

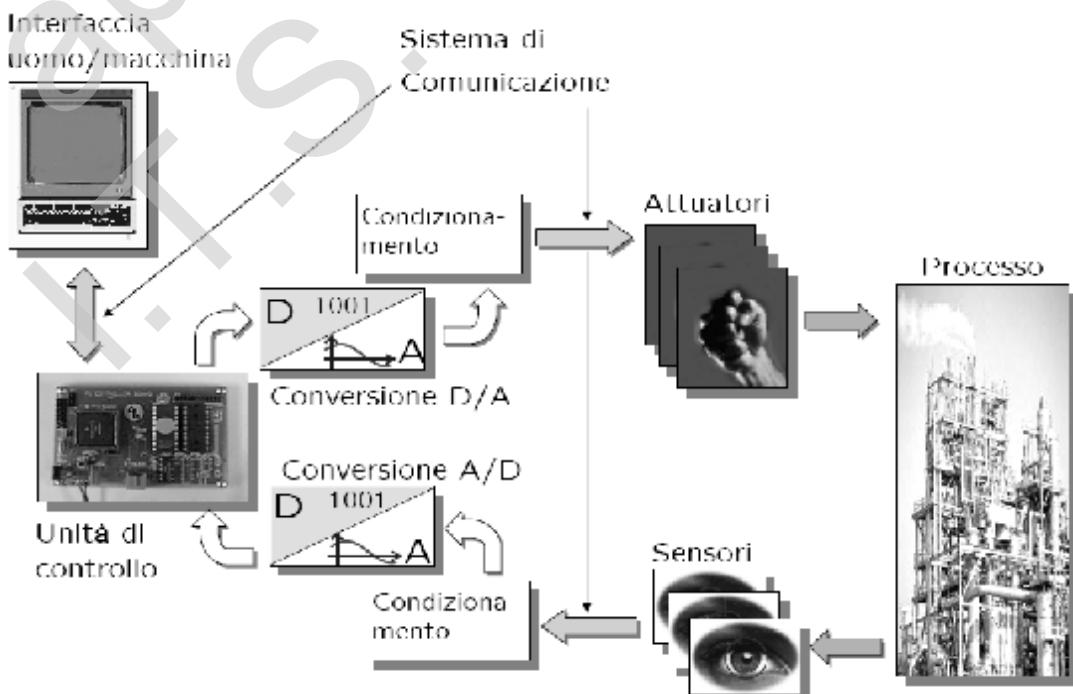
Sensori e Trasduttori

Appunti

I.T.S. appunti T.P.S.
Montebelluna

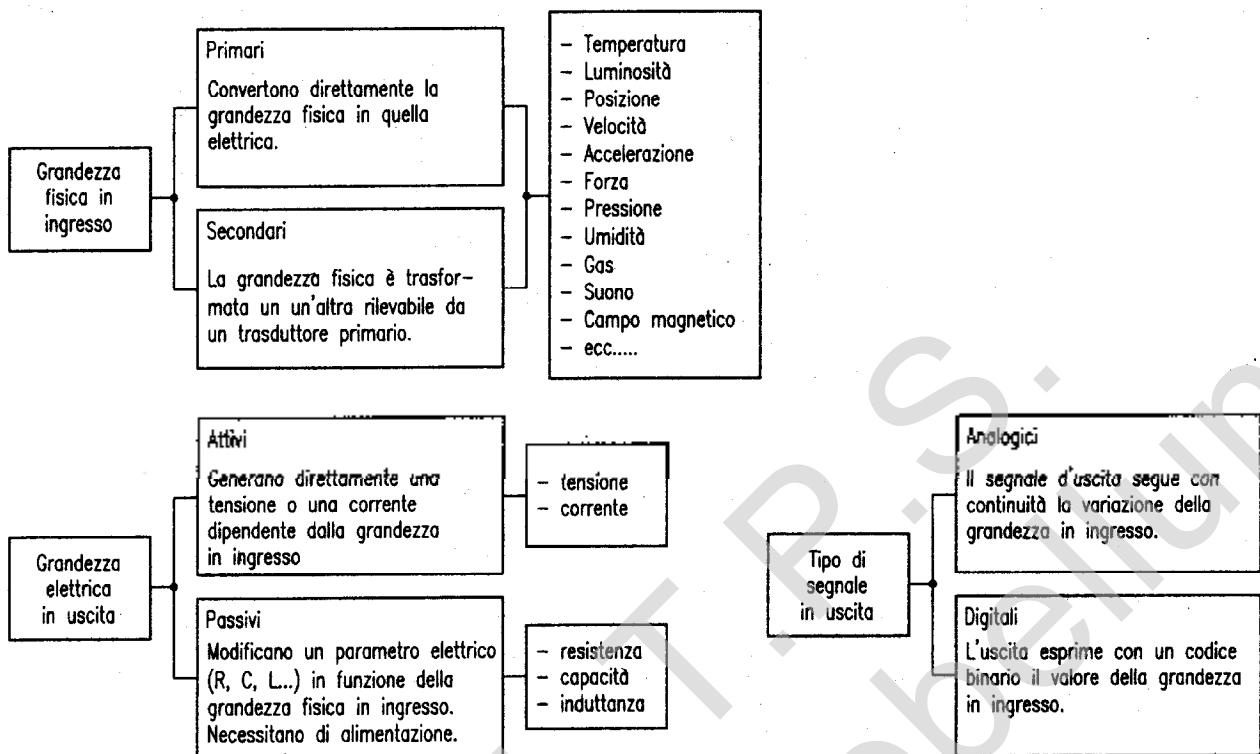
PARAMETRI CARATTERISTICI

- A) CAMPO DI LAVORO: è l'insieme dei valori della grandezza d'ingresso ai quali corrispondono valori affidabili della grandezza d'uscita.
- B) LINEARITA': un trasduttore è lineare quando il segnale Su fornito all'uscita è legato a quello d'ingresso Si da una relazione di proporzionalità $S_u = K S_i$. Solitamente il campo di linearità definito dal costruttore risulta più ridotto del campo di lavoro.
- C) STABILITA': esprime la capacità di mantenere la linearità, nelle diverse condizioni di lavoro e nel tempo.
- D) SENSIBILITÀ: rappresenta il rapporto tra la variazione della grandezza d'uscita e quella d'ingresso che l'ha provocata. Corrisponde alla pendenza della curva di conversione in un certo punto: $S = (\delta y / \delta x)$
- E) RISOLUZIONE: è la minima variazione della grandezza d'ingresso, apprezzabile all'uscita.
- F) AFFIDABILITÀ: rappresenta il tempo nel quale si prevede che il traduttore manterrà inalterate le proprie caratteristiche in normali condizioni operative.
- G) VELOCITA' DI RISPOSTA: è il tempo impiegato dal traduttore ad adeguare il segnale d'uscita ad una variazione della grandezza d'ingresso.
- H) RIPETIBILITÀ: costituisce la capacità del traduttore di fornire la medesima uscita, se gli vengono applicate all'ingresso grandezze uguali in tempi diversi.
- I) RUMORE: è il segnale spurio prodotto dal traduttore in assenza di ingresso. Si sovrappone al segnale utile e produce errori di valutazione.
- J) INSENSIBILITÀ AI DISTURBI: è la capacità del traduttore di fornire all'uscita un segnale che dipenda unicamente dalla grandezza fisica per la quale opera, senza essere influenzato da altre grandezze.
- K) ISTERESI: rappresenta la diversa risposta fornite dal traduttore quando subisce variazioni della grandezza fisica d'ingresso di uguale entità ma di verso opposto.



