

Tutto quello che vorreste sapere sull'RTL

Domande e risposte su : come funziona
l'acquisizione, come funzionano i sensori,
... e tante altre cose

Giacomo Torzo
ICIS-CNR, AIF, ADT, INFN, Univ. Padova

(con l'aiuto di:)



T³ :
Teachers
Teaching with
Technology



RTL è un sistema di acquisizione ed elaborazione dati assistito da calcolatore: ma come funziona?

Dato che un **calcolatore** (sia esso un Personal Computer o una Calcolatrice Grafica tascabile) è sostanzialmente un dispositivo che registra, elabora, memorizza e gestisce in vari modi **dati numerici** (più esattamente dati binari), il sistema RTL dovrà contenere una parte che **trasforma** grandezze fisiche (o chimiche) in codici binari e le **trasferisce** al calcolatore.

Ma in pratica ?

In pratica questa parte del sistema è a sua volta divisa in due: una sezione è costituita dai **sensori**, e una seconda dall'**interfaccia**

Cos'è l'interfaccia ?

L'**interfaccia** (nel caso di **RTL portatile** si tratta di una **CBL** o un **LabPro**) è un dispositivo elettronico che provvede a **ricevere** segnali (digitali o analogici) dai sensori secondo le sequenze stabilite dal calcolatore e a **convertirli** in segnali digitali e a **trasferirli** al calcolatore (i dati delle misure).

E cosa sono i sensori ?

I **sensori** sono i dispositivi cui è affidato il compito di **convertire** un valore (o una variazione di) una **grandezza fisica** in un **segnale elettrico analogico** (o digitale).

Che tipo di segnali producono i sensori ?

I segnali elettrici prodotti dai sensori sono di solito segnali in **tensione** (differenze di potenziale elettrico riferite ad un

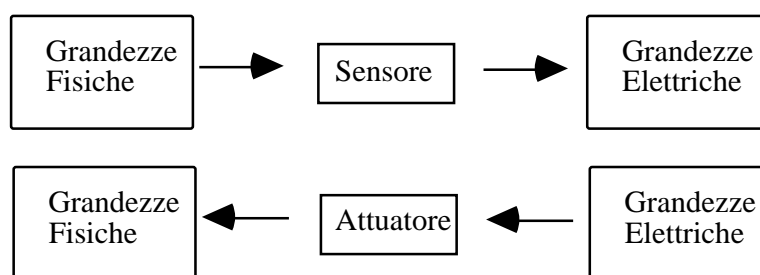
potenziale di massa); e possono essere **analogici** (ovvero tensioni *variabili in modo continuo*, ad esempio tra -10V e + 10V), o **digitali** (sequenze di *valori discreti* ad esempio 0V e 5V, disponibili in successione temporale su due cavi nel modo “seriale”, o in parallelo su più cavi nel modo “parallelo”)

Come fa un sensore a produrre questi segnali ?

Innanzitutto un sensore va **alimentato** (dato che di solito contiene un circuito di condizionamento e a volte anche di amplificazione), e nel caso di **RTL portatile** questa alimentazione è fornita **direttamente dall'interfaccia**, e quindi non serve nient'altro per farli funzionare.

Che differenza c'è tra un **sensore** e un **trasduttore** ?

Un **trasduttore** è un dispositivo che genera un segnale **elettrico** correlato con una grandezza fisica, o più in generale con una modificazione 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** ...

Come è fatta una interfaccia ?

Dato che la maggior parte dei sensori produce in uscita un segnale **analogico**, e che le calcolatrici grafiche TI sono di tipo **digitale**, per attuare una comunicazione fra trasduttori e calcolatrice è necessario che l'interfaccia disponga di un **convertitore A/D** (analogico-> digitale)

Poi serve una **unità di controllo (CPU)** che gestisce conversione e comunicazione .

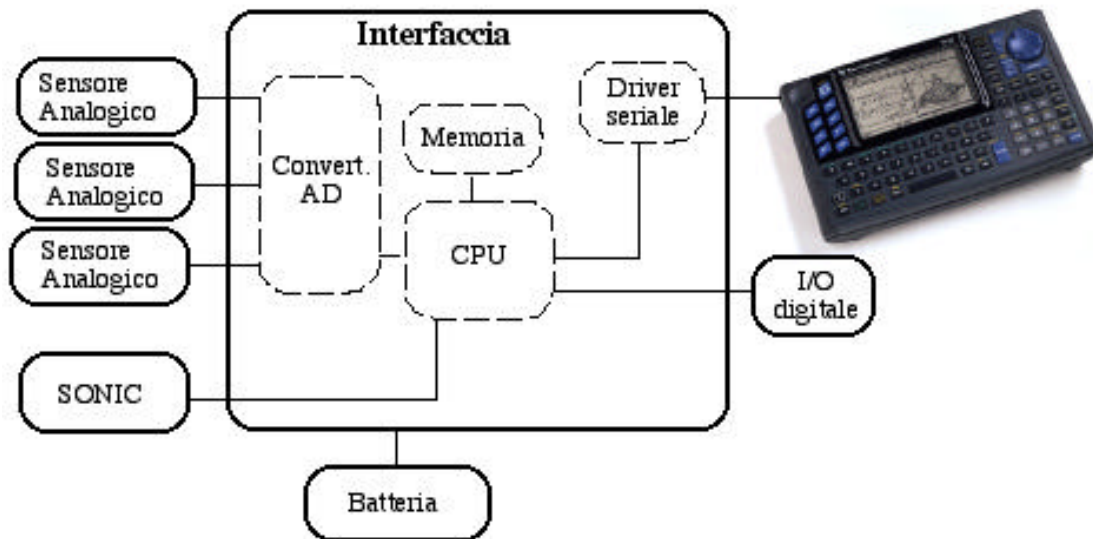
Poi serve una **memoria** per immagazzinare temporaneamente dati e sequenze di controllo.

