

Panoramica sui sensori

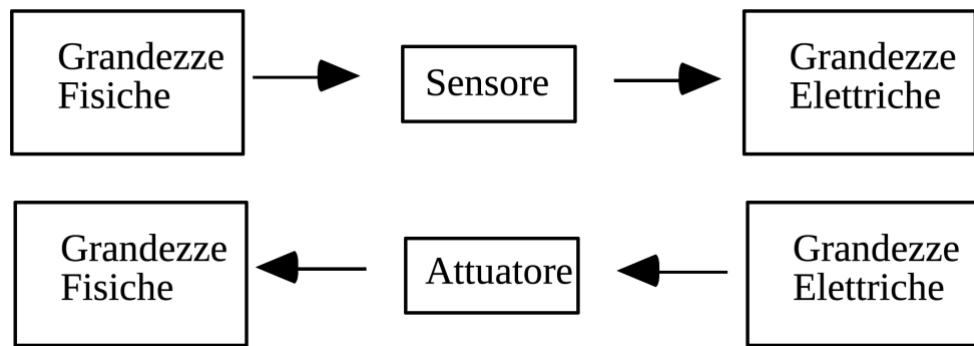
Giacomo Torzo
Giorgio Delfitto

Torzo@padova.infm.it
Delfitto@padova.infm.it

Dip. Fisica, Università di Padova
Dip. Fisica, Università di Padova

TRASDUTTORI E SENSORI

Un *trasduttore* è un dispositivo che genera un segnale *elettrico* correlato con una grandezza fisica, o più in generale con una modifica di qualsivoglia dell'ambiente circostante (**sensore**), oppure un dispositivo capace di produrre un effetto fisico quando gli venga fornito un segnale elettrico (**attuatore**).



Alcuni trasduttori sono *reversibili*, cioè possono funzionare come *sensori* o come *attuatori*.

Trasduttore	Attuatore		Sensore
bobina + magnete	altoparlante	↔	microfono
magn.+bob.+ spazzole	motore elettrico	↔	dinamo
ceramica piezoelettrica	beeper, traslatore	↔	microfono, ...
giunzione PN	diodo LED	↔	fotodiodo

Gli stessi elementi sensibili possono essere utilizzati per misurare grandezze fisiche di natura diversa:

- sensori di *temperatura* possono funzionare come termometri, ma anche come misuratori di *livello*, di *flusso* ...
- sensori di *forza* possono venire usati come misuratori di *pressione*, come *microfoni*, come *accelerometri* ...

SENSORI DI TEMPERATURA

1) *resistivi (RDT) (metallici o a semiconduttore)*

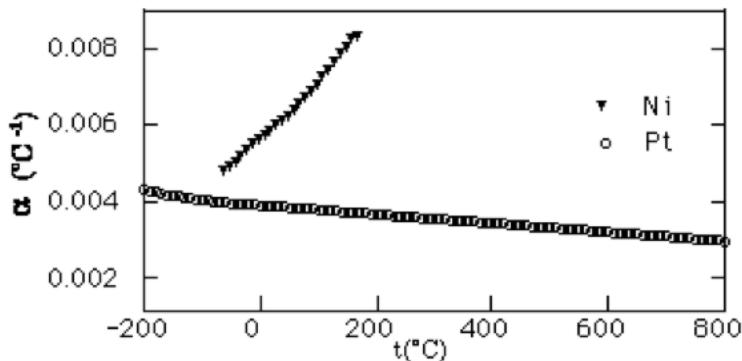
2) *a diodo*

3) *termocoppie.*

1) Termometri a resistenza metallica (*nichel o platino*)

La resistività di un metallo, per temperature non troppo basse, segue un andamento quasi lineare: $\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha T)$, dove $\alpha(T) = (1/\rho)d\rho/dt$ è il coefficiente di temperatura, dell'ordine di qualche permille per grado.

Una interpolazione polinomiale $\rho(T) = \rho_0(1 + a_1T + a_2T^2 + \dots)$, può quindi essere troncata al termine del primo ordine. In questa approssimazione il coefficiente a_1 si identifica con il coefficiente di temperatura .



Il segnale prodotto è proporzionale alla tensione V_p di polarizzazione, ma anche la potenza erogata al termometro è proporzionale a V_p^2 , (*autoriscaldamento*).

I sensori metallici hanno *piccola massa (risposta pronta)* e discreta linearità su un ampio intervallo di temperatura. Intervallo utile: per gli elementi di platino si va da 10 K a 800 K (α quasi costante, debolmente decrescente con T), per il nichel da -60°C a $+300^\circ\text{C}$ (α crescente con T).

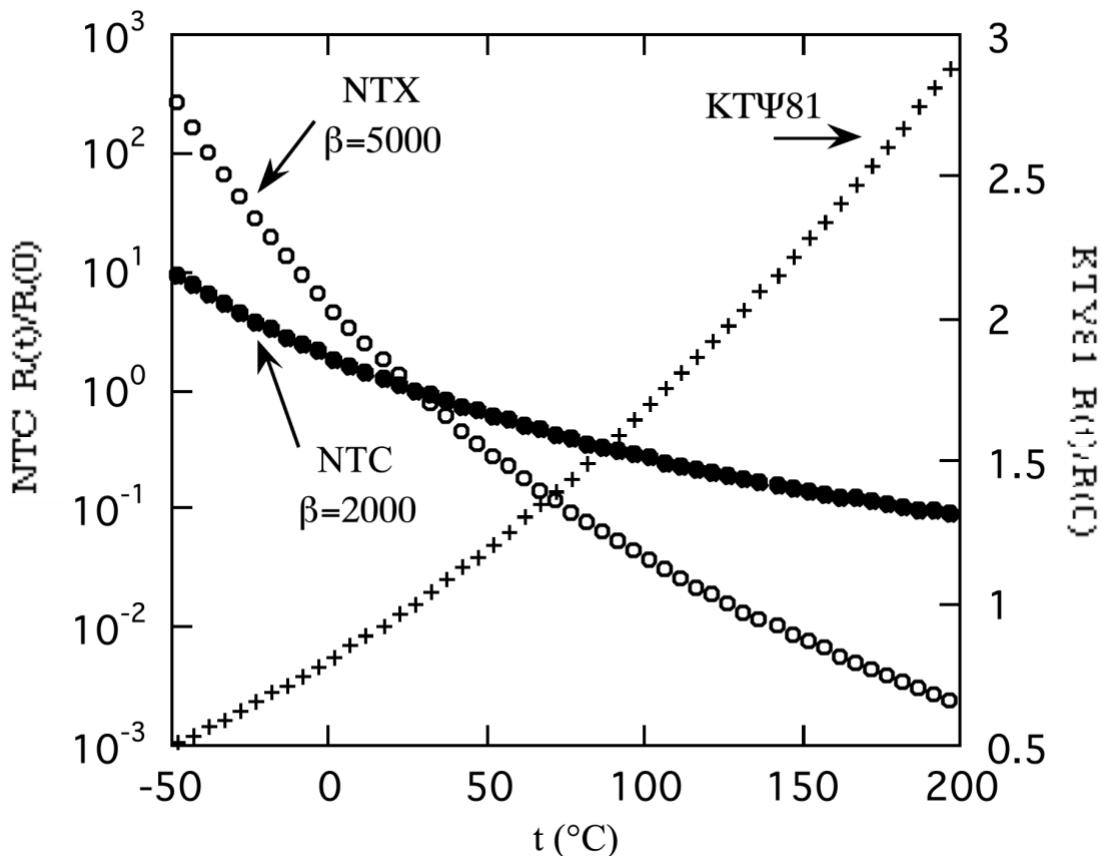
I termometri a sensore di platino hanno rimpiazzato i termometri a mercurio ovunque si richieda una misura accurata di temperatura