sensori e attuatori

2



Criteri di classificazione dei trasduttori

Grandezze misurabili	Trasduttori	Grandezze in uscita
Temperatura	Termocoppie Resistenze al platino (RTD) Termistori (NTC PTC) Trasduttori a semiconduttore	Tensione Variazione di resistenza Corrente - Tensione
Forza Pressione	Potenziometri Estensimetri (strain gauge) Trasduttori capacitivi Trasduttori piezoelettrici	Variazione di resistenza Variazione di capacità Tensione Tensione
Posizione	Potenziometri Trasduttori ottici digitali	Variazione di resistenza Numero di impulsi
Spostamento	Trasduttori capacitivi Trasformatori differenziali Trasduttori induktivi Trasduttori ad effetto Hall Trasduttori ottici digitali Fotodiodi, fototransistor	Variazione di capacità Tensione Variazione di induttanza Tensione Numero di impulsi Corrente - Tensione
Velocità	Trasduttori piezoelettrici Dinamo tachimetrica Trasduttori ottici digitali	Tensione Tensione Frequenza di impulsi
Intensità luminosa	Fotodiodi, fototransistor Fotoresistenze Celle fotovoltaiche	Corrente – Tensione Variazione di resistenza Tensione

Trasduttore è un dispositivo che converte una grandezza fisica in un segnale elettrico proporzionale
 Sensore è un traduttore che fornisce un'uscita a due livelli

Un trasduttore è un dispositivo fisico che è stato progettato per trasformare grandezze appartenenti ad un sistema energetico in grandezze equivalenti (proporzionali) appartenenti ad un diverso sistema energetico (di solito più conveniente per gli usi successivi). Ovviamente un trasduttore può trasformare anche informazioni.

Un sensore è un particolare trasduttore utilizzato per sentire (o acquisire) le condizioni operative di una macchina o di un processo. Esso trasforma una grandezza fisica in un'altra equivalente, di solito appartenente al dominio fisico proprio dell'unità di governo (elettrico, pneumatico, idraulico) che deve poi elaborarne il contenuto informativo. Spesso il sensore acquisisce soltanto l'informazione (tutta o in parte), nel senso che la grandezza di uscita non possiede le stesse caratteristiche energetiche possedute da quella originaria.

Alcuni principi fisici utilizzati nella realizzazione dei sensori presentati

Nel seguito vengono enunciati, senza particolari dimostrazioni, alcune leggi e principi utilizzati nella realizzazione dei sensori più comuni.

Legge di Ohm: In un circuito elettrico in cui è presente un resistore la relazione tra le grandezze elettriche è la seguente:

$$V = R I$$

Questa legge è spesso utilizzata per realizzare sensori "modulanti" nei quali la resistenza del circuito varia in funzione della grandezza fisica da misurare secondo qualche principio o effetto tra quelli illustrati successivamente.

Principio dell'induzione elettromagnetica: In un circuito elettrico costituito da una spira di resistenza nulla l'equazione magnetica è:

$$V = d\varphi / dt = L \cdot di / dt$$

V = tensione, φ = flusso magnetico (misura della "quantità di magnetismo" presente intorno alla spira), i = corrente circolante nella spira. Ciò significa che:

- a) se al circuito si applica una tensione mediante un generatore, esso genera un campo magnetico variabile;
- b) se si immerge il circuito in un campo magnetico variabile in esso si genera una tensione.

Se il circuito è costituito da n spire l'equazione magnetica diventa:

$$V = n(d\varphi / dt)$$

Come si vede confrontando la legge dell'induzione con la legge di Ohm, l'applicazione di una tensione continua ad un circuito privo di resistenza provoca una corrente che cresce all'infinito.

La legge dell'induzione si applica utilmente a circuiti funzionanti in alternata con grandezze periodiche a valor medio nullo. Il circuito tipico in cui questa legge è utilizzata è il trasformatore, che è costituito da due avvolgimenti (primario e secondario) rispettivamente con n_1 e n_2 spire avvolte sullo stesso nucleo. Se sul circuito primario (che per semplicità si suppone puramente induttivo) si applica una tensione alternata $V_{ms} \sin \omega t$, l'equazione magnetica è:

$$V_1 = n_1(d\varphi_1 / dt), \text{ da cui } \varphi_1 = -V_m(1/n_1 \omega) \cos \omega t.$$

