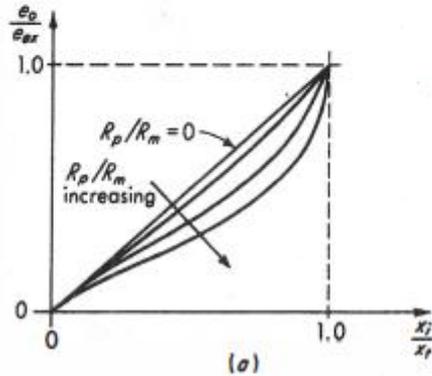


Potenzimetri resistivi



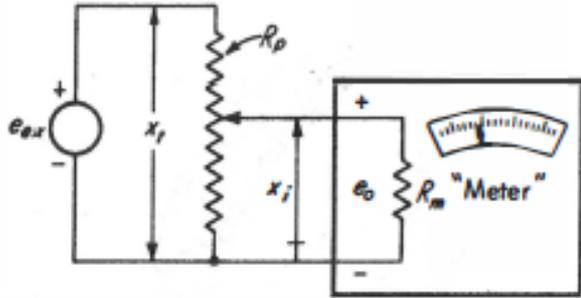
$$\frac{V_i}{V} = \frac{1}{\frac{x_t}{x_i} + \frac{R_p}{R_m} \left(1 - \frac{x_i}{x_t}\right)}$$

Idealmente: $R_m \rightarrow \infty$ e $\frac{V_i}{V} \rightarrow \frac{x_i}{x_t}$



In realtà bisogna considerare l'effetto di carico dello strumento: per valori di R_m non sufficientemente elevati, si può difatti introdurre un errore che riduce la linearità del processo di misura.

Potenzimetri resistivi



Questo fatto introduce poi un limite al processo di misura in quest'ottica: anche in questo caso teoricamente sarebbe possibile aumentare la sensibilità del metodo di misura aumentando la tensione di alimentazione, ma questa possibilità è limitata dalla capacità del potenziometro di dissipare potenza:

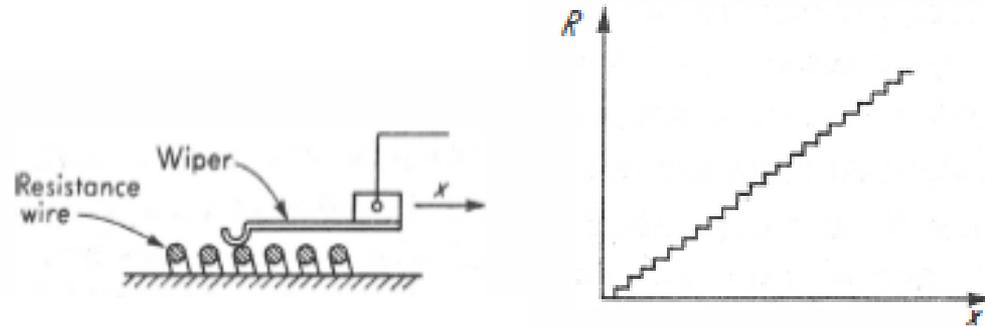
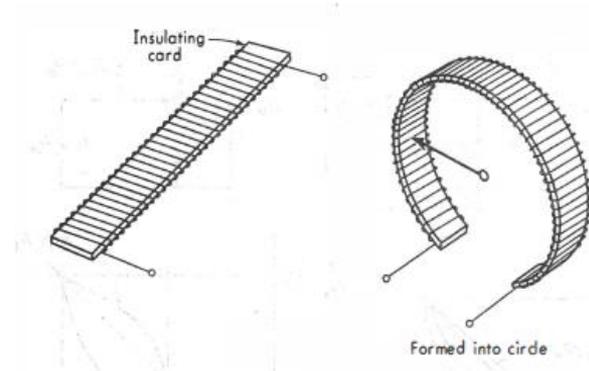
$$P = VI = \frac{V^2}{R} \rightarrow V_{max} = \sqrt{PR_p}$$

Solitamente strumenti a corsa breve sono caratterizzati da una maggior e sensibilità.

Potenzimetri resistivi

Soluzioni comuni per la misura dei potenziometri resistivi è data dall'utilizzo degli elementi a filo avvolto, dove un filo resistivo è avvolto su un supporto o una lamina modellata in funzione del movimento che è progettata per trasdurre.

In quest'architettura, la variazione di resistenza non è lineare, ma discretizzata: questo approccio permette quindi di estendere l'intervallo di misura a scapito della risoluzione.



Potenzimetri resistivi

Gli elementi a filo avvolto garantiscono tempi di vita e risoluzioni elevate ma sono più sensibili alla temperatura. Presentano un'elevata resistenza di contatto del cursore e possono sopportare solo basse correnti.

In alternativa al filo si possono impiegare lamine di materiali ceramici o plastiche conduttivi, la risoluzione è qui dipendente dalla resistenza equivalente relazionata al rumore relazionata alle fluttuazioni termiche della tensione di uscita.

Il principale vantaggio di impiegare plastiche conduttive risiede poi nella capacità di progettare finemente la struttura interna del componente.

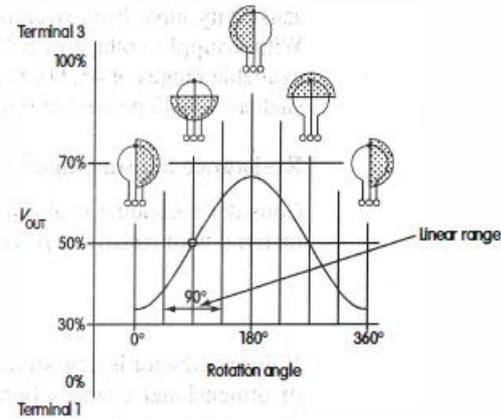
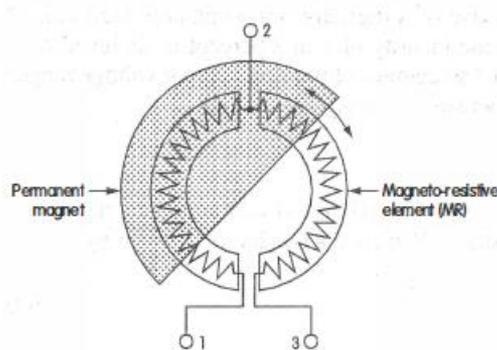
Il rumore è qui costituito dalle fluttuazioni spurie delle tensioni d'uscita durante lo spostamento del cursore e che includono l'effetto della risoluzione, nonché dalle caratteristiche meccaniche costruttive, e dello sporco che si può accumulare al suo interno. Un'ultima sorgente di tensione spuria (iR) è la resistenza di contatto mobile.