Thermistor NTC e PTC

Gli RTD a *semiconduttore* possono essere a coefficiente di temperatura negativo (NTC) positivo (PTC)

I *termistori* NTC hanno una resistenza che dipende circa esponenzialmente dalla temperatura assoluta $R(T)=R_0\exp(\beta/T)$, ed esibiscono quindi una notevole *non-linearietà*, con una sensibilità che varia inversamente con il quadrato della temperatura assoluta T ($\alpha = \partial R/R\partial T = -\beta/T^2$). Inoltre sono soggetti a deriva temporale che è dell'ordine di 10^{-3} /anno. I termistori offrono valori ohmici a in un intervallo vastissimo e possono avere dimensioni ridottissime(*risposta molto rapida*) .

I termistori PTC hanno un *coefficiente termico costante* in un limitato intervallo di temperature, con discreta sensibilità (dell'ordine di 10^{-2} K^{-1})..



Con gli NTC si possono usare vari circuiti per ridurre la non-linearietà (es. una resistenza in parallelo al sensore e una in serie) oppure si può procedere, mediante l'uso di un microprocessore, alla linearizzazione digitale mediante interpolazione della curva di calibrazione.

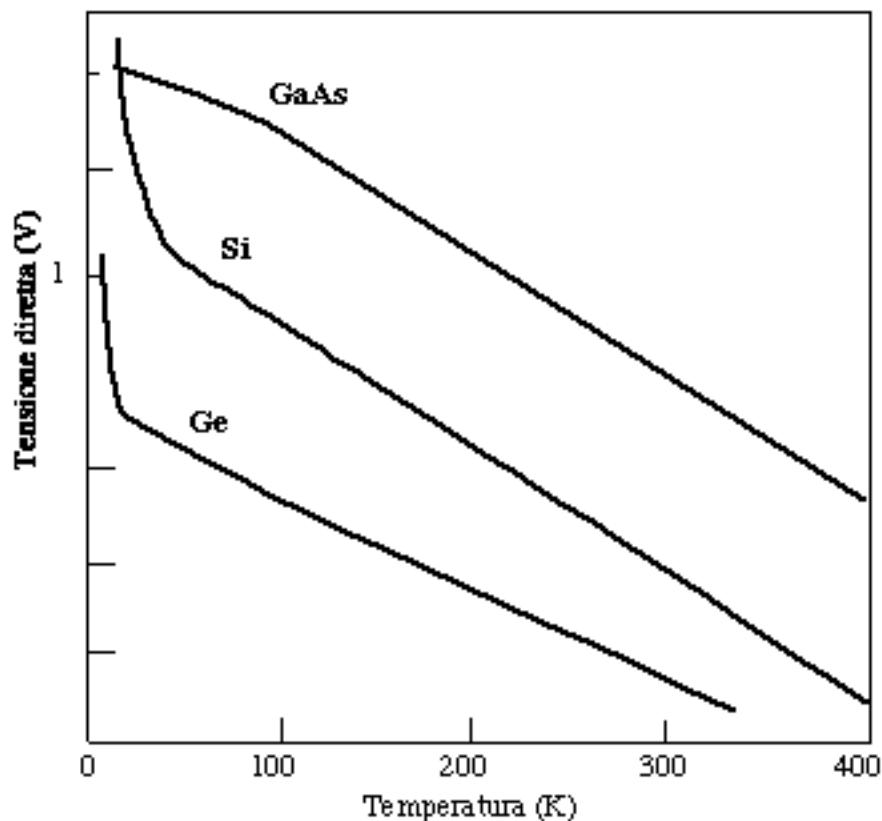
Il termistore è l'elemento che è incluso nel sensore di temperatura fornito con CBL.

Termometro a diodo

Il termometro a diodo sfrutta il fatto che la dipendenza dalla temperatura della tensione diretta V_f di una giunzione p-n polarizzata con corrente I_f costante è *quasi lineare* per temperature $T > 30\text{ K}$ (≈ -240 centigradi).

$$V_f = V_o - \gamma(I_f)T.$$

ove la pendenza $\gamma(I_f)$ dipende solo debolmente (logaritmicamente) dalla corrente di polarizzazione.



Vantaggi : *buona linearità e discreta sensibilità (2 mV/K)*

Esistono anche circuiti integrati che comprendono già, insieme al diodo usato come sensore di temperatura, il circuito di condizionamento del segnale.

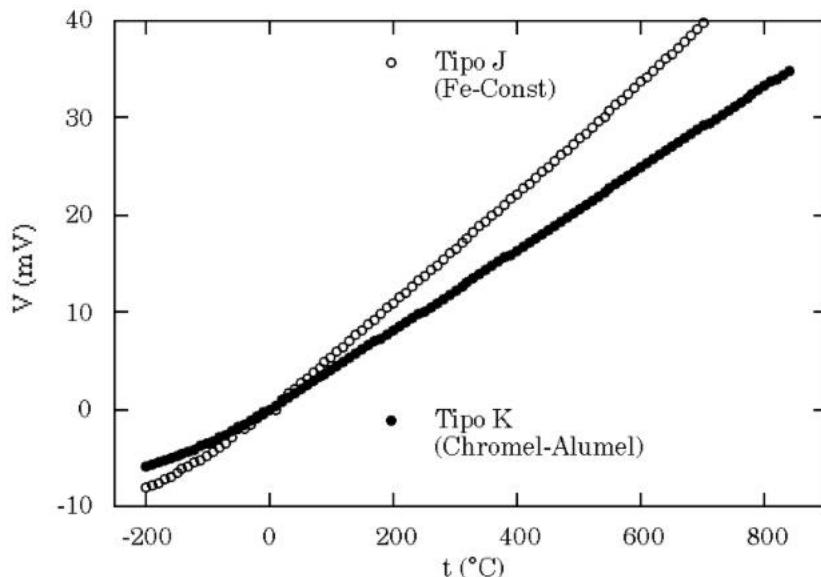
Un sensore a diodo integrato è contenuto nei termometri Vernier: (National LM34 termometro standard o Analog Device 590 per risposta veloce).

La termocoppia

La termocoppia sfrutta la dipendenza dalla temperatura della forza elettromotrice ai capi di una giunzione tra metalli diversi (effetto Seebeck). Questa forza elettromotrice è funzione crescente di T, ed è quasi lineare in prossimità della temperatura ambiente.