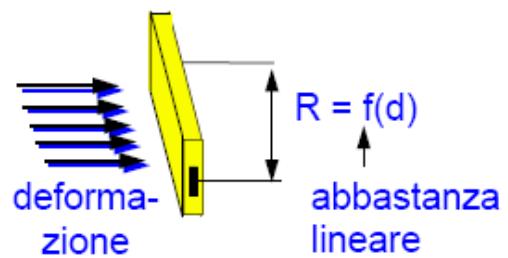
Se il trasformatore è ben fatto, tutto il flusso generato dal primario si concatena con il secondario. Ne consegue che la tensione presente sul secondario è:

$$V_2 = n_2(d\varphi_1 / dt) = (n_2 / n_1) V_{ms} \sin \omega t.$$

In molti sensori il principio del trasformatore è utilizzato in circuiti in cui il primario ed il secondario hanno lo stesso numero di spire ma nei quali volutamente l'accoppiamento magnetico tra primario e secondario non è perfetto come nei trasformatori ma varia in funzione della grandezza da misurare. Ne consegue che la tensione di uscita risulta una frazione di quella di ingresso dipendente dalla grandezza da misurare (sensori modulanti).

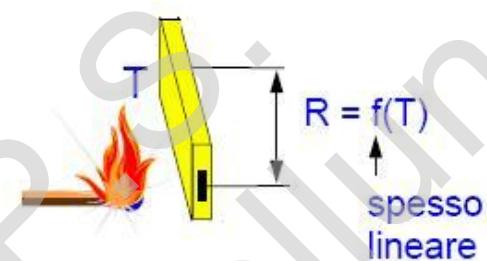
Effetto piezoresistivo

Variazione della resistenza elettrica di un materiale (metallo o semiconduttore) dovuta alla sua deformazione meccanica. La variazione di resistenza nei metalli è molto inferiore a quella nel silicio.



Effetto termoresistivo

Variazione della resistenza elettrica di un materiale (metallo o semiconduttore) dovuta al riscaldamento. La variazione di resistenza nei metalli puri (soprattutto il platino) non è molto elevata ma varia molto linearmente con la temperatura. La resistenza nei semiconduttori o negli ossidi è molto elevata ma varia in modo non lineare con la temperatura.



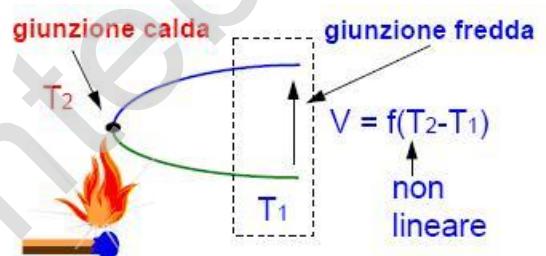
Effetto termoelettrico

Quando una differenza di temperatura è presente tra due parti di un sistema costituito da due conduttori metallici uniti in una giunzione si verificano due effetti:

Effetto Seebeck: se la giunzione è mantenuta ad una temperatura differente da quella delle due parti metalliche libere, si genera una differenza di potenziale (tensione) tra i due estremi liberi.

La tensione generata è abbastanza modesta (decine di mV) ma dipende quasi linearmente dalla differenza di temperatura.

Effetto Peltier: se una corrente viene fatta passare attraverso la giunzione in essa viene generato o assorbito calore in relazione al verso della corrente circolante.

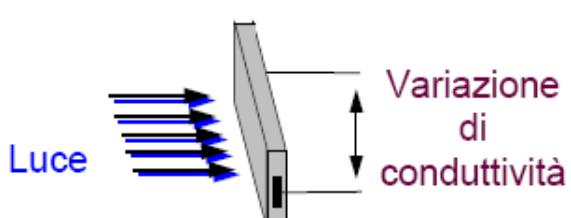


Effetto fotoelettrico

L'energia dei fotoni incidenti su una superficie metallica si può trasformare in energia cinetica degli elettroni presenti nel metallo stesso. Se l'energia cinetica è sufficiente a superare la barriera di energia potenziale localizzata sulla superficie del metallo si ha emissione di elettroni. La scoperta di questo principio valse ad Einstein il premio Nobel; esso è stato per molto tempo alla base della realizzazione dei dispositivi optoelettronici realizzati con tubi a vuoto.