Le caratteristiche dinamiche dei potenziometri sono quelle di uno strumento di ordine zero, dal momento che la componente reattiva dell'impedenza totale è praticamente nulla alle frequenze di operative.

Potenzimetri magnetoresistivi

Sfrutta l'effetto magnetoresistivo, per il quale la resistenza cambia in presenza di un campo magnetico. È composto da un magnete permanente che ruota su due elementi magnetoresistivi mantenuti fissi. La tensione di uscita è lineare con l'angolo in un solo intervallo di misura. Possono rimpiazzare i potenziometri resistivi in alcune applicazioni.

Può essere più sensibile alla temperatura dei potenziometri resistivi ma offre il vantaggio di elevate sensibilità, coppia regolare ed elevati tempi di vita grazie all'assenza di contatto elettrico.





Misure di deformazione estensimetriche

Misure di deformazione estensimetrica

Basano il loro funzionamento sulla seconda legge di Ohm:

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

Come si può notare qualsiasi deformazione longitudinale o di sezione trasversale provoca una variazione della resistenza elettrica. La variazione infinitesima dR può essere espressa come:

$$dR = \frac{A(\rho dL + L d\rho) - \rho L dA}{A^2}$$

Da cui, essendo $V = AL \rightarrow dV = AdL + LdA = L(1 + \varepsilon)A(1 - \varepsilon\nu)^2 - AL$, dove $\varepsilon = dL/L$ è la deformazione e ν il coefficiente di Poisson. Potendo considerare ν piccola, $(1 - \varepsilon\nu)^2 \cong 1 - 2\varepsilon\nu$, risulta:

$$-2\nu AdL = LdA$$

Misure di deformazione estensimetrica

e:

$$dR = \frac{\rho AdL + LAd\rho + 2\rho vAdL}{A^2} = \frac{\rho dL(1 + 2v)}{A^2} + \frac{Ld\rho}{A} = \frac{\rho dL}{A^2} + \frac{\rho dL2v}{A^2} + \frac{Ld\rho}{A}$$

Da cui si ricava l'espressione del Gage Factor (GF), la figura di merito caratteristica degli estensimetri:

$$GF = \frac{dR/R}{dL/L} = 1 + 2v + \frac{d\rho}{\rho}$$

The diagram illustrates the decomposition of the Gage Factor equation into three components. Three arrows point from the terms in the equation to their respective descriptions:

- 1: Variazione di R dovuta alla variazione di lunghezza
- $2v$: Variazione di R dovuta alla variazione della sezione
- $\frac{d\rho}{\rho}$: Variazione di R dovuta all'effetto piezoresistivo

Misure di deformazione estensimetrica

$$GF = \frac{dR/R}{dL/L} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho}{\rho}$$

Noto il Gage factor, si può codificare la deformazione $\varepsilon = dL/L$ in variazione di resistenza. Si può infine definire esprimere il prodotto tra il coefficiente longitudinale di piezoelettricità (π_1) e il modulo di elasticità (E) come :

$$\pi_1 E = \frac{d\rho/\rho}{dL/L}$$

Misure di deformazione estensimetrica

Il principio di funzionamento degli estensimetri è infine utilizzato in diversi sensori:

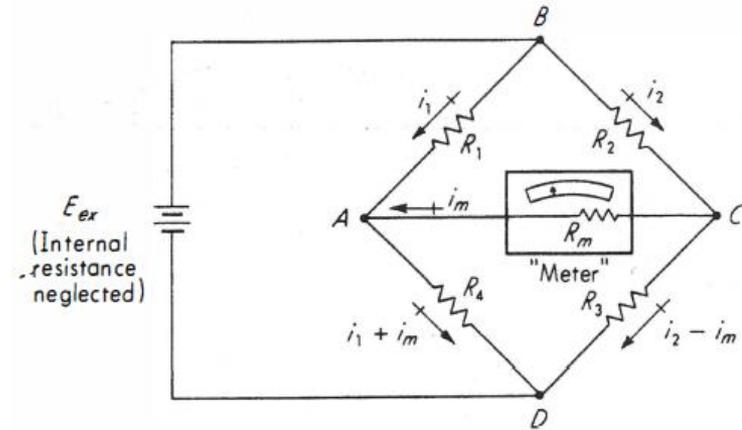
- I sensori incollati a lamina metallica
- I sensori a strato sottile metallico depositato sotto vuoto
- I sensori a strato sottile metallico depositato a spruzzo
- I sensori incollati a semiconduttore
- I sensori incollati a semiconduttore ottenuti per diffusione

Indipendentemente dal metodo produttivo gli estensimetri sono poi impiegati per:

- la misura delle tensioni di macchine e strutture
- per la costruzione di trasduttori di varie grandezze meccaniche (quali ad esempio forza, coppia, pressione, portata e accelerazione)

Misure di deformazione estensimetrica

Per rilevare la variazione di resistenza, gli estensimetri sono solitamente inseriti all'interno del ponte di Weathstone. In condizioni di equilibrio ($\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$), si ha che $V_{AC} = 0$. Al variare di uno dei valori delle resistenze in gioco le correnti che attraversano i rami BAD e BCD del ponte non sono più tra loro uguali e la tensione V_{AC} non è più nulla.