Infine serve un blocco (**driver seriale**) che presiede alla **comunicazione** con il calcolatore.

Schema di interfaccia CBL (LabPro)

CBL utilizza tre (LabPro quattro) canali analogici , un canale (LabPro due) dedicato al SONAR, e canali digitali per ingresso e uscita.

La comunicazione avviene in modo seriale utilizzando un cavetto a 3 terminali che consente trasmissione bidirezionale (IN/OUT).



Sia CBL che LabPro possono essere pilotate da **calcolatrici grafiche Texas** o da un comune **PC** tramite un opportuno collegamento seriale (**GraphLink**).

Come si gestisce un sistema RTL ?

Un sistema RTL richiede un **software** installato nella CPU del calcolatore o nella calcolatrice grafica collegata all'interfaccia.

Nel caso si usi **RTL portatile** (con calcolatrici grafiche TI) il software può essere di vari tipi: esistono applicazioni adatte ad eseguire solo alcuni semplici esperimenti, oppure applicazioni di tipo generale adatte all'uso con una grande varietà di sensori.

Esempi di queste applicazioni di tipo generale sono CBLlogger, ChemBio, e **Physics**, sviluppati da Vernier (www.vernier.com).

Per **Physics** esiste anche una **versione in italiano**, recentemente sviluppata dalla associazione di insegnanti ADT in collaborazione con la ditta MAD, che offre maggiore facilità d'uso didattico e molte opzioni aggiuntive per la manipolazione ed analisi dati.

Con **Physics-italiano** tutta la acquisizione dati, la loro rappresentazione grafica e l'analisi può essere eseguita in configurazione portatile, che può essere comodamente tenuta in tasca, senza dover ricorrere a PC con Excel o altri prodotti simili per analisi numerico-grafica.

Un manuale di **Physics-italiano** è liberamente scaricabile dal sito:

<http://www.padova.infm.it/torzo/TORZO.html>

ed il software può essere chiesto a M.A.D. (www.edumad.com) o ad ADT (www.ADT.it).

SENSORI DI TEMPERATURA

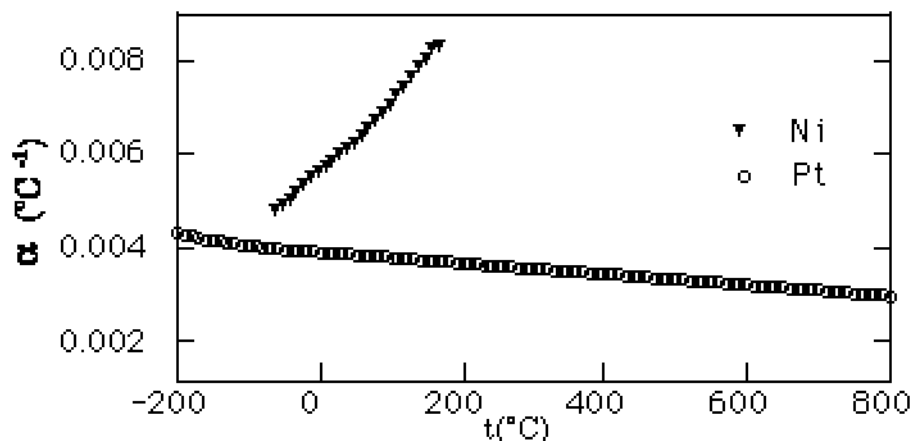
Possono essere:

- 1) *resistivi metallici (RDT)*
- 2) *resistivi a semiconduttore (Thermistors)*
- 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: $r(T) = r_0(1 + aT)$, dove $a(T) = (1/r)dr/dt$ è il coefficiente di temperatura, dell'ordine di qualche permille per grado.

Una interpolazione polinomiale $r(T) = r_0(1 + a_1T + a_2T^2 + \dots)$, 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 (a quasi costante, debolmente decrescente con T), per il Nichel da -60°C a $+300^\circ\text{C}$ (a crescente con T).