Effetto fotovoltaico

I fotoni incidenti su un reticolo cristallino semiconduttore sono in grado di trasferire la loro energia agli elettroni di valenza del cristallo. In modo analogo all'effetto fotoelettrico sui metalli, se l'energia acquistata da parte degli elettroni è sufficiente, questi abbandonano la banda di valenza creando coppie elettroni/lacune libere di transitare nel reticolo. Quando questo avviene in corrispondenza di una giunzione P-N, il campo elettrico creato dal potenziale di giunzione accelera



le cariche dando luogo ad una corrente fotoelettrica. Il fenomeno è alla base dei sensori optoelettronici e delle celle fotovoltaiche. Nei primi esso viene sfruttato per tradurre informazioni luminose in informazioni elettriche, mentre nelle seconde si impiega per la produzione di energia elettrica.

Effetto Hall

Se un campo magnetico è applicato perpendicolarmente ad una superficie conduttrice percorsa da corrente su di essa si genera un campo elettrico perpendicolare sia alla corrente che al campo. In termini matematici si ha

$$V_{out} = K (\vec{H} \times \vec{I})$$

con

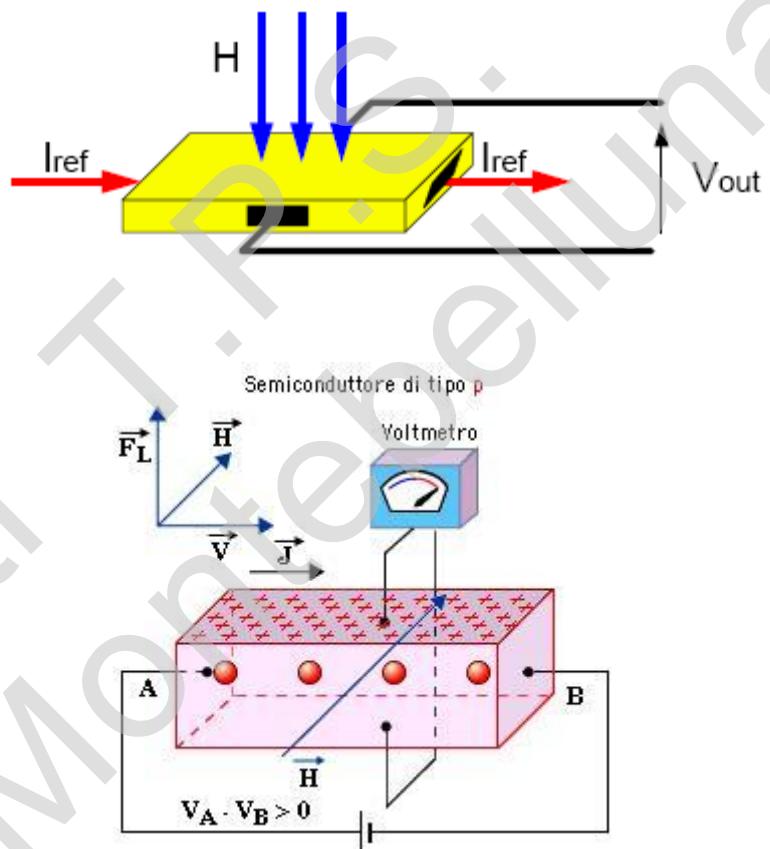
V = tensione di uscita del sensore

I = corrente impressa sul sensore

K = costante di Hall del dispositivo

H = campo magnetico di cui si vuole misurare l'intensità

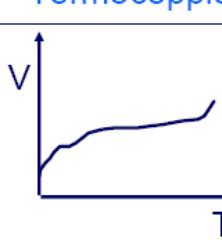
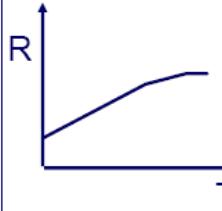
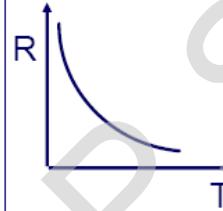
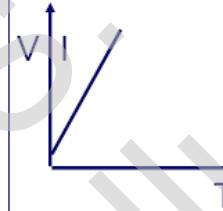
L'effetto Hall è la base di numerosissimi sensori e dispositivi in moltissimi campi applicativi diversi.