Misure di deformazione estensimetrica

Il ponte può operare:

- A deflessione: si misura la differenza di tensione, permette di rilevare anche fenomeni rapidamente variabili nel tempo;
- Ad azzeramento: la deflessione viene compensata regolando opportunamente una resistenza che produce la lettura dello strumento. Richiede tempi di misura più elevati e necessita di una resistenza variabile tarata

Misure di deformazione estensimetrica

Come si può poi notare:

$$V_{AB} = \frac{R_1}{R_1 + R_4} V^+$$

$$V_{CB} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} V^+$$

Da cui:

$$V_{AC} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} + \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) V^+$$

Si osserva che l'uscita del ponte è lineare con la tensione di alimentazione, ma non con le resistenze. La condizione di linearità si soddisfa nel caso in cui $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ e $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4$ per cui:

$$V_{AC} = \frac{\Delta R_1}{R_1} V^+$$

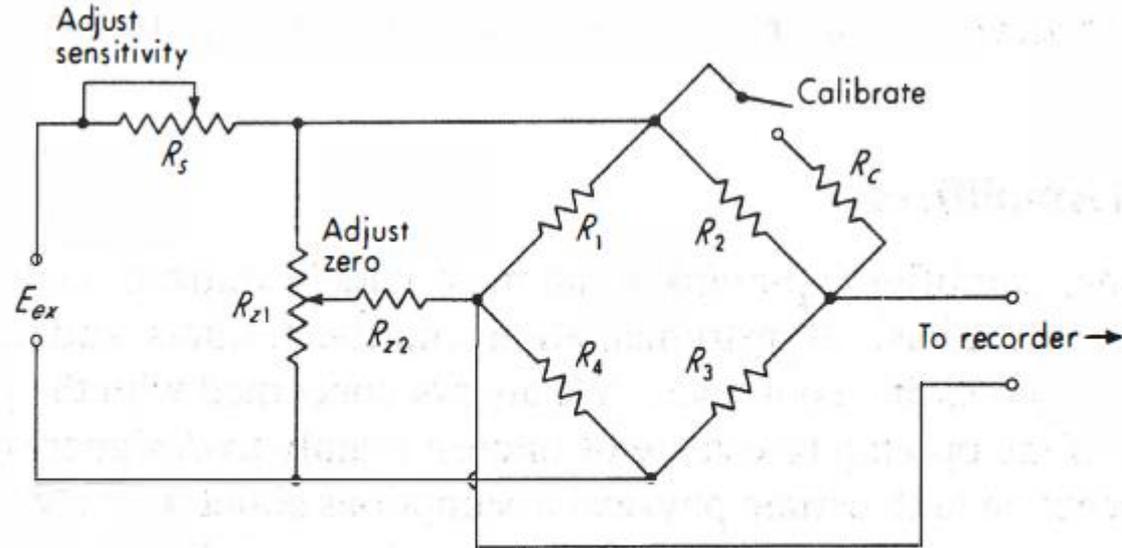
In ogni caso la linearità della risposta è garantita per variazioni di resistenza piccole rispetto al valore nominale.

La sensibilità del ponte è data dal rapporto $V_{AC}/\Delta R$.

Misure di deformazione estensimetrica

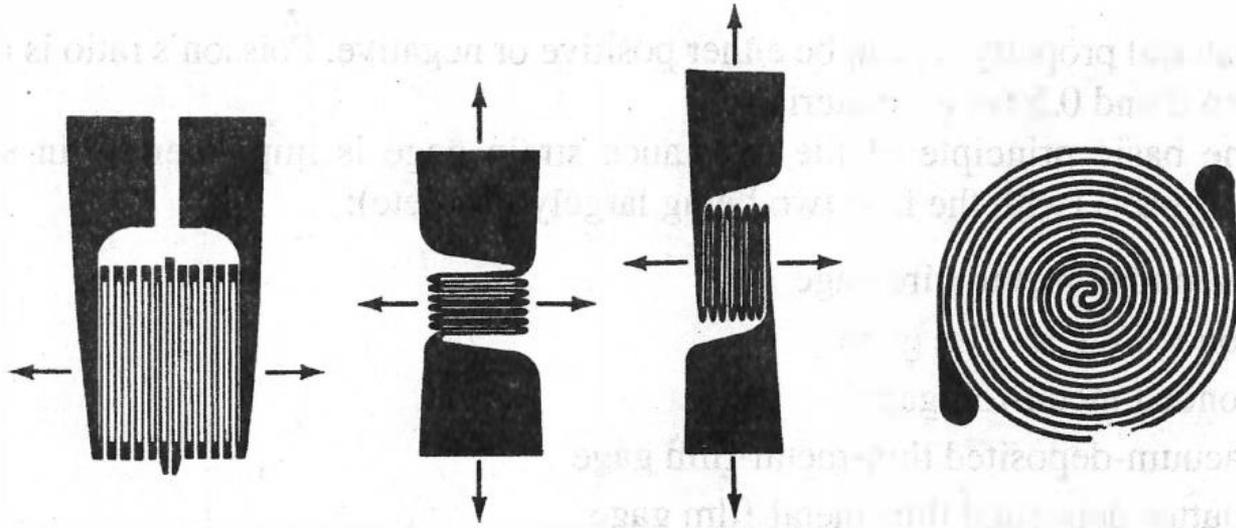
Il ponte nella sua applicazione viene a sua volta inserito in un circuito di più complesso che permette di:

- Regolare la sensibilità complessiva
- Tarare la tensione di uscita in condizioni di equilibrio e assenza di sollecitazione
- Tarare per mezzo di resistenza di shunt



If $R_1 \approx R_2 \approx R_3 \approx R_4 < 1,000$ ohms (usual strain-gage transducer),
then
 $R_{z2} \approx 100 R_1$
 $R_{z1} \approx 25,000$ ohms

Misure di deformazione estensimetrica



Misure di deformazione estensimetrica

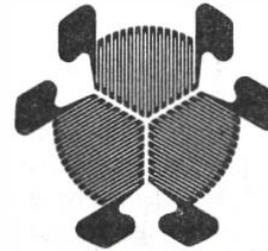
Gli estensimetri a lamina metallica sono quelli più impiegati in ambito ingegneristico e sono formati da un substrato flessibile (poliammide o resine a base di materiali compositi) di circa 20 μm di spessore sul quale è presente la lamina metallica, spessa 5 μm . Diversi metalli permettono di ottenere diversi gradi di risoluzione.

Tipicamente la resistenza degli estensimetri è pari a 120, 350 e 1000 Ω e sono progettati per operare in un intervallo di correnti tra i 5 e i 40 mA, per valori di GF tra 2 e 4.

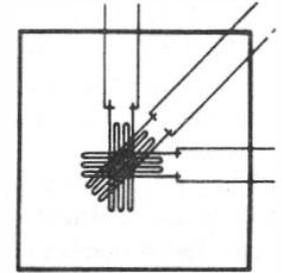
Il GF è ricavato da misure statistiche, considerato il fatto che, una volta posizionato, l'estensimetro non può più essere rimosso dal campione.