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

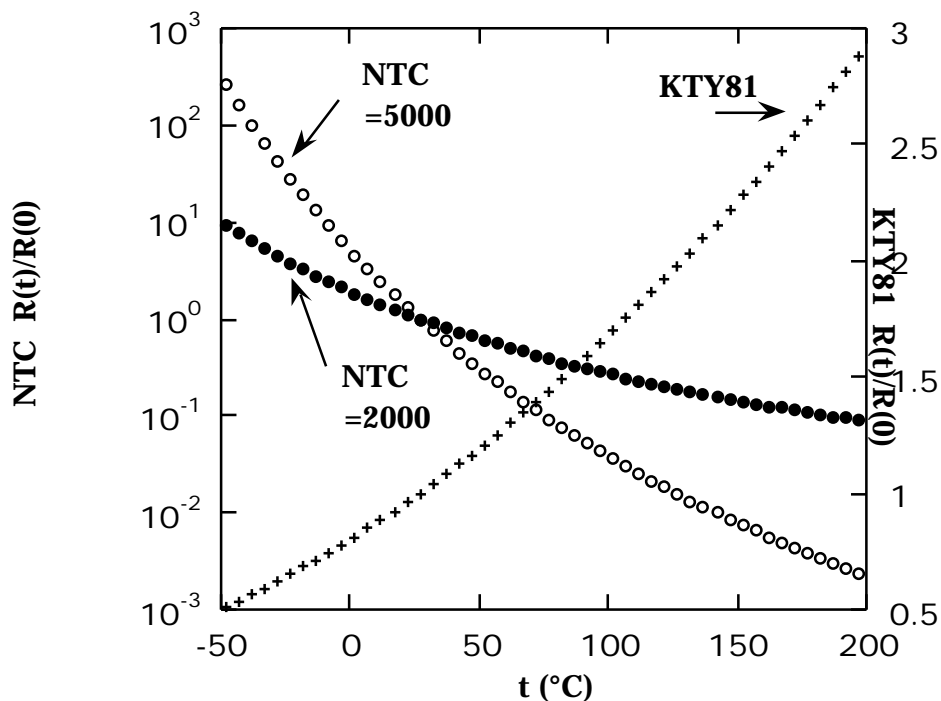
Thermistor NTC e PTC

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 $R(T)=R_0\exp(b/T)$, ed esibiscono quindi una notevole *non-linearità*, con una sensibilità che varia inversamente con il quadrato della temperatura assoluta T ($a = R/R T = -b/T^2$).

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 $10^{-2} K^{-1}$) .



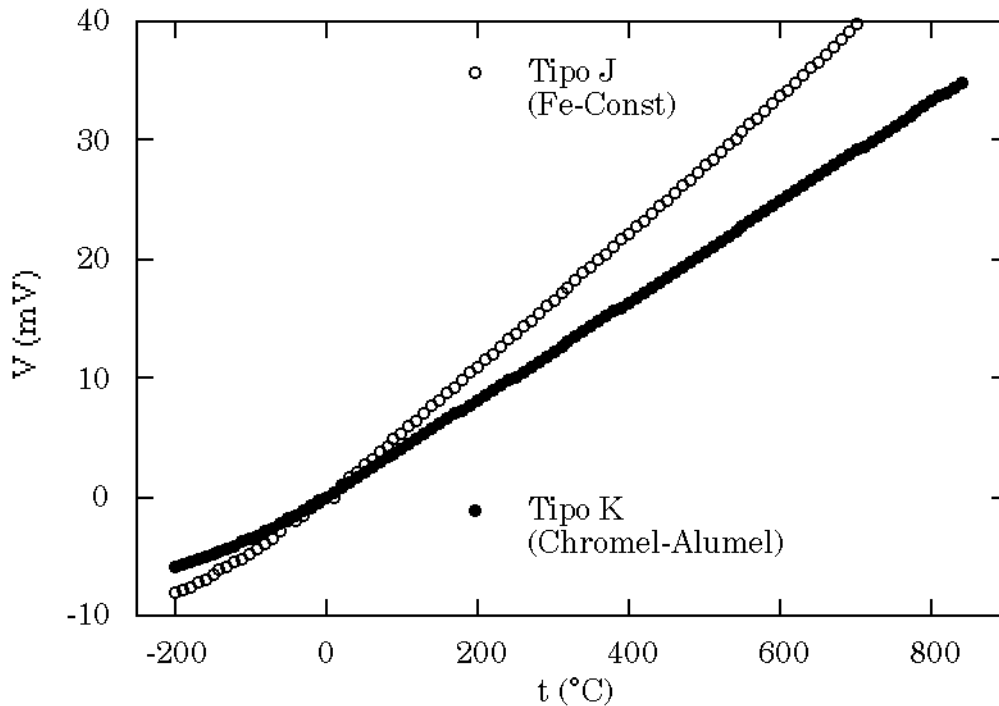
Con gli NTC si possono usare vari circuiti per ridurre la non-linearità (es. una resistenza in parallelo al sensore e una in serie) oppure si può procedere, mediante l'uso di un microprocessore, alla linearizzazione digitale mediante interpolazione della curva di calibrazione.

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

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 termocoppie 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 ($dV_{out}/dT=10\mu V/^{\circ}C$).

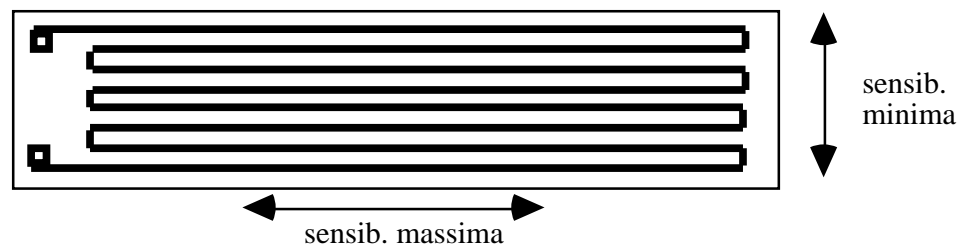
SENSORI DI FORZA E DI PRESSIONE

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 *crystallo 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