Vantaggi : *prontezza* (piccola massa) facilità di accoppiamento termico (con fili sottili e lunghi) *esteso intervallo di lavoro* (70 - 1000 K) *basso costo, non richiede polarizzazione*

I tipi più usati sono **J** (Ferro+, Costantana-) e **K** (Cromel+, Alumel-).



EFM di termocouple J e K in funzione della temperatura

In sostituzione del tradizionale bagno di ghiaccio in cui immergere la giunzione di riferimento si può usare un sistema elettronico di compensazione, ad esempio usando un integrato a diodo. Esistono circuiti integrati che funzionano da convertitori di segnale di termocoppia con inclusa la compensazione (ma non la linearizzazione) la cui uscita è *circa* proporzionale alla temperatura ($dV_{out}/dT=10\mu V/^{\circ}C$) .

SENSORI DI FORZA E DI PRESSIONE

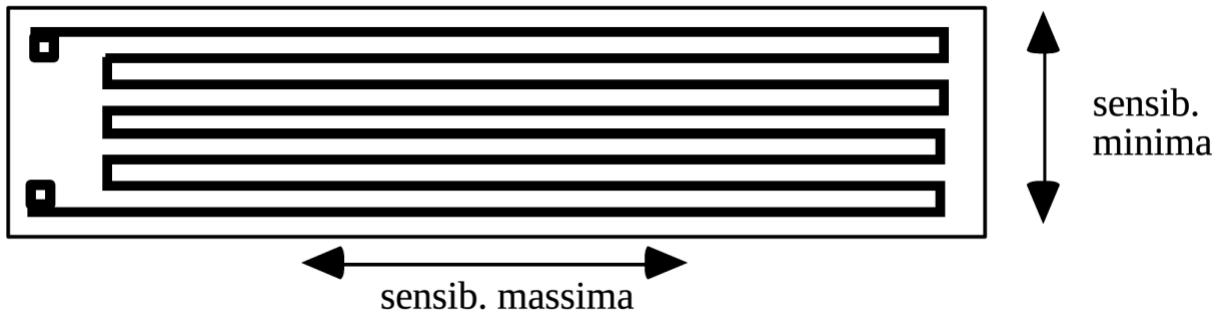
I sensori di forza misurano essenzialmente la *deformazione* di un supporto elastico soggetto alla forza: la costante elastica del supporto (k che lega forza F e spostamento s , mediante la legge di Hooke $F = k s$) stabilisce la sensibilità e la portata del sensore.

Il sensore può essere un *cristallo piezoelettrico* che sviluppa un campo elettrico proporzionale alla deformazione, o una piastrina di semiconduttore su cui è ricavato un *ponte resistivo*, o l'*armatura flessibile di un condensatore*, o più in generale un qualunque dispositivo elastico connesso ad un qualsiasi rivelatore di spostamento, anche di tipo ottico o magnetico .

Quando la forza misurata è quella prodotta dalle collisioni delle molecole di un gas contro il supporto sensibile, si ha un misuratore di *pressione*.

Sensore di forza a Strain-Gauge

L'estensimetro (o strain gauge) è costituito da una **resistenza a film sottile** inglobata in una striscia di materiale plastico isolante che va incollata alla superficie del campione di cui si vuol misurare la deformazione. La geometria della pista del film resistivo conferisce all'estensimetro proprietà vettoriali



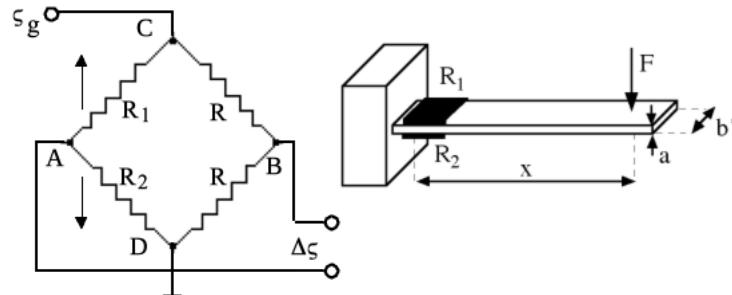
Tipica configurazione della pista di un estensimetro a film

Tipicamente un sensore di forza è costituito da due estensimetri uguali (per ridurre derive termiche) incollati ad una lamina metallica, come in figura.

La forza da misurare viene applicata all'estremo libero della lamina che, flettendosi, provoca l'*allungamento relativo* $\varepsilon = \Delta L/L$ di uno dei due films resistivi e l'*accorciamento relativo* $-\varepsilon$ dell'altro. Il valore di ε può essere espresso come $\varepsilon = 6 Fx/(Ea^2 b)$, ove E è il modulo di Young della lamina.

Detto $G = (\Delta R/R)/\varepsilon$ il fattore di gauge (che vale circa 2), la sensibilità risulta $\sigma = (\Delta R/R)/F = 12x/(Ea^2 b)$.

Le resistenze ($R_1 \approx R_2$) sono connesse a ponte, insieme a due resistenze fisse R : così l'uscita del ponte diventa: $\Delta V/V_g = (1/2)\Delta R/R = (1/2)\sigma F$.



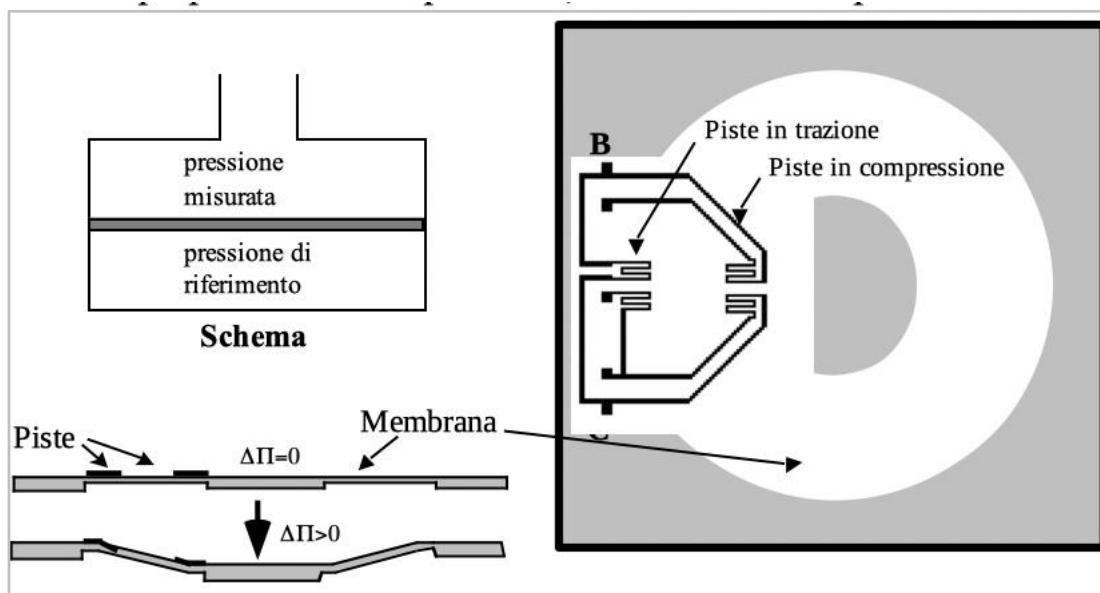
Ponte di Wheatstone e schema del sensore di forza

Questo è il tipo di sensore utilizzato in molte bilance commerciali e nei sensori di forza Vernier (ponte con $R_1 \approx R_2 \approx 120 \Omega$)

Manometro a ponte piezoresistivo

E' una sottile membrana di silicio su cui sono ricavate le piste di quattro estensimetri connessi a ponte.