Misure di deformazione estensimetrica

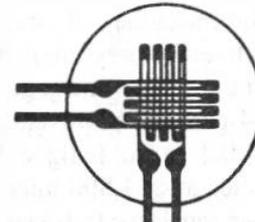
Per applicazioni specifiche gli estensimetri possono essere raggruppati in assieme chiamati rosette, che permettono di ottenere misure più precise quando è di interesse identificare anche le direzioni nella quale si sviluppa la deformazione.



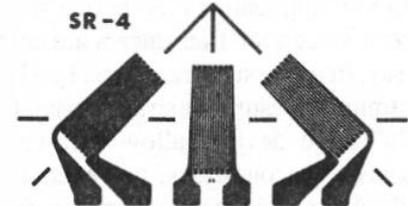
FABR-50D-12SX
3-Element Rosette
60° Planar
(foil)



AR-1
3-Element Rosette
45° Stacked
(wire)



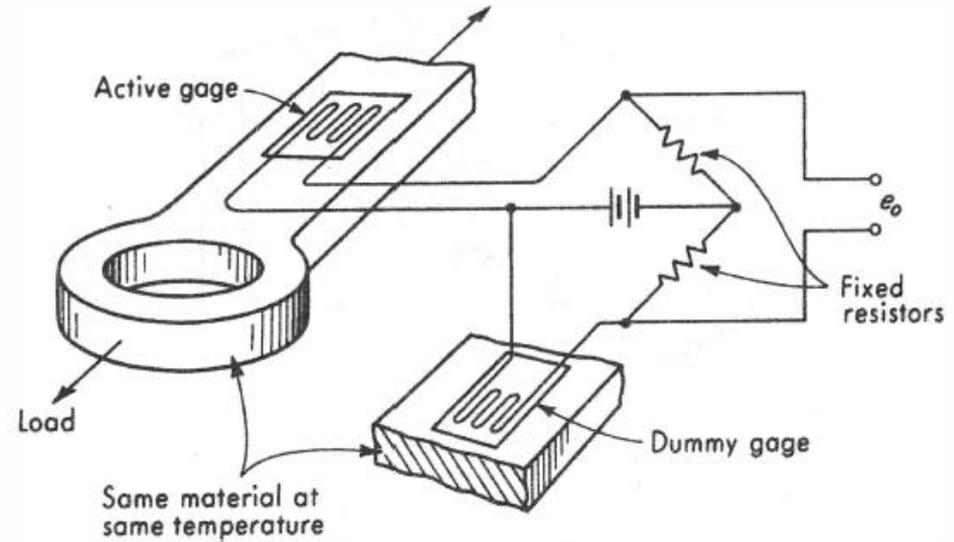
FABX-50-12SX
2-Element Rosette
90° Stacked
(foil)



SR-4
FAER-25RB-12SX
3-Element Rosette
45° Planar
(foil)

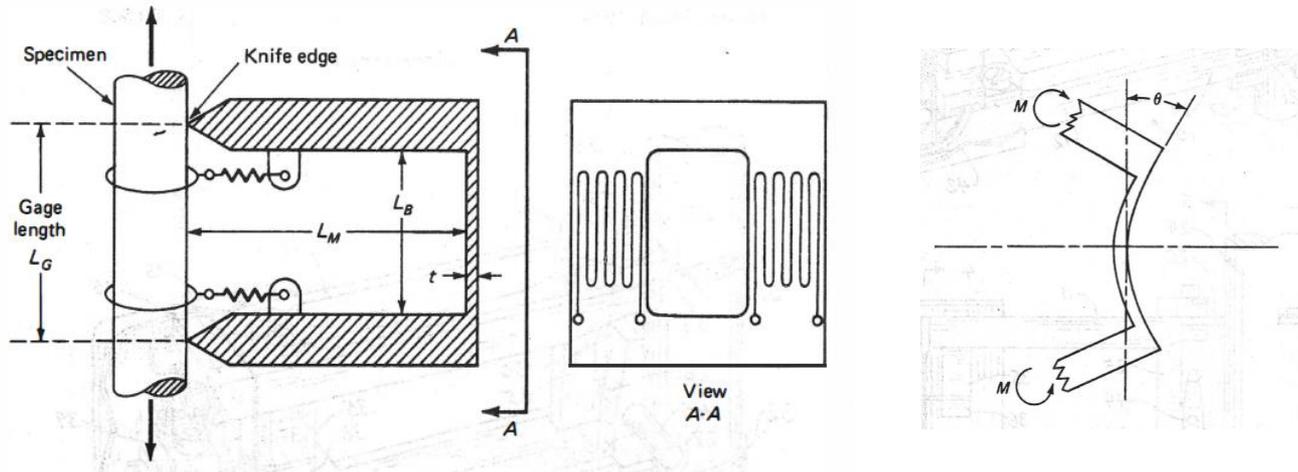
Misure di deformazione estensimetrica

Considerata composizione e dimensioni degli estensimetri, la temperatura è un importante fattore di disturbo per la misura. In quest'ottica, si può impiegare il circuito di compensazione rappresentato in figura



Misure di deformazione estensimetrica

Una tipica applicazione degli estensimetri vede il loro impiego negli estensimetri, le macchine per effettuare prove di trazione sui materiali.