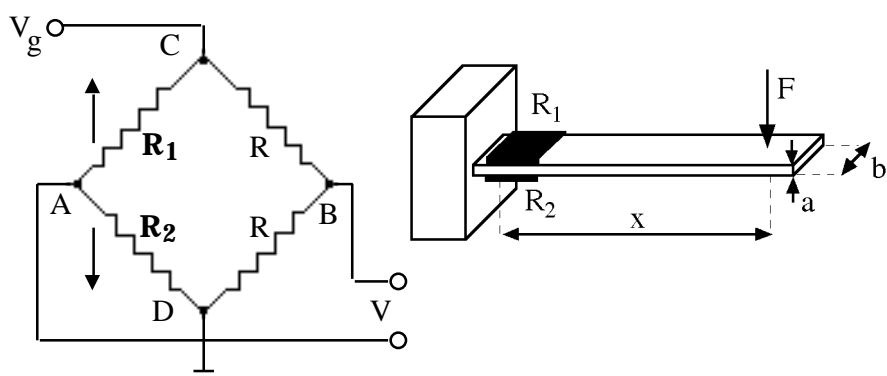
L'*estensimetro* (o *strain gauge*) è costituito da una *resistenza a film sottile* inglobata in una striscia di materiale plastico isolante che va incollata alla superficie del campione di cui si vuol misurare la deformazione. La geometria della pista del film resistivo conferisce all'estensimetro proprietà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



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* $e = \Delta L / L$ di uno dei due films resistivi e l'*accorciamento relativo* $-e$ dell'altro, con conseguente variazione della loro resistenza.

Le resistenze (R_1 R_2) sono *connesse a ponte*

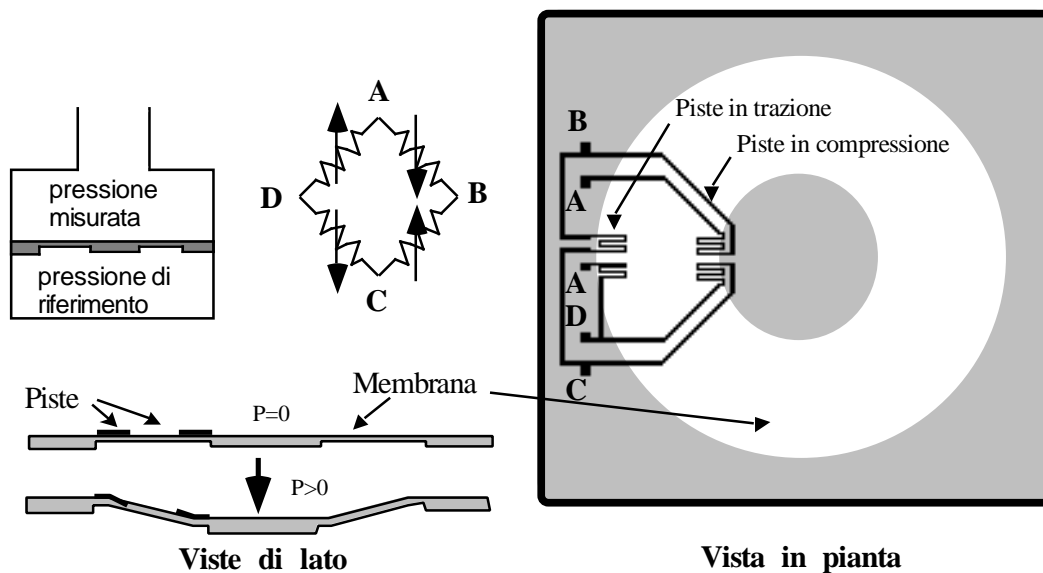


Questo è il tipo di sensore utilizzato in molte bilance commerciali e nei sensori di forza Vernier (ponte con $R_1 \approx R_2 \approx 120 \Omega$)

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.

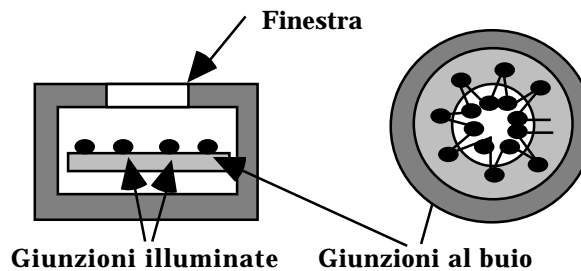
I sensori a **semiconduttore** (**fotoresistenze, fotodiodi, fototransistor**): non tutta la luce può produrre effetto fotoelettrico, ma solo quella di lunghezza d'onda λ inferiore ad una certa soglia λ_s .

La lunghezza d'onda di soglia λ_s è quella per cui $hc/\lambda_s = h\nu = E_g$, 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, ν 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)

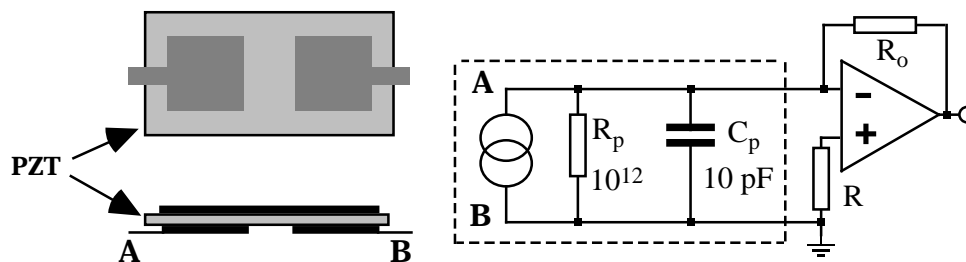
Termopila

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 *pireolettrici* 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.