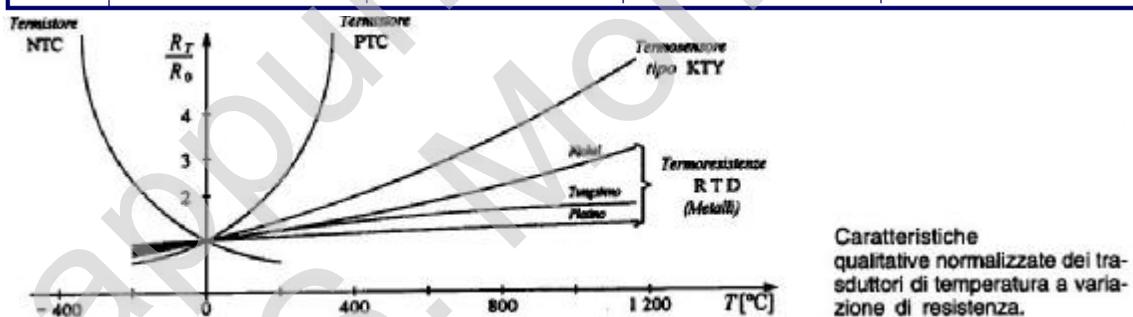


Sensori di temperatura

La misura di temperatura è tra le misure più comuni nell'Automazione. Tutti i processi di generazione e trasformazione di energia producono calore e la temperatura è un elemento che spesso condiziona il funzionamento di un processo o di una apparecchiatura. Verranno presi in considerazione i tre sensori di temperatura più comuni: le Termocoppie, le Termoresistenza, ed i Termistori, le cui caratteristiche essenziali sono messe sinteticamente a confronto in fig. seguente principi fisici utilizzati nella realizzazione dei sensori di temperatura e l'elevato range di valori di temperatura caratteristici di molti processi rendono problematica la realizzazione di sensori con caratteristica lineare. Il circuito di interfaccia dovrà provvedere pertanto anche alla linearizzazione.

Tabella comparativa

	Termocoppie	RTD	Termistori	Sensori a c.i.
				
Pro	<ul style="list-style-type: none"> • autoeccitante • semplice • robusto • poco costoso 	<ul style="list-style-type: none"> • molto stabile • molto accurato • molto lineare 	<ul style="list-style-type: none"> • molto sensibile • veloce • misura a 2 fili 	<ul style="list-style-type: none"> • molto lineare • output elevato • poco costoso
Contra	<ul style="list-style-type: none"> • non lineare • bassa Vout • temp. di riferim. • bassa sensitività 	<ul style="list-style-type: none"> • costoso • rifer. di corrente • bassa resist. • autoriscaldante 	<ul style="list-style-type: none"> • non lineare • range limitato • rifer. di corrente • autoriscaldante 	<ul style="list-style-type: none"> • T<200°C • serve aliment. • lento • autoriscaldante



Termocoppia

Principio di funzionamento

Si basa sull'Effetto Seebeck. Solo per piccole variazioni di temperatura la tensione di Seebeck dipende linearmente dalla temperatura. Generalmente la dipendenza è non lineare e la linearizzazione può essere effettuata mediante tabelle o polinomi interpolanti il cui ordine dipende dalla non linearità e quindi anche dal range di temperatura utilizzato.

Il coef. di Seebeck α viene espresso in $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Descrizione

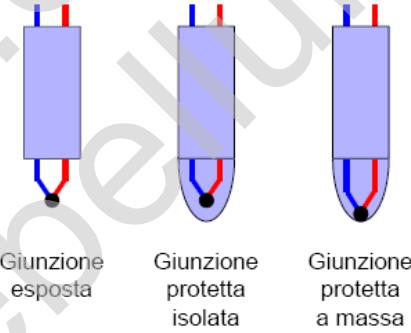
Si tratta dell'unico sensore "auto-eccitante" presentato. Sono disponibili in commercio termocoppie realizzate con diverse coppie di metalli. Ciascuna ha caratteristiche di applicazione (range di temperatura), tensione fornita (in genere dell'ordine di poche decine di mV) e di linearità proprie. In base ai metalli utilizzati le termocoppie vengono classificate secondo lo standard ANSI con lettere maiuscole. In tab. sono riportate sinteticamente le caratteristiche delle più comuni termocoppie.

Tipo E	Tipo J	Tipo K	Tipo R	Tipo T
NikelCromo(+) Costantana(-)	Ferro(+) Costantana(-)	NikelCromo(+) Nikel(-)	PlatinoRodio(+) Platino(-)	Rame(+) Costantana(-)
-100°C ÷ 1000°C ±0.5°C V _{max} 70mV	0°C ÷ 760°C ±0.1°C V _{max} 40mV	0°C ÷ 1370°C ±0.7°C V _{max} 50mV	0°C ÷ 1000°C ±0.5°C V _{max} 20mV	-160°C ÷ 400°C ±0.5°C V _{max} 20mV
alta sensibilità bassa temperatura	uso generale basso costo	atmosfere ossidanti	grande pregio molto stabili alte temperature vanno protette	basse temperature robustezza ambienti ostili

Per garantire alla termocoppia la capacità di misurare la temperatura di liquidi e gas in qualunque condizione operativa sono disponibili diverse soluzioni realizzative come illustrato in fig. seguente

Le più significative sono:

La soluzione a *giunzione esposta* è consigliabile per misurare la temperatura di gas non corrosivi quando è richiesto un tempo di risposta rapido. La giunzione si estende oltre la guaina metallica protettiva per minimizzare la capacità termica del contatto. La guaina protettiva è sigillata in corrispondenza del punto di uscita della giunzione per impedire all'umidità ed al gas di penetrare all'interno.



Le soluzioni a giunzione protetta vengono utilizzate per misure in ambiente corrosivo o ad alta pressione. La *giunzione isolata* viene utilizzata quando è opportuno mantenere la termocoppia elettricamente isolata dalla guaina. In questo caso la guaina serve da schermo. La *giunzione a massa* viene utilizzata quando occorre una risposta dinamica più rapida.

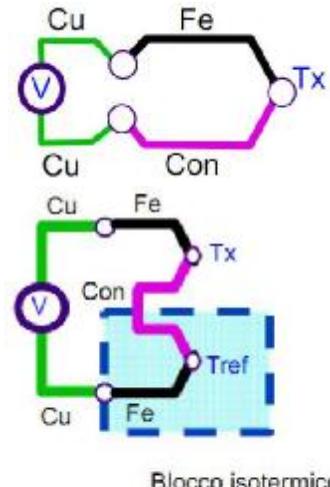
Principali problemi di interfacciamento

La misura della tensione di uscita di una termocoppia richiede il collegamento ad un apposito circuito di misura. I conduttori utilizzati per questo collegamento (solitamente di rame) creano a loro volta nuove termocoppiie.

Per ovviare a questo problema

1) "Soluzione classica"

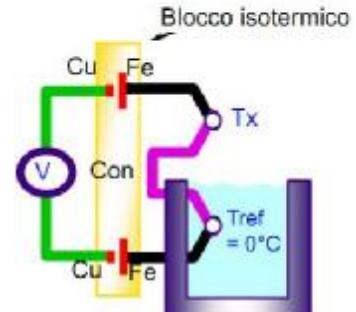
Si aggiunge una seconda termocoppia di riferimento ("giunto freddo"), posta ad una temperatura fissa



Se le altre due giunzioni (Cu-Fe, nell'esempio) sono mantenute ad una identica temperatura, allora i loro effetti si cancellano e la V misurata dipende solo da Tx

Le termocoppe sono corredate di tabelle V – Tx per una T_{REF} a 0°C (ghiaccio fondente).

Si tratta di una soluzione accurata ma poco pratica.



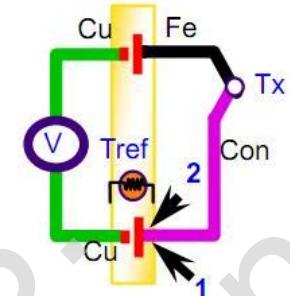
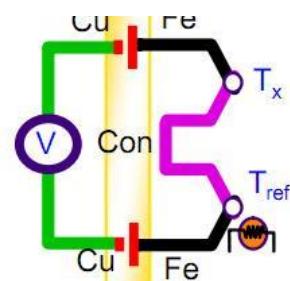
2) "Compensazione del giunto freddo"

Invece di forzare la giunzione di riferimento ad una data temperatura T_{REF} :

1. Si misura T_{REF} (RTD, termistore,...)

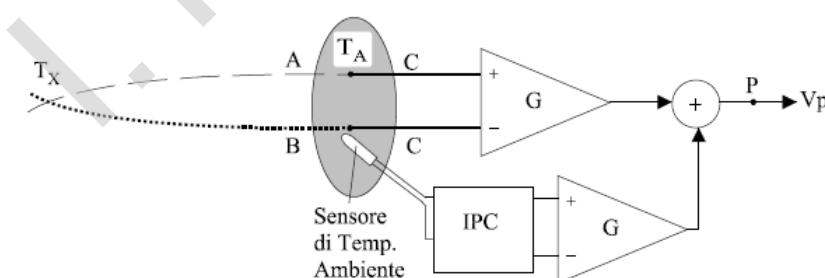
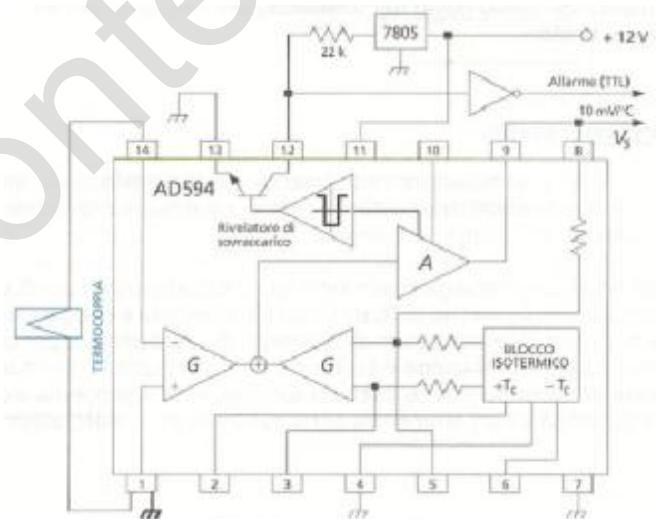
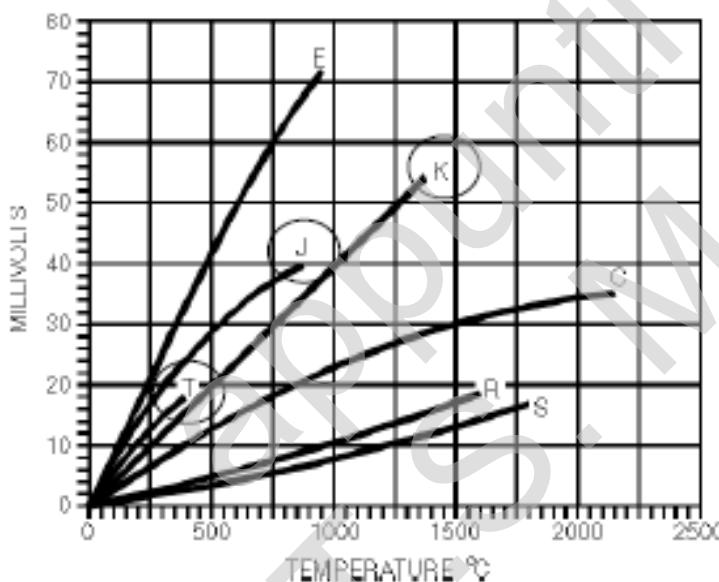
2. Si compensa matematicamente: è sufficiente conoscere le tabelle $V - T_x$ per una T_{REF} a 0°C per le due termocoppie.

E' possibile, inoltre, eliminare la termocoppia di riferimento, usando una delle due giunzioni di misura come riferimento.