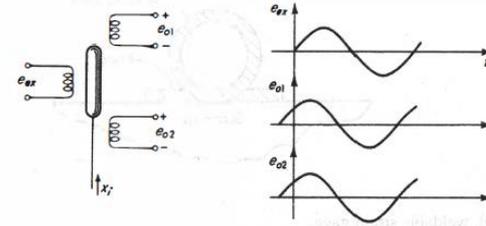




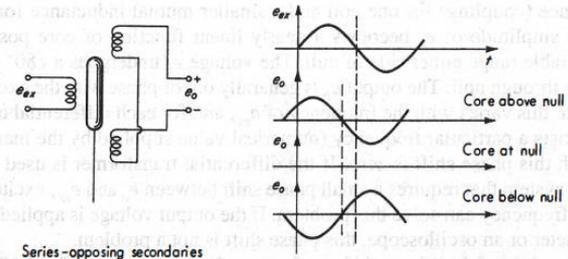
Ulteriori tecniche di trasduzione dello spostamento

Trasformatori differenziali

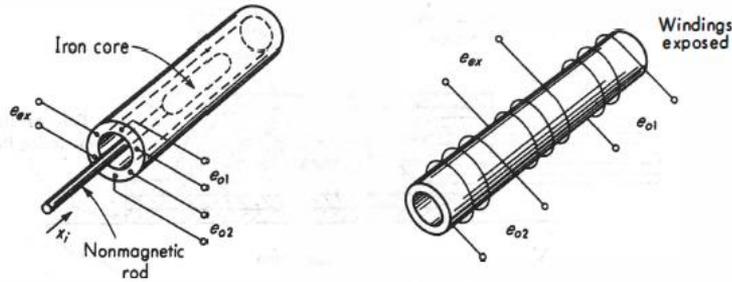
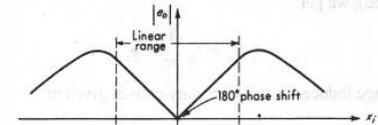
Impiegati per misure di spostamenti lineari e di rotazioni, operano in corrente alternata. Composti da un avvolgimento primario e da due secondari, il loro principio di funzionamento è basato sullo sfasamento indotto



Core in null position



Series-opposing secondaries

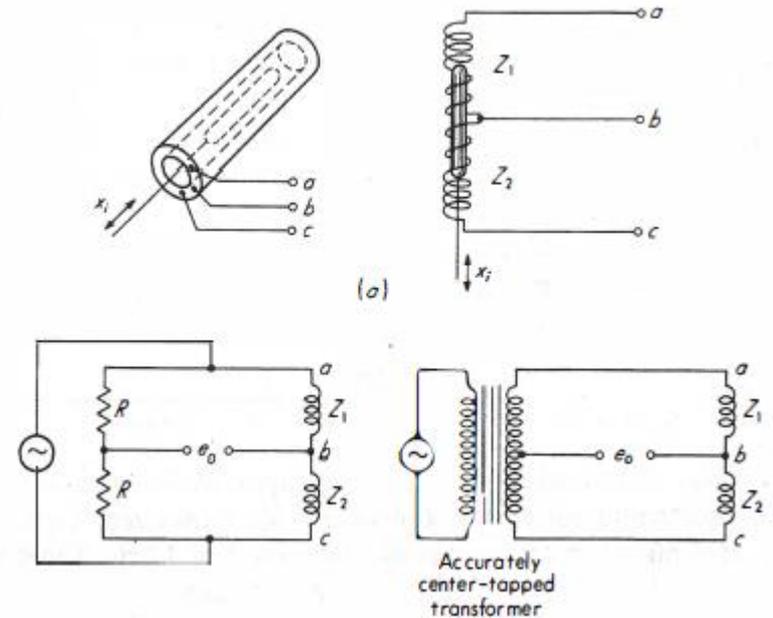


Sonde a induttanza variabile

Il nucleo mobile di materiale ferroso, in base alla posizione dello stesso, fa variare (la riluttanza, e di conseguenza) l'induttanza.

Anche in questo caso si può ottenere una variazione di induttanza linearmente dipendente dallo spostamento, impiegando un circuito a ponte.

L'impiego di corrente alternata implica che la dinamica del sensore è limitata dalla risposta in frequenza del circuito



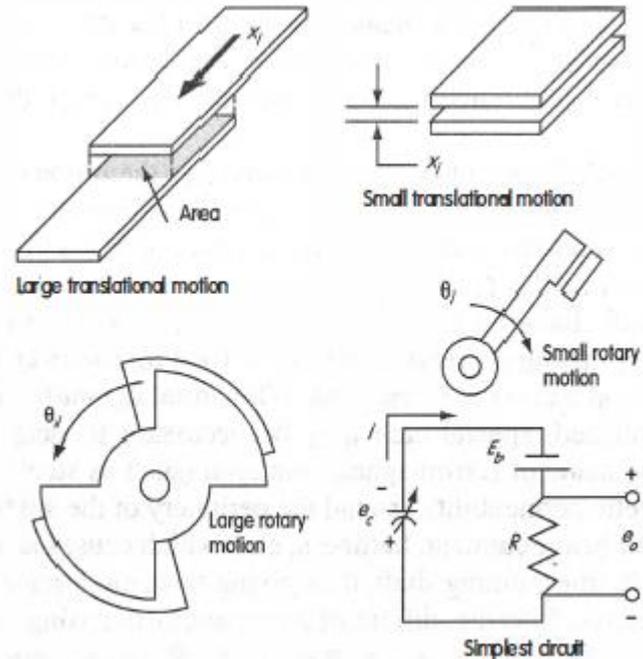
Trasduttori capacitivi

Al pari di quanto visto con i traduttori resistivi, si può codificare lo spostamento in termini di variazione di capacità:

$$C = \varepsilon \frac{A}{x}$$

Dove ε è la costante dielettrica del mezzo.

L'impiego di corrente alternata implica che la dinamica del sensore è limitata dalla risposta in frequenza del circuito.



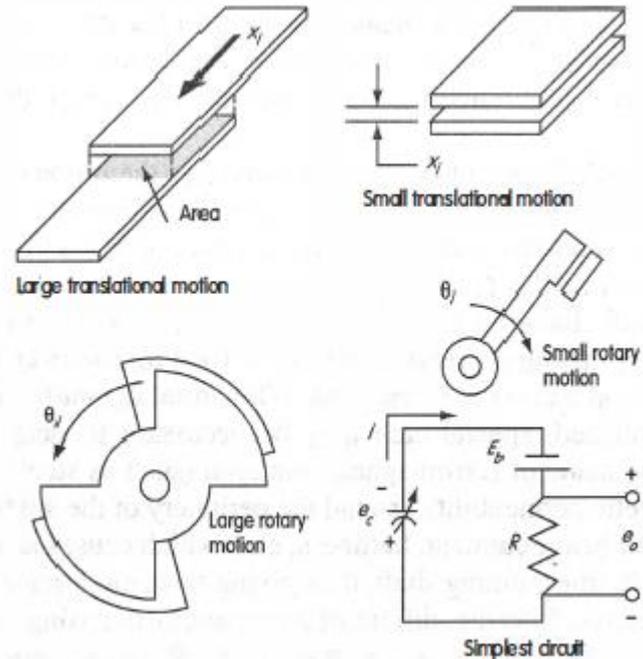
Trasduttori capacitivi

Al pari di quanto visto con i trasduttori resistivi, si può codificare lo spostamento in termini di variazione di capacità:

$$C = \varepsilon \frac{A}{x}$$

Dove ε è la costante dielettrica del mezzo.