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

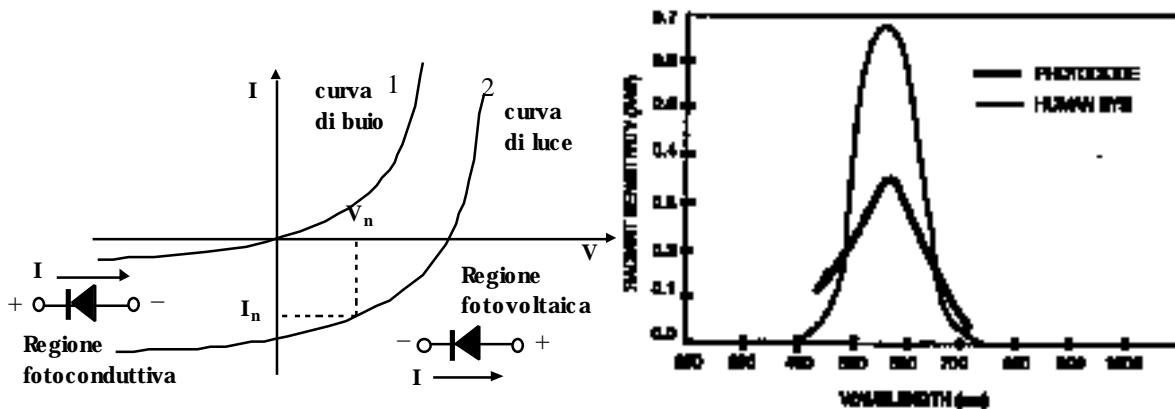
Le fotoresistenze sono costituite da un materiale *semiconduttore* (di solito PbS, CdS, CdSe). Il numero di portatori di carica, e quindi la conducibilità, aumenta in proporzione all'intensità della luce incidente, e la resistenza cala.

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* 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 fotodiolo

Nella regione "fotoconduttiva" la polarizzazione è inversa e il funzionamento è quello normalmente detto di *fotodiolo*.

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.

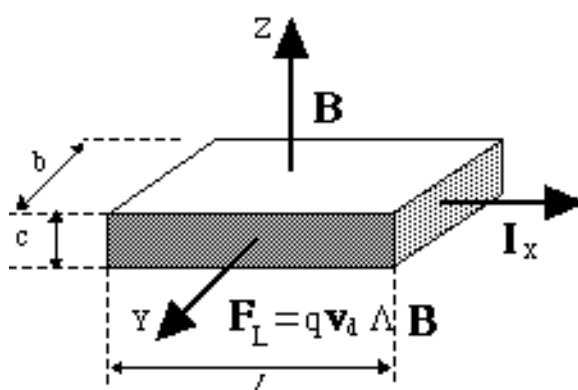
SENSORI DI CAMPO MAGNETICO

I misuratori di campo magnetico tradizionali si basano sull'induzione: una bobina viene mossa (ruotata o fatta vibrare) in modo che il flusso del campo magnetico B attraverso la bobina venga modulato, e la tensione indotta, proporzionale a F/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*, costituiti da materiale la cui resistività dipende fortemente dall'intensità del campo magnetico: 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.



L'effetto Hall in poche parole: in un campione di forma parallelepipedica, 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** $F_L = qv_d \wedge B$, che agisce nel verso delle y negative. Essi quindi tendono ad accumularsi sulla faccia del campione perpendicolare all'asse y .

Questo **accumulo di cariche porta alla formazione di una differenza di potenziale** V_H fra le due facce 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 $E_H = \mu E_x B$.

Detta la resistività ($R = l/bc$), e n la densità di portatori di carica unitaria (e), si ottiene la relazione $V_H = (\mu / c) I_x B = (1/enc) I_x B = R_H I_x B$. Quindi la tensione di Hall è proporzionale al campo magnetico B e alla corrente I_x , tramite un coefficiente R_H inversamente proporzionale alla densità dei portatori di carica n e allo spessore del campione c .

Per campioni sottili, e con elevata μ (semiconduttori: InAs, InSb, GaAs) si hanno grandi valori di sensibilità $s = V_H / B$. La linearità è discreta per bassi valori del campo (0.2% per $B < 0.5$ T) e la sensibilità è dell'ordine di 0.1 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.

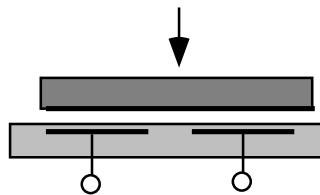
Si può sfruttare ad esempio una *modulazione*:

- della *capacità* tra due armature di un condensatore (sensori capacitivi)
- della mutua *induttanza* tra due avvolgimenti (sensori induttivi)
- 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

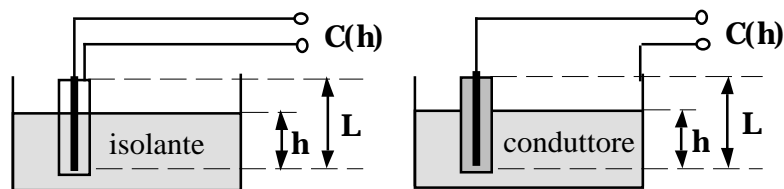
Nei sensori capacitivi la modulazione di capacità può essere indotta dal movimento di una delle armature rispetto all'altra che resta fissa, oppure l'accoppiamento capacitivo tra due armature fisse può essere variato tramite una terza armatura mobile (spesso costituita proprio dall'oggetto di interesse).