La deformazione della membrana, per lo sforzo applicato su una faccia dalla pressione del gas, modifica il valore delle quattro resistenze e sbilancia il ponte, fornendo in uscita una tensione differenziale proporzionale alla pressione, e alla tensione di polarizzazione (il sistema a ponte garantisce stabilità termica al sensore).



Questo è il tipo di sensore contenuto nei dispositivi che trovate in farmacia per la misura della pressione arteriosa, o nell'altimetro utilizzato da chi vola in deltaplano, e nei manometri / barometri Vernier (SenSym SCX100/15).

SENSORI DI LUCE

Con il termine luce si intende comunemente la radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda tra $\lambda = 0.4 \mu\text{m}$ e $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$. Questa è la radiazione cui è sensibile l'occhio umano.

I due tipi principali di conversione di luce in segnale elettrico sono per trasformazione dell'energia assorbita in *fononi* (eccitazioni del reticolo, cioè energia termica), e per effetto *fotoelettrico interno* (creazione di coppie elettrone-lacuna nei semiconduttori).

Si possono quindi distinguere due grandi categorie di sensori optoelettronici:

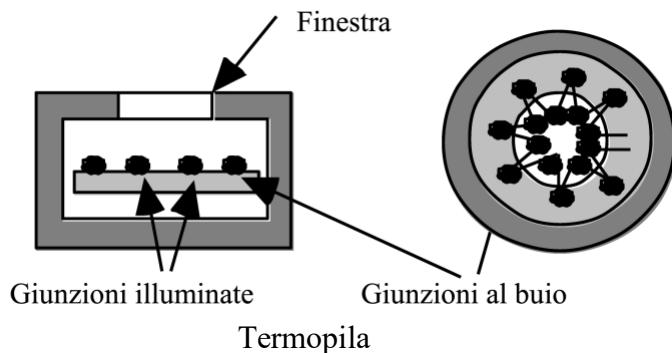
I sensori *termici* (termopile, cristalli piroelettrici): hanno risposta piatta in funzione della frequenza della luce incidente, cioè sensibilità costante dall'infrarosso all'ultravioletto. Tuttavia, dato che si comportano cioè come filtri passa-alto (con frequenza di taglio tra 1 Hz e 100 Hz), devono operare in luce intermittente. Il segnale sfruttato è sostanzialmente un gradiente termico prodotto dal riscaldamento preferenziale di una porzione del sensore rispetto ad un'altra porzione.

I sensori a *semiconduttore* (fotoresistenze, fotodiodi, fototransistor): non tutta la luce può produrre effetto fotoelettrico, ma solo quella di lunghezza d'onda λ inferiore ad una certa soglia λ_s . La lunghezza d'onda di soglia λ_s è quella per cui $hc/\lambda = hv = E_g$, ove E_g è il salto energetico che l'elettrone deve fare per passare dalla banda di conduzione alla banda di valenza, h è la costante di Plank, v è la frequenza della luce e c la velocità della luce. In altri termini i fotoni di energia maggiore o uguale ad E_g vengono assorbiti producendo coppie di portatori di carica: elettrone-lacuna.

Sensori di luce termici (bolometri)

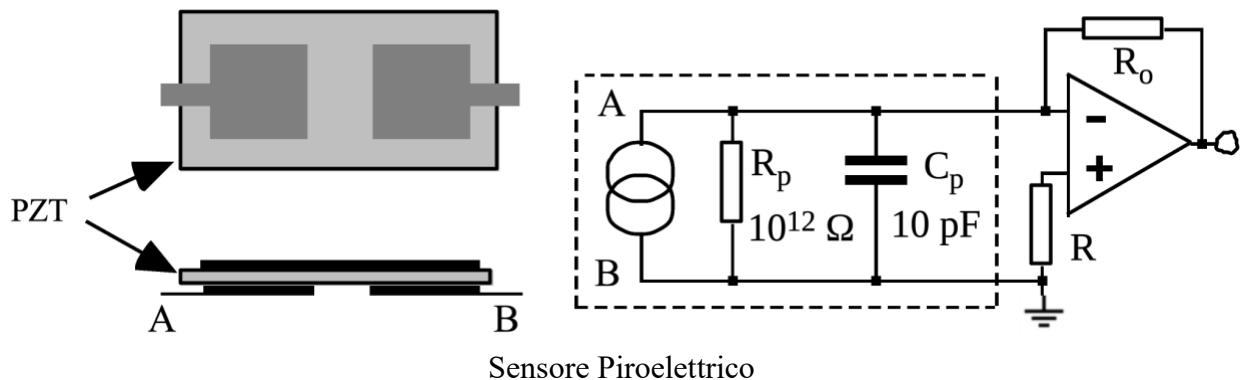
Termopila

La *termopila* è una versione miniaturizzata di termocoppia, costituita di numerose coppie di giunzioni in serie, con le giunzioni di riferimento mantenute al buio e le giunzioni di misura esposte alla luce. I modelli commerciali hanno le dimensioni di ingombro di un normale transistor e un'area sensibile dell'ordine del mm^2 .



Sensore piroelettrico

I materiali *piroelettrici* se sono sottoposti ad una variazione di temperatura, modificano la propria polarizzazione interna. Tale variazione di polarizzazione è rilevabile esternamente come differenza di potenziale tra due armature metalliche a contatto con superfici opposte. Se una delle due armature è sottoposta ad illuminazione intermittente, tra le due armature si preleva un segnale proporzionale all'intensità della luce assorbita.



Sensore Piroelettrico

I bolometri possono essere usati come sensori dell'emissione di “corpo nero” (cfr. i pirometri ora in vendita nelle farmacie per misurare la temperatura dell'interno dell'orecchio) o come sensori di luce a risposta piatta.

Sensori di luce a semiconduttore Le fotoresistenze

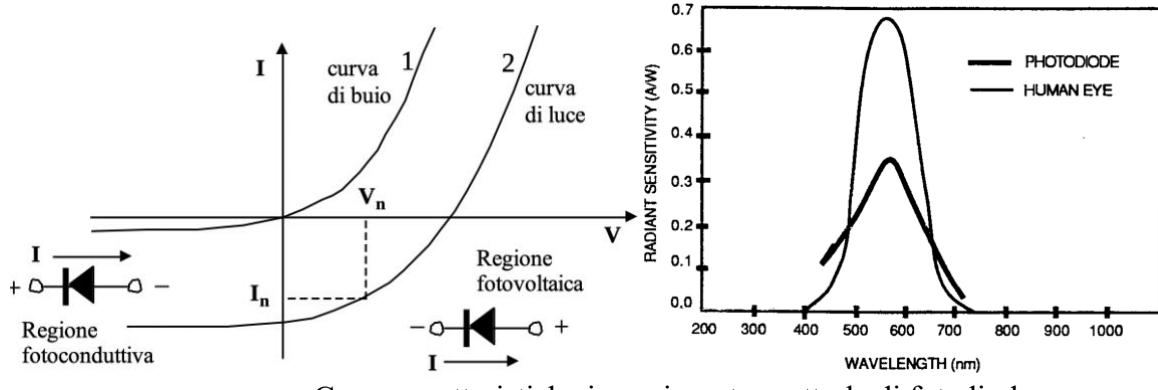
Le fotoresistenze sono costituite da un materiale *semiconduttore* (di solito PbS, CdS, CdSe). Il numero di portatori di carica, e quindi la conducibilità, aumenta in proporzione all'intensità della luce incidente, e la resistenza cala.