L'impiego di corrente alternata implica che la dinamica del sensore è limitata dalla risposta in frequenza del circuito.



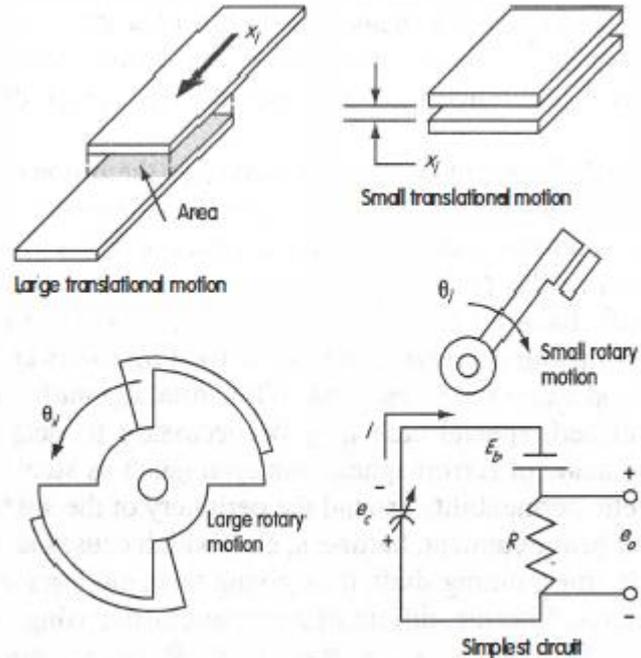
Trasduttori capacitivi

La variazione di capacità viene solitamente trasdotta in una variazione di corrente o tensione:

$$I = j2\pi fVC$$

$$V = \frac{I}{j\omega C}$$

La larghezza di banda di lavoro di tali sensori è pertanto limitata dalle frequenze di risonanza e di taglio del circuito in cui l'elemento capacitivo è inserito.



Trasduttori capacitivi

Nel caso di variazioni di distanza tra le piastre si misura lo spostamento (positivo o negativo) rispetto alla posizione di *stand-off*, e ricordando la relazione tra carica, capacità e differenza di potenziale:

$$Q = CV = \frac{\varepsilon A}{x_0 - x} V$$

Considerando che le variazioni possono essere considerate piccole, l'espressione può essere scritta come sviluppo di Taylor ($Q = Q_0 + \frac{\partial Q}{\partial x} dx + \frac{\partial Q}{\partial V} dV$), il che ci porta a definire la caratteristica di trasferimento:

$$\frac{V}{x} = \frac{K\tau j\omega}{j\omega\tau + 1}$$

$\omega \rightarrow$ il trasduttore non può operare in corrente continua.

Per valori della costante tempo $\tau = RC \gg 1$ la risposta è lineare, a significare che

Trasduttori capacitivi

Vantaggi:

- Elevata sensibilità e stabilità
- Scarsa sensibilità alle variazioni di temperatura

Svantaggi:

- Sensibili alle variazioni di capacità dei cavi
- Sensibili alle variazioni delle caratteristiche del dielettrico
- Elevata impedenza

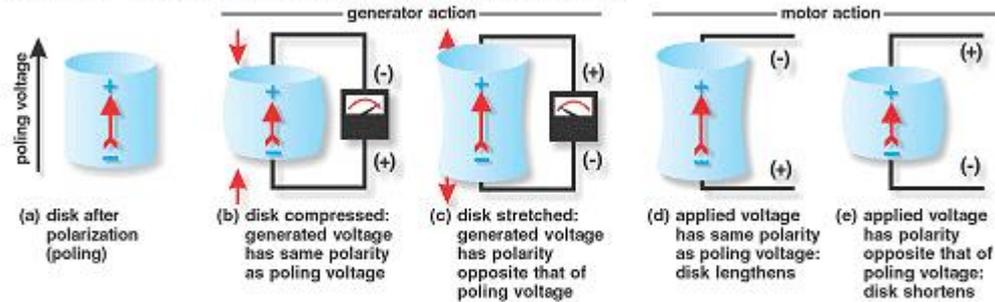


Trasduttori piezoelettrici

Trasduttori piezoelettrici

La piezoelettricità è una proprietà di alcuni materiali cristallini di polarizzarsi e generare ai loro capi una differenza di potenziale se sottoposti a deformazione meccanica (piezoelettricità diretta) e al tempo stesso di venire deformati se ai loro capi si applica una differenza di potenziale (piezoelettricità inversa). Mentre la prima applicazione è volta allo sviluppo di sensori, il secondo caso vede svariate applicazioni come eccitatori di vibrazioni o negli ugelli a stampanti a getto di inchiostro, o nei micro-attuatori ad esempio.

Figure 1.4 Generator and motor actions of a piezoelectric element

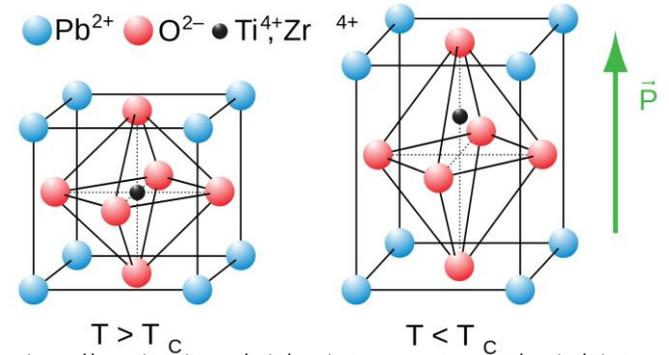


* Generator action is used in fuel-igniting devices, solid state batteries, and other products; motor action is adapted to piezoelectric motors, sound or ultrasound generating devices, and many other products.