Schema di sensore capacitivo con due elettrodi adiacenti

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

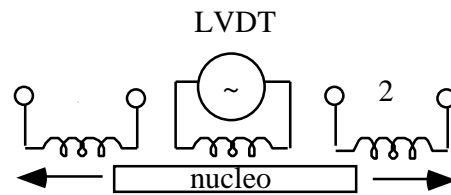
Un sensore capacitivo può essere usato anche per misurare il livello di un liquido isolante. Due elettrodi, tra loro affacciati, vengono immersi nel liquido in modo che, quando il livello della superficie libera si sposta, la diversa costante elettrica del fluido $\epsilon_r \epsilon_0$ e del suo vapore (o dell'aria) (ϵ_0), provoca una variazione di capacità.



Misuratori di livello capacitivi

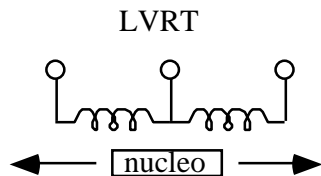
Di questo tipo sono spesso i sensori che nella vostra automobile vi avvertono che è ora di “fare il pieno”

Sensori di posizione induttivi

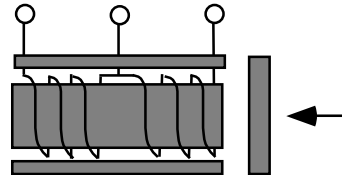


Sensore induttivo a trasformatore

I sensori induttivi possono essere del tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Si tratta di un trasformatore in cui è reso variabile il coefficiente di accoppiamento tra il primario e due secondari. Il primario è guidato dal segnale di eccitazione e il segnale di uscita è prelevato come somma o come differenza dei segnali dei due secondari (simmetrici). L'accoppiamento tra gli avvolgimenti è controllato dalla posizione di un nucleo ferromagnetico mosso dall'oggetto che è in osservazione.



Sensore induttivo a riluttanza



Sensore a riluttanza con nucleo fisso

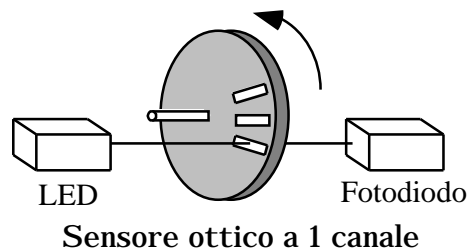
Nei sensori LVRT (Linear Variable Reluctance Transducer) due soli avvolgimenti costituiscono due rami di un ponte induttivo.

Qui è il segnale di sbilanciamento del ponte induttivo che misura lo spostamento del nucleo. Tale configurazione è spesso usata per misurare la distanza dal sensore di un oggetto costituito di materiale ferromagnetico che, spostandosi, varia la riluttanza in uno dei due rami del ponte ove il nucleo resta fermo. I principali vantaggi di questi sensori sono la robustezza meccanica, la affidabilità, e la possibilità di rendere trascurabile l'attrito per l'assenza di contatti striscianti.

Sensori di posizione ottici

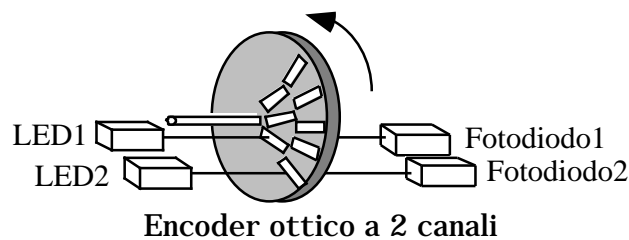
I sensori ottici di rotazione (*encoder*) traducono la rotazione di un disco graduato in segnale digitale.

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 (fotodiodo, 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:



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

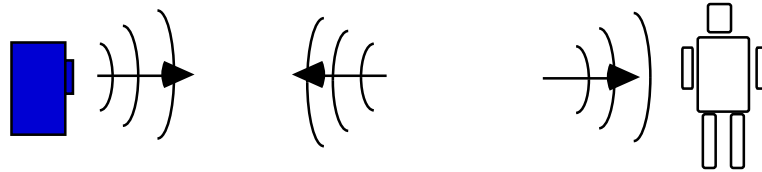
Nel “mouse” (ma anche nell’equivalente “track-ball” che sostituisce il mouse in molti PC portatili) due encoder registrano la rotazione di due dischi tra loro ortogonali che sono mossi da una sfera (trascinata su una superficie piana nel primo, e mossa direttamente nel secondo): le due coordinate fornite 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 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* $c = \sqrt{\gamma RT / M}$ [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 (o nel 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).

Contatore Geiger

I contatori Geiger-Müller sono sensori costituiti da un condensatore il cui dielettrico è costituito da una opportuna miscela di gas. Il condensatore è di solito a forma cilindrica e tra i due elettrodi è mantenuta una alta tensione (tipicamente 500 volt). Quando il sensore è attraversato da una particella ionizzante, gli ioni accelerati dal campo elettrico innescano una scarica tra gli elettrodi. Poichè il numero di eventi è proporzionale al numero di particelle che attraversano il tubo, la frequenza delle scariche fornisce una misura della *attività* della sorgente.