La risposta in funzione della lunghezza d'onda, detta anche *sensibilità spettrale* del sensore, ha generalmente un picco per valori un po' inferiori a λ_s .

Dato il basso costo e la lentezza di risposta, si usano principalmente come rivelatori di soglia luminosa (interruttori crepuscolari).

Celle fotovoltaiche , fotodiodi

La *cella fotovoltaica* o *fotodiodo* è una giunzione PN, in cui il semiconduttore drogato P ha uno spessore sottile, così da permettere alla luce di penetrare nello strato di svuotamento: qui le coppie create per effetto fotoelettrico generano in un circuito esterno una *corrente fotovoltaica*.



Curve caratteristiche i-v e risposta spettrale di fotodiodo

Nella regione “fotoconduttiva” la polarizzazione è inversa e il funzionamento è quello normalmente detto di *fotodiodo*.

I sensori che nelle macchine fotografiche controllano i tempi di esposizione, sono di questo tipo.

Il sensore di luce Texas-Vernier è un fototransistor al silicio (Hamamatsu S1133), la cui sensibilità spettrale non è piatta: assomiglia a quella dell’occhio umano.

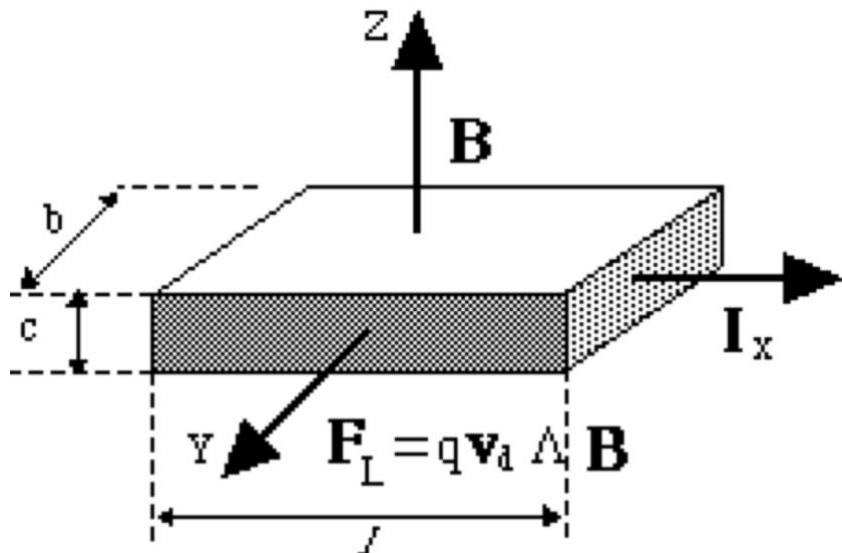
SENSORI DI CAMPO MAGNETICO

I misuratori di campo magnetico tradizionali si basano sull'induzione: una bobina viene mossa (ruotata o fatta vibrare) in modo che il flusso Φ del campo magnetico B attraverso la bobina venga modulato, e la tensione indotta, proporzionale a $\partial\Phi/\partial t$ e quindi anche a B , viene rettificata e resa disponibile come segnale in uscita. Questo tipo di sonde presenta molti limiti: ingombro, basso rapporto segnale/rumore, complessità d'uso...

Sensori molto più semplici e compatti sono i *magnetoresistori*: che sono costituiti da materiale la cui resistività dipende fortemente dall'intensità del campo magnetico. La sensibilità delle magnetoresistenze è definita dal rapporto tra il valore ohmico in presenza di campo (R_B) e valore ohmico in assenza di campo (R_0): tipicamente si ha $\sigma_B = R_B/R_0 \approx 10$ (con $B=1$ Tesla); σ_B ha un coefficiente di temperatura negativo (qualche % per grado) e si tratta di sensori poco lineari.

Sensori ad effetto Hall

I sensori più versatili, con grande sensibilità e capacità di determinare anche la direzione del campo magnetico, sono quelli che sfruttano l'effetto Hall in un cristallo semiconduttore.



Geometria dell'effetto Hall

L'effetto Hall è schematicamente il seguente: in un semiconduttore di forma parallelepipedo, in un campo magnetico uniforme B diretto secondo l'asse z , si fa passare una corrente elettrica di intensità I_x secondo l'asse x . Gli elettroni acquistano una velocità di deriva $v_d = \mu E_x$ nel campo elettrico E_x , e sono quindi soggetti alla forza di Lorentz $F_L = q v_d B$, che agisce nel verso delle y negative. Essi quindi quindi tendono ad accumularsi sulla faccia del semiconduttore perpendicolare all'asse y .

Questo accumulo di cariche porta alla formazione di una differenza di potenziale V_H fra le due facce del campione perpendicolari all'asse y , (e quindi di un campo elettrico E_H tale che la forza elettrica qE_H sia uguale ed opposta alla forza di Lorentz, cioè $E_H = \mu E_x B$). Ricordando le definizioni di campo elettrico, di resistività ρ e la legge di Ohm, si ottengono le relazioni

$V_H = E_H/b$, $E_x = V_x/l = RI_x/l$, $R = \rho(l/bc)$, che forniscono $V_H = \mu(\rho/c)I_xB$. Si vede quindi che la tensione di Hall è proporzionale al campo magnetico, e alla densità di corrente, tramite un coefficiente che include la mobilità dei portatori di carica μ , la resistività ρ e lo spessore del campione c .

Per campioni molto sottili, e con elevata resistività (sempiconduttori: InAs, InSb, GaAs) si possono ottenere grandi valori di sensibilità $\sigma = \partial V_H / \partial B$. È importante polarizzare il sensore a *corrente costante* (con correnti dell'ordine di qualche mA) ma anche *stabilizzarne accuratamente la temperatura* perché in generale μ , ma soprattutto ρ , dipendono da T e quindi questi sensori sono soggetti a notevole deriva termica ($\approx -0.1\%/\text{°C}$). Inoltre, se la polarizzazione è riferita a massa, la tensione V_H va misurata tramite un amplificatore differenziale.

La linearità è discreta per bassi valori del campo ($\approx 0.2\%$ per $B < 0.5\text{ T}$) e la sensibilità è dell'ordine di 0.1 V/T .

Esistono in commercio anche sensori lineari completi di stabilizzatore della corrente di polarizzazione e di amplificatore della tensione di Hall già integrati nel chip con sensibilità dell'ordine di 10 V/T .

Il sensore di campo magnetico Vernier contiene un microchip della Honeywell-Microswitch (SS94A1) e ha un campo utile di circa 100 Gauss (10mT).

SENSORI DI POSIZIONE

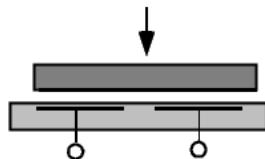
I dispositivi che possono essere usati per misurare la posizione di un oggetto sono molteplici.

Si può sfruttare ad esempio una *modulazione*:

- della *capacità* tra due armature di un condensatore (sensori capacitivi)
 - della mutua *induttanza* tra due avvolgimenti (sensori indutti)
 - del *fattore di partizione* di un potenziometro (sensori resistivi)
 - della *tensione di Hall* in un sensore accoppiato ad un magnete permanente se l'oggetto è ferromagnetico (sensori magnetici)
 - della *luce intercettata* da un reticolo in rotazione o traslazione (sensori ottici)
- o infine il *ritardo* tra impulso emesso ed impulso riflesso in un sensore acustico usato come *sonar*.

Sensori di posizione capacitivi

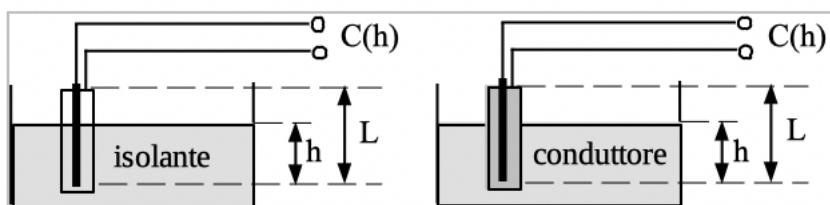
Nei sensori capacitivi la modulazione di capacità può essere indotta dal movimento di una delle armature rispetto all'altra che resta fissa, oppure l'accoppiamento capacitivo tra due armature fisse può essere variato tramite una terza armatura mobile (spesso costituita proprio dall'oggetto di interesse).



Schema di sensore capacitivo con due elettrodi adiacenti

Un sensore di questo tipo è la tavoletta “trackPad” che sostituisce il “mouse” nei PC portatili.

Un sensore capacitivo può essere usato anche per misurare il livello di un liquido isolante. Due elettrodi, tra loro affacciati, vengono immersi nel liquido in modo che, quando il livello della superficie libera si sposta, la diversa costante elettrica del fluido $\epsilon_r \epsilon_0$ e del suo vapore (o dell'aria) ($\approx \epsilon_0$), provoca una variazione di capacità.



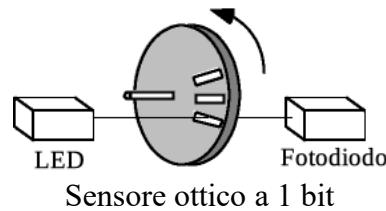
Misuratori di livello capacitivi

Di questo tipo sono spesso i sensori che nella vostra automobile vi avvertono che è ora di “fare il pieno”

Sensori di posizione ottici

I sensori ottici di rotazione (*encoder*) traducono la rotazione di un disco graduato in segnale digitale.

Mediante suddivisioni in settori otticamente diversi si può codificare la posizione angolare del disco rispetto ad una origine arbitraria. La risoluzione è determinata dal tipo di codifica e dalla finezza della suddivisione in settori, oltre che dal tipo di sorgente di luce (LED, diodo laser...) e dal tipo di rivelatore (fotodiode, fototransistor...) usati.



Un sensore con codifica a canale singolo è la “Smart Pulley” PASCO, che non può riconoscere il verso della rotazione .

Per poter discriminare tra verso orario e antiorario serve una codificazione a 2 canali:



Encoder ottico a 2 bit

Una delle applicazioni più comuni di encoder ottici a 2 canali è il dispositivo di ingresso nei moderni PC detto “mouse”.

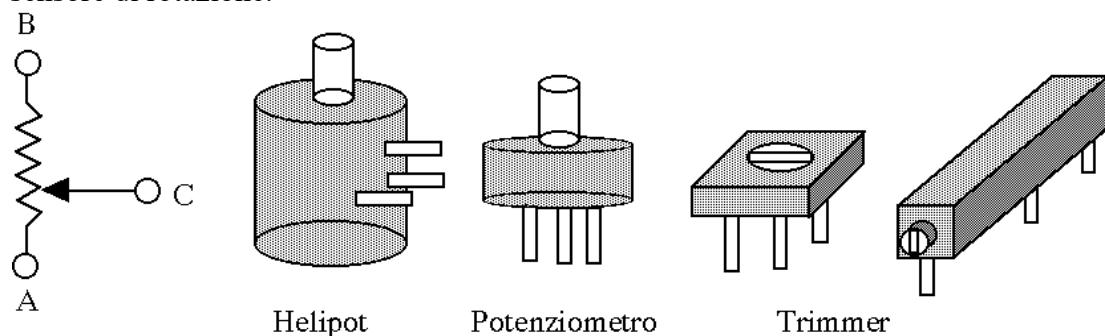
Nel “mouse” (ma anche nell’equivalente “track-ball” che sostituisce il mouse in molti PC portatili) due encoder registrano la rotazione di due dischi tra loro ortogonali che sono mossi da una sfera (trascinata su una superficie piana nel primo, e mossa direttamente nel secondo): le due coordinate fornite al computer dai due encoder guidano il movimento di un puntatore sul monitor.

Anche il sensore di rotazione Vernier/PASCO è un encoder a 2 canali.

Sensori di posizione a potenziometro (resistivi)

I potenziometri sono dispositivi a tre terminali, in cui la resistenza è costante tra due terminali ma variabile tra il terzo terminale e gli altri due. Sono costituiti da una resistenza elettrica con tre contatti: due agli estremi (A e B) e uno "strisciante" (C) che può muoversi da un estremo all'altro. Esistono potenziometri **lineari**¹ (come ad esempio i vecchi reostati di potenza costituiti da un filo conduttore avvolto a spirale su un corpo isolante a forma grossolanamente parallelepipedo e con due contatti agli estremi del filo e il terzo su una spazzola che striscia sull'avvolgimento) e potenziometri a **rotazione**, ove la resistenza può essere una pista conduttriva esplorata da un contatto radiale strisciante o ancora un filo conduttore avvolto con il contatto mobile pilotato da un asse rotante.

Alcuni potenziometri sono miniaturizzati (trimmer), adatti ad essere montati su circuiti stampati, e che vanno manovrati con un cacciavite, altri hanno il contatto mobile mosso da un asse (plastico o metallico, in genere con diametro 6 mm) su cui si può montare una manopola e sono indicati per comando manuale su pannelli. Questo secondo tipo si presta bene ad essere usato per ricavarne un sensore di rotazione.



Una seconda importante distinzione tra potenziometri è tra quelli a “**singolo giro**” e quelli a “**multi giri**”: questa seconda categoria, spesso indicata con il nome *Helipot* (potenziometro elicoidale) comprende modelli a 4, 10, 15, 20 o 25 giri, anche se i tipi a 10 giri sono in assoluto i più diffusi (ne esistono sia da pannello che miniaturizzati).

L’elemento resistivo che compone il potenziometro può essere una pista di miscela di carbone, di plastica conduttriva, ceramica metallizzata o un avvolgimento di filo metallico. I più economici sono quelli a carbone (da 5Ω a $1M\Omega$), che hanno però anche il più alto coefficiente di temperatura (TC). Seguono, con costo crescente, quelli in plastica e quelli a filo (da 10Ω a $500k\Omega$) che offrono anche eccellente linearità e basso TC (fino a 20 p.p.m./°C). Il coefficiente di temperatura non è un parametro importante nel caso si voglia usare il potenziometro come partitore di tensione (e questo è il nostro caso).

Caratteristica importante dei potenziometri, oltre al loro *valore ohmico* è la **linearità**.

Per gli Helipot l’errore di linearità standard è 0.25%, mentre per i normali potenziometri esso può raggiungere qualche %. In commercio si trovano anche potenziometri costruiti di proposito non-lineari: ad esempio potenziometri in cui la relazione tra lo spostamento del cursore (rotazione) e il valore della resistenza elettrica tra un estremo e il contatto mobile è *logaritmica*.

¹ Si noti che qui il termine potenziometro *lineare* contrapposto a potenziometro a rotazione non ha niente a che fare con la linearità di cui parleremo più avanti (relazione tra resistenza e posizione).

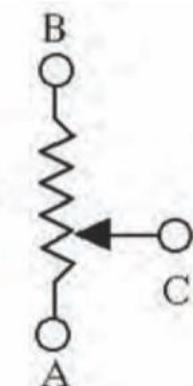
La maggior parte tuttavia è nominalmente lineare, cioè, la relazione tra la angolo di rotazione α e resistenza R è: $R_{AC}=k\alpha$.

Esistono infine potenziometri "senza fine", in cui $\alpha_0 \approx 340^\circ$, ma senza blocco, in cui il contatto strisciante passa dalla posizione A alla posizione B (con una crescita lineare della resistenza R_{AC}) e ruotando ancora tocca nuovamente A (con $R_{AC}=0$). Restano 20° in cui C resta sconnesso.

Una caratteristica dei potenziometri che non viene normalmente tenuta in grande considerazione in ambiente elettronico, è il *momento di attrito*.

Per ottenere da un potenziometro un segnale in tensione proporzionale all'angolo di rotazione dell'asse bisogna ovviamente polarizzare il potenziometro, cioè applicare la tensione massima desiderata ai suoi estremi, e poi misurare la tensione che appare al contatto strisciante.

Se desideriamo ad esempio un segnale utile tra 0 e 5 volt, terremo il terminale A a massa e applicheremo 5V al terminale B: la rotazione dell'asse sarà allora misurata dalla tensione prelevata al terminale C.



E' comodo utilizzare direttamente la tensione di 5V fornita dai canali della CBL

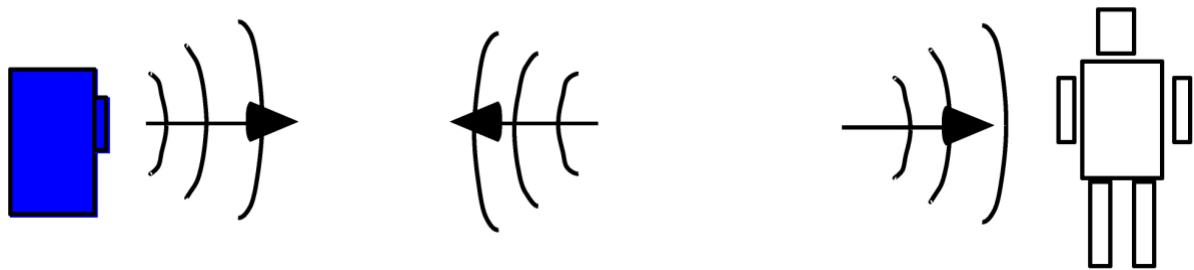
Naturalmente, se si monta il potenziometro in modo casuale, l'origine dell'asse "angolo" ($\alpha=0$) corrisponde ad un qualsiasi valore di tensione compreso tra 0 e 5 V. Se si vuole fissare l'origine del sistema di riferimento angolare si deve misurare il valore di tensione al terminale C in una data posizione dell'asse del potenziometro. Una scelta comoda per poter misurare sia angoli positivi che negativi è di assumere come "posizione di angolo zero" quella in cui la tensione in C è 2.5 V : in tal caso si ottiene una uguale escursione massima nei due versi (circa $\pm 100^{\circ}$ per potenziometri a singolo giro).

Analoghe considerazioni si possono fare per potenziometri lineari (ne esistono in commercio con corsa da 6 o da 10 millimetri).

Sensori di posizione acustici (sonar)

Per misurare la distanza di un oggetto da un fissato riferimento si può sfruttare la *riflessione di una onda sonora* da parte dell'oggetto e ricavare la distanza dalla misura del *tempo* impiegato dal segnale acustico a percorrere i due tratti di andata e ritorno.

Si tratta di un generatore/ricevitore di brevi treni di impulsi ultrasonori che misura l'intervallo di *tempo trascorso* tra l'emissione e la ricezione dell'impulso *riflesso* da un oggetto.



Nota la velocità del suono in aria alla temperatura ambiente, si può tradurre il tempo misurato in distanza percorsa dall'onda sonora: se c è la velocità del suono [$c=\sqrt{g RT/M}$ [ove T è la temperatura in Kelvin, γ il rapporto dei calori specifici a pressione e volume costante, R la costante dei gas e M la massa molecolare]], linearizzando: $c \approx (331 + 0.6t)$ m/s in aria, con t temperatura in Celsius.

Se T è il tempo di andata e ritorno del segnale, allora la distanza X dell'oggetto dal sonar si ricava dalla relazione $X=cT/2$.

Questo tipo di sensore è usato, ad esempio, nelle macchine fotografiche Polaroid per la messa a fuoco automatica, e nel Motion Detector Vernier (CBR).

Nel sensore Vernier la frequenza dell'onda sonora è dell'ordine di alcune decine di kHz e l'angolo di apertura del fascio è dell'ordine di 15° . Dato che è necessario un intervallo minimo tra l'istante in cui termina la trasmissione dell'impulso sonoro e quello in cui inizia la ricezione dell'eco, vi è un limite (40cm) per la distanza minima misurabile. Dato che l'intensità dell'impulso cala circa quadraticamente con la distanza esiste anche un limite massimo per le distanze misurabili (circa 10m).

Accelerometri

Una misura di accelerazione è per definizione una misura della variazione istantanea di velocità, e quindi, se derivata da misure di diverse posizioni di un oggetto nel tempo, richiederebbe tre distinte misure di posizioni in tre istanti molto vicini: dalle prime due per differenza si ricava la velocità iniziale, dalle ultime due la velocità finale, e per differenza tra queste la variazione di velocità. Dividendo per l'intervallo di tempo che separa i punti medi dei due intervalli tra le tre misure si ottiene la accelerazione.

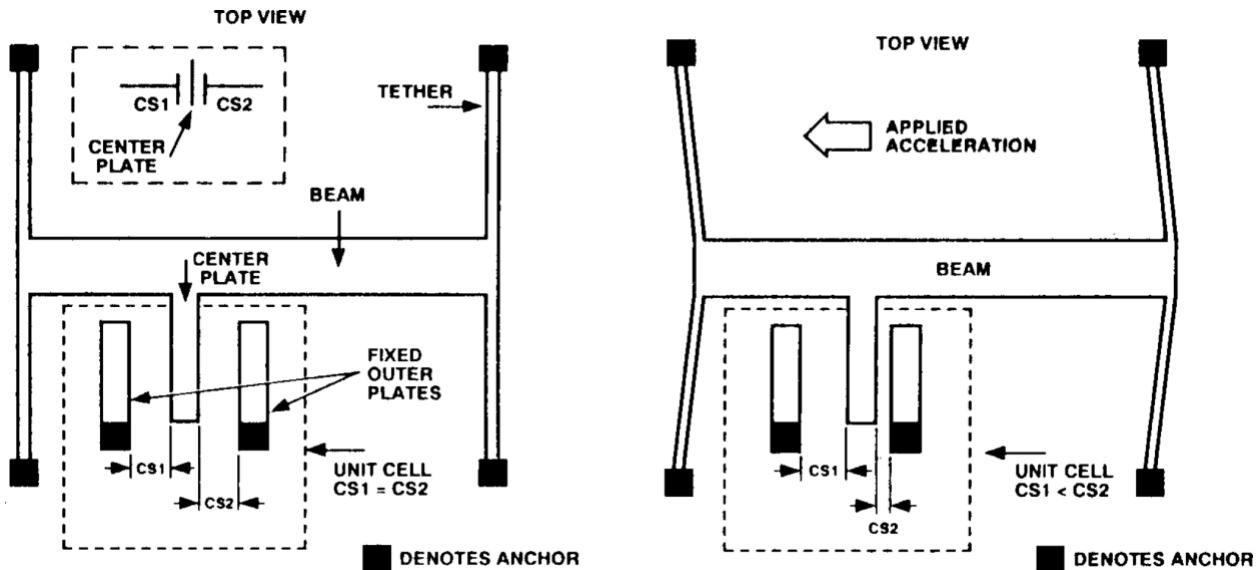
Questo è ciò che si fa quando di usa ad esempio un sonar per registrare il moto di un oggetto: la derivata seconda della funzione $X(t)$ che descrive la posizione nel tempo fornisce la accelerazione $a(t)$.

C'è tuttavia un altro modo per misurare indirettamente l'accelerazione, usando un sensore che misuri la forza esercitata su una massa, tenuta da un supporto flessibile quando il supporto (solidale all'oggetto di cui si vuole misurare l'accelerazione) viene accelerato.

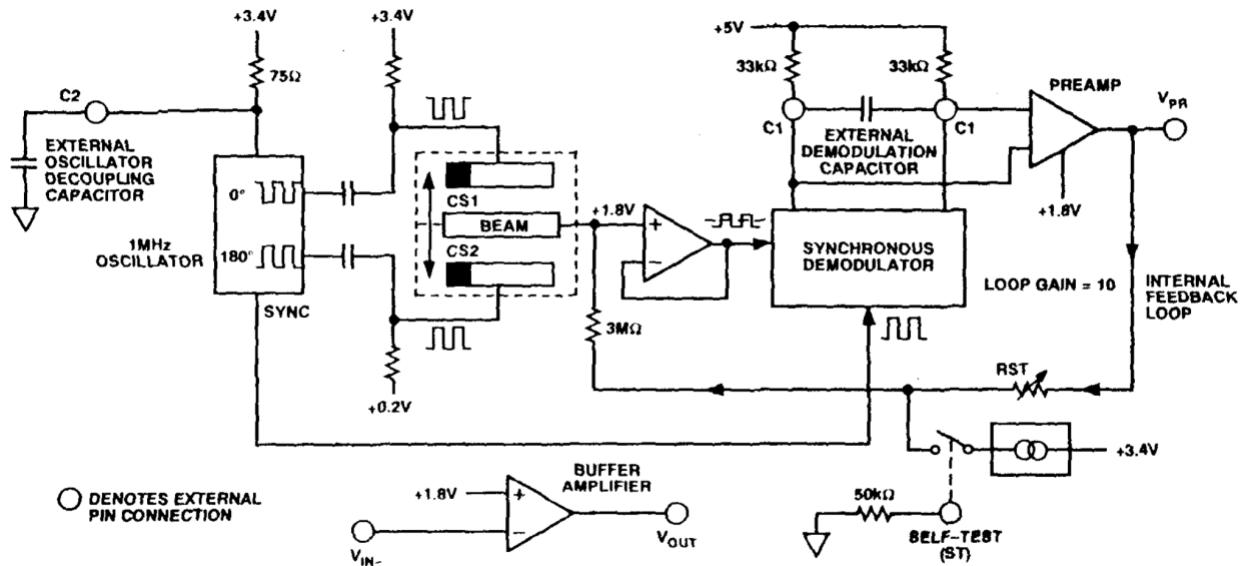
Per effetto della sua inerzia la massa flette il supporto con una forza proporzionale alla accelerazione impressa, e ciò trasforma il sensore di forza in un sensore di accelerazione.

Il sensore di forza può essere un estensimetro o una capacità variabile costituita da un elettrodo mobile posto tra due armature fisse: in questo secondo caso la misura di accelerazione si riduce ad una misura di variazione di capacità.

Su questo secondo metodo si basano gli accelerometri integrati in un chip prodotti dalla Analog Devices (ADXL05 e ADXL50) che si distinguono solo per il fondo scala (rispettivamente 5 g e 50g)



Accelerometro ADXL05 e ADXL50



Il principio di funzionamento del sensore è il seguente.

Un oscillatore pilota, in controfase alla frequenza di 1MHz, le due capacità in serie costituite dai tre elettodi che formano il sensore. Il segnale prelevato all'elettrodo centrale viene rivelato (demodulato) da un amplificatore a sensibilità di fase (lock-in o synchronous demodulator) che rimuove i segnali spuri e guida un amplificatore che insieme fornisce il segnale di uscita e forza elettrostaticamente l'elettrodo centrale nella posizione di bilanciamento delle capacità.

Questo sistema di rivelazione del segnale e di retroazione garantisce una buona immunità al rumore e una buona linearità, e consente di discriminare tra le componenti positive o negative della accelerazione rispetto all'asse del sensore.

Le due capacità sono ricavate mediante microlitografia da un chip di silicio ritagliando l'elettrodo centrale (l'elemento sensibile che si muove per effetto dell'accelerazione) come doppio pettine i cui denti si affacciano ai due pettini che costituiscono le altre due armature fisse. La direzione in cui l'accelerometro è sensibile è quindi l'asse di simmetria del pettine centrale, che è tenuto in posizione da 4 sottili leve alle estremità.

Con questo tipo di sensore funzionano gli “Air-Bag” nelle nostre automobili e gli accelerometri Vernier.