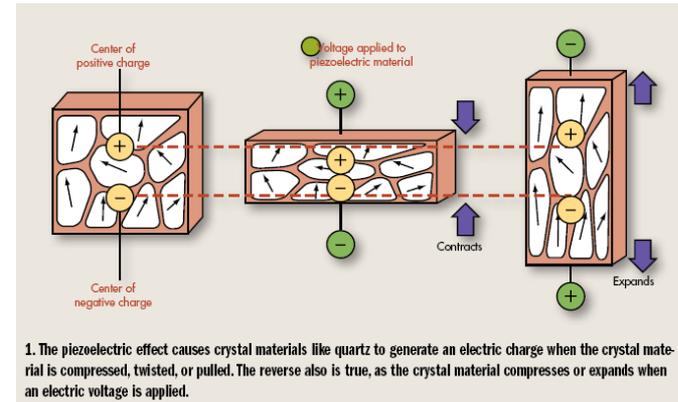
<https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>

Trasduttori piezoelettrici

Diverse classi di materiali manifestano piezoelettricità, tra loro: materiali cristallini (es. quarzo, topazio, ...), materiali ceramici e semiconduttori dei gruppi III-V e II-VI (organizzati nella forma cristallina detta wurtzite). In aggiunta ai materiali cristallini anche alcuni materiali sintetici, ceramici o polimerici sono dotati (o possono venir dotati di tale proprietà)



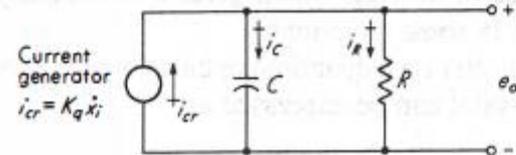
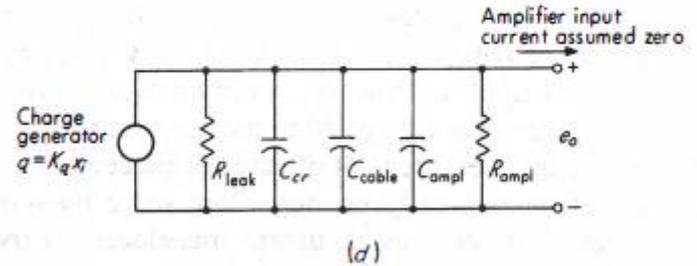
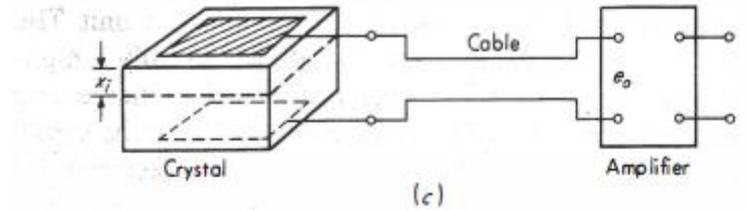
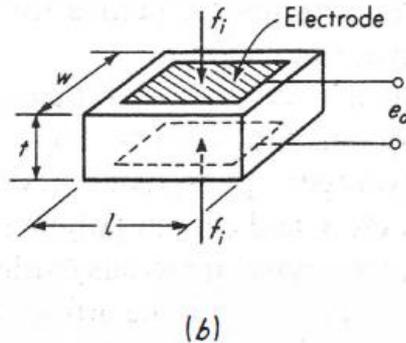
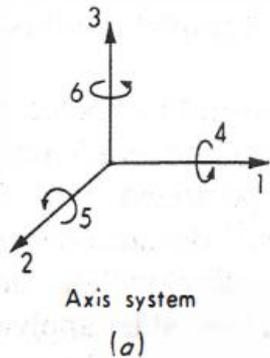
https://en.wikipedia.org/wiki/Lead_zirconate_titanate#/media/File:Perovskite.svg



Trasduttori piezoelettrici

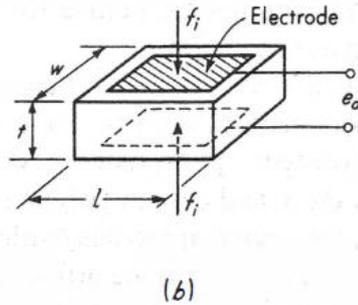
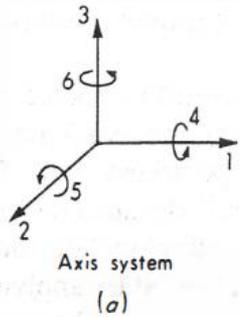
L'effetto piezoelettrico è sensibile alla direzione nella quale viene applicata la deformazione. La sensibilità a questo effetto può poi essere ottimizzata conferendo al corpo sensibile forme specifiche.

I materiali piezoelettrici sono solitamente isolanti, per questo possono essere anche modellati come una capacità, per la quale $V = Q/C$.



Trasduttori piezoelettrici

L'effetto piezoelettrico è sensibile alla direzione nella quale viene applicata la deformazione. La sensibilità a questo effetto può poi essere ottimizzata conferendo al corpo sensibile fattori di forma specifici.



I trasduttori piezoelettrici sono caratterizzati da due classi di parametri: le costanti g e d ; il pedice indica la direzione nella quale si valuta la deformazione. La costante g mette in relazione la sensibilità del corpo in relazione allo spessore:

$$g_{33} = \frac{\text{campo prodotto nella direzione 3}}{\text{sfuerzo applicato nella direzione 3}} = \frac{e_0/t}{f_i/(wl)}$$

(es; per il quarzo: $g_{33} = 50 \cdot 10^{-3} \text{ Vm/N}$; con $t=2.5 \text{ mm} \rightarrow g_{33} = 127 \text{ Vmm}^2/\text{N}$; sensibilità = 0.1 mV/N), mentre la costante d mette in relazione la forza applicata e la carica generata:

$$d_{33} = \frac{\text{carica generata nella direzione 3}}{\text{forza applicata nella direzione 3}} = \frac{Q}{f_i}$$

Le due costanti sono tra loro legate dalla costante dielettrica del materiale:

$$d = \epsilon_r g$$

Trasduttori piezoelettrici

La carica generata dal cristallo può quindi essere espressa in funzione dello spostamento:

$$q = K_q x_i$$

Dove la costante K è specifica del sensore. Il circuito elettrico equivalente del sistema di misura può essere rappresentato da un circuito RC parallelo, nel quale:

$$i_R = \frac{e_0}{R}$$

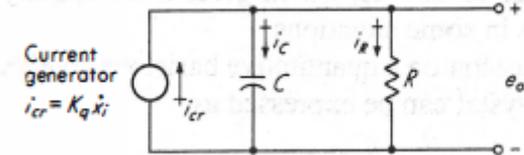
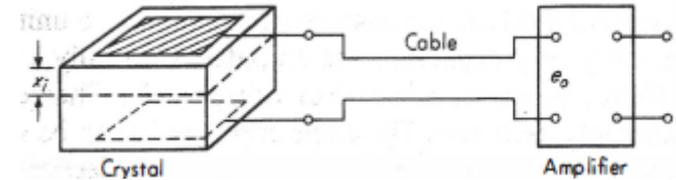
$$i = K_q \dot{x}_i = i_C + i_R$$

$$i_C = C \dot{e}_0$$

$$C \dot{e}_0 = K_q \dot{x}_i - \frac{e_0}{R}$$

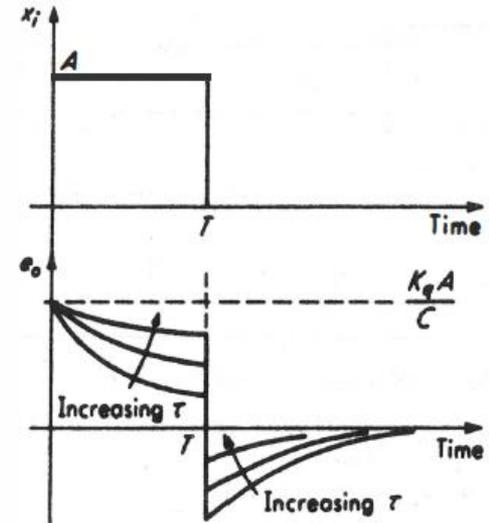
$$\frac{e_0}{\dot{x}_i}(j\omega) = \frac{j\omega\tau K}{j\omega\tau + 1}$$

Dove: $K=K_q/C$ rappresenta la sensibilità e $\tau=RC$ è la costante tempo del circuito



Trasduttori piezoelettrici

La costante tempo definisce il tempo impiegato dal condensatore a scaricarsi (in questo caso la carica si ridistribuisce all'interno del materiale). Elevati valori di costanti tempo permettono di aumentare la stabilità nel tempo del valore misurato. Per aumentare τ è però necessario aumentare R o C, riducendo quindi la sensibilità della misura (C influisce sulla costante K, R sui vincoli della resistenza di ingresso del circuito di misura).





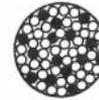
Trasduttori elettro-ottici

Trasduttori elettro-ottici

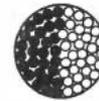
Composti da fasci di fibre ottiche sono caratterizzati dal notevole vantaggio di effettuare misure senza contatto. Sono costituiti da due fasci di fibre ottiche raggruppate nella stessa sonda: metà sono usate per emettere la radiazione emessa da una sorgente, mentre l'altra metà sono usate per raccogliere la frazione di radiazione riflessa dalla superficie.

Garantiscono sensibilità di misura che spaziano dalle decine di micron a poche centinaia di millimetri. La sensibilità della misura dipende però dalle proprietà ottiche del materiale sul quale incide la radiazione, nonché dalla disposizione delle fibre all'interno della sezione: ad oggi la distribuzione casuale è quella che meglio permette di ricalcare il profilo ideale (nel quale una fibra ricevente è circondata da quattro trasmettenti).

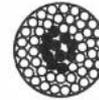
- Transmitting fiber
- Receiving fiber



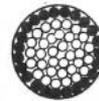
Random



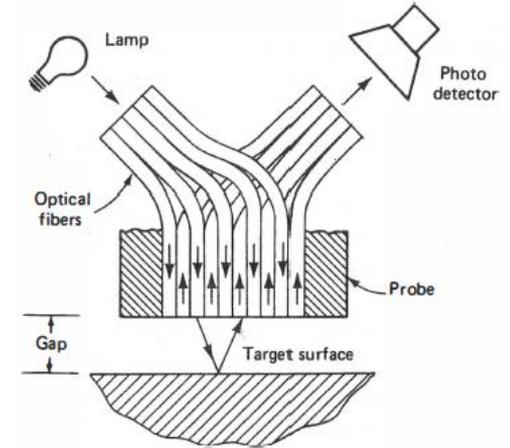
Hemispherical



Concentric transmit outside



Concentric transmit inside

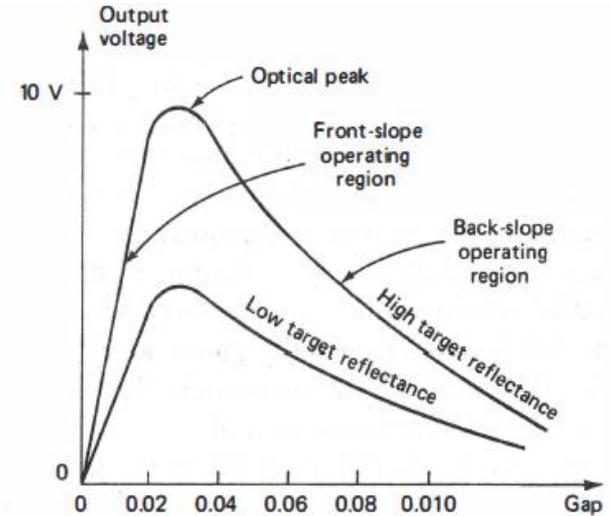


Trasduttori elettro-ottici

La caratteristica di misura di questa classe di sensori ha una forma a campana: nel tratto crescente la risposta è circa lineare. L'intensità cresce perché una frazione sempre maggiore della sezione del fascio di fibre ottiche viene illuminato.

Al raggiungimento del picco ottico segue poi un tratto discendente, nel quale non tutta la radiazione riflessa viene raccolta dalle fibre riceventi.

La regione a pendenza anteriore è caratterizzata da un'elevata sensibilità, maggiore di quella che caratterizza la regione a pendenza posteriore. Quest'ultima è anche meno lineare rispetto alla prima.



Ulteriori approfondimenti a riguardo durante il seminario tenuto dal Dott. Francesco Falcetelli (Università di Bologna), dal titolo:

Misure con sensori in fibra ottica

Giovedì 12/12/2024



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE



Dipartimento di
**Ingegneria
e Architettura**