L'attività è espressa, nel Sistema Internazionale, in **becquerel** (Bq) come numero di decadimenti per secondo, una unità di misura omogenea alla frequenza, che si esprime in Hz. Una unità di misura che è stata molto usata ma ora fuori norma, è il curie (Ci): il fattore di conversione tra le due unità è $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

Dalla definizione di attività, risulta che un contatore Geiger può essere tarato in becquerel se esso è in grado, oltre che misurare il tempo di conteggio T e il numero contato di eventi ionizzanti n , anche di fornire in uscita il *valore medio* $f = n/T$ (se T è misurato in secondi, il valore di f è una misura dell'attività rivelata).

Bisogna poi distinguere tra la frazione di attività rivelata dal sensore e l'attività *totale emessa dalla sorgente* (per una sorgente puntiforme il sensore intercetta una frazione delle particelle emesse, pari al rapporto $\Omega/4\pi$, ove Ω è l'angolo solido sotteso alla sorgente dal sensore, rapporto detto fattore geometrico di efficienza E_G , o accettazione).

In altri termini si può dire che il contatore Geiger misura l'intensità del *flusso di radiazione* prodotto dalla sorgente.

Non tutte le particelle emesse entro l'angolo Ω producono ionizzazione: alcune non raggiungono il sensore perchè fermate dall'aria o dalle pareti del tubo di Geiger, altre attraversano il sensore senza interagire con il gas. Quindi la misura fornita da un particolare Geiger è *proporzionale* all'intensità del flusso di radiazione, e la costante di proporzionalità è detta efficienza intrinseca E_I di quel Geiger.

La sensibilità di un contatore Geiger-Müller è cioè determinata dal prodotto $E_G \times E_I$: il primo fattore è proporzionale al volume del sensore, mentre il secondo dipende essenzialmente dalla trasparenza delle pareti del sensore (tubi a pareti spesse non "sentono" le particelle **alfa** o le **beta** di bassa energia).

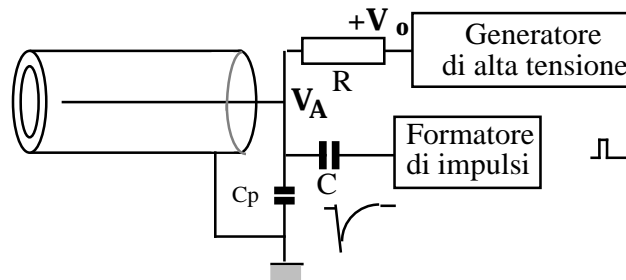
Diversi tipi di tubi Geiger possono essere classificati per tipo di particelle che sono in grado di rivelare: di solito, in funzione della crescente trasparenza della finestra del sensore si distinguono tre classi: **modelli adatti solo per α e X**, oppure per **β e γ** , infine per **β , γ e X**.

Un ultimo parametro, che diventa importante ad elevati flussi di radiazione, è quello che viene definito *tempo morto* t . Esso è l'intervallo di tempo, successivo all'evento che

produce la scarica, durante il quale il sensore non è in grado di contare altri eventi, e quindi è inattivo o morto.

Per capire l'origine del tempo morto si deve considerare l'evoluzione temporale della tensione agli elettrodi negli istanti immediatamente successivi al passaggio della particella ionizzante.

Quando la particella attraversa il gas nel rivelatore essa subisce collisioni multiple perdendo mano a mano energia e lasciando sul suo percorso una traccia costituita da coppie di ioni positivi e negativi ; il numero di coppie create dipende dalla natura della particella, dalla sua energia e dalla lunghezza della traccia. Questi ioni sono soggetti ad un campo elettrico, di solito a simmetria radiale nei tubi Geiger cilindrici ove l'elettrodo a tensione positiva (anodo) è costituito da un filo assiale e quello posto a massa (catodo) è costituito dalle pareti del tubo.



Schema di contatore Geiger-Müller

Se il campo elettrico è sufficientemente elevato, gli ioni vengono separati prima che possano ricombinarsi, e vengono accelerati raggiungendo rapidamente l'energia cinetica necessaria a ionizzare per urto altri atomi del gas prima di raggiungere gli elettrodi. A valori molto alti del campo elettrico, si producono anche fotoni, emessi dagli atomi eccitati, che ionizzano a loro volta altri atomi. L'effetto è quello di una moltiplicazione a valanga con una conseguente rapida crescita della corrente elettrica ed una corrispondente caduta della impedenza $Z(t)$ tra anodo e catodo.

La tensione dell'anodo $V_A(t)$, in funzione del tempo t è data dalla tensione di alimentazione V_0 , ripartita tra la elevata resistenza di polarizzazione ($R_P \approx 10\text{ M}\Omega$) e l'impedenza $Z(t)$: $V_A(t) = V_0 Z(t) / [R_P + Z(t)]$. La corrente *massima*, corrispondente alla *Z minima* è praticamente indipendente dal numero di ioni presenti nella traccia, e di conseguenza **il segnale $V_A(t)$ non dipende dall'energia della particella ionizzante, nè dalla sua natura, ma solo dal numero di particelle ionizzanti.**

Ciò equivale a dire che il **sensore Geiger opera in condizioni di saturazione**. Perchè ciò avvenga è necessario che la tensione di polarizzazione dell'anodo sia sufficientemente alta, cioè sia entro quella che viene detta zona di plateau.

La forma del fronte di discesa del segnale prodotto da un evento ionizzante è determinata dalla corrente di scarica, mentre il fronte di risalita è sostanzialmente un

esponenziale determinato dalla costante di tempo $\tau = R_p C_p$: $V_A(t) = V_0 [1 - \exp(-t/\tau)]$, ove C_p è la capacità parassita tra gli elettrodi.

Per contare il numero di eventi conviene trasformare il segnale analogico, prelevato all'anodo mediante una capacità, in un segnale digitale attraverso un discriminatore a soglia, che eviti conteggi spuri dovuti a segnali di rumore, e un formatore di impulsi, di opportuna durata ed ampiezza, che possa agevolmente pilotare un contatore elettronico. Il discriminatore è sostanzialmente un comparatore di tensione con isteresi e con soglia prossima alla tensione di picco del segnale prodotto da un evento ionizzante.

Se una seconda particella attraversa il sensore prima che sia finito l'impulso generato da quella precedente, il suo effetto è solo quello di allungare e deformare l'impulso, e i due eventi vengono contati dal discriminatore come uno solo. Ciò equivale a dire che se τ è la durata efficace di un impulso, cioè il tempo necessario affinché $V_A(t)$ torni al valore V_0 , il sensore resta cieco per un tempo τ (che può arrivare a centinaia di μs) ogni volta che conta un evento, e di ciò bisogna tener conto se la frequenza dei conteggi è molto elevata.

Il Radiation Monitor Vernier, compatibile con CBL è un Geiger sensibile a radiazioni γ e β .

Accelerometri

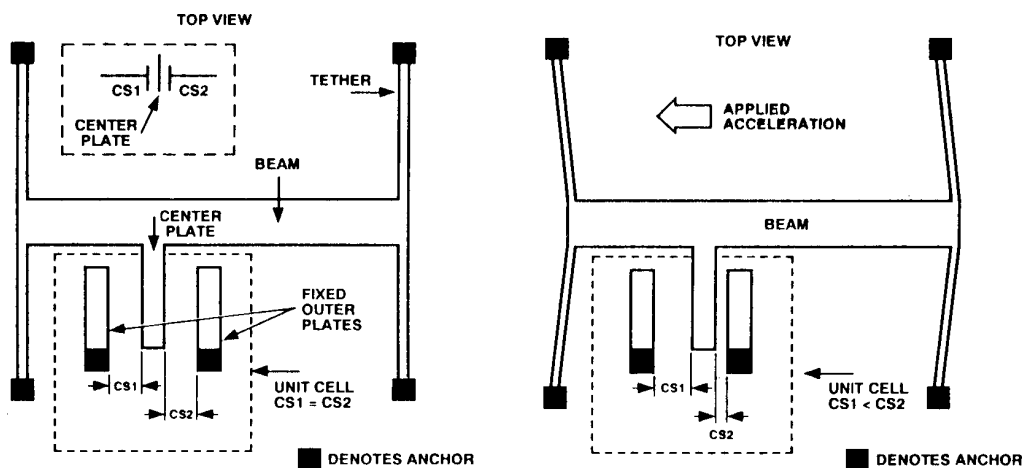
Una misura di accelerazione è per definizione una misura della variazione istantanea di velocità, e quindi, se derivata da misure di diverse posizioni di un oggetto nel tempo, richiederebbe tre distinte misure di posizioni in tre istanti molto vicini: dalle prime due per differenza si ricava la velocità 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 l'accelerazione. Questo è ciò che si fa quando si 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 l'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.

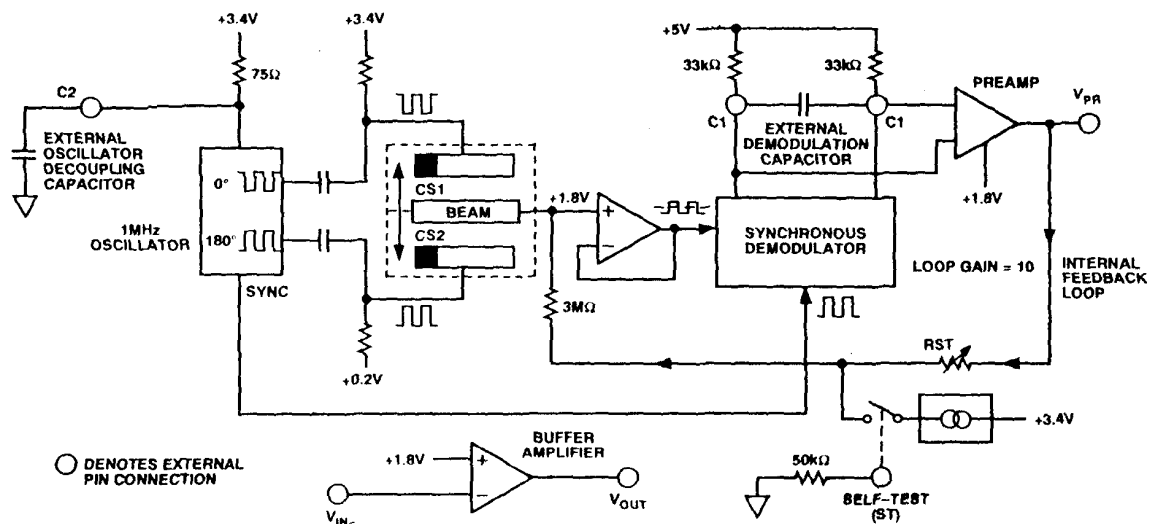
Per effetto della sua inerzia la massa flette il supporto con una forza proporzionale alla accelerazione impressa, e ciò trasforma il sensore di forza in un sensore di accelerazione.

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 elettrodi che formano il sensore. Il segnale prelevato all'elettrodo centrale viene rivelato (demodolato) 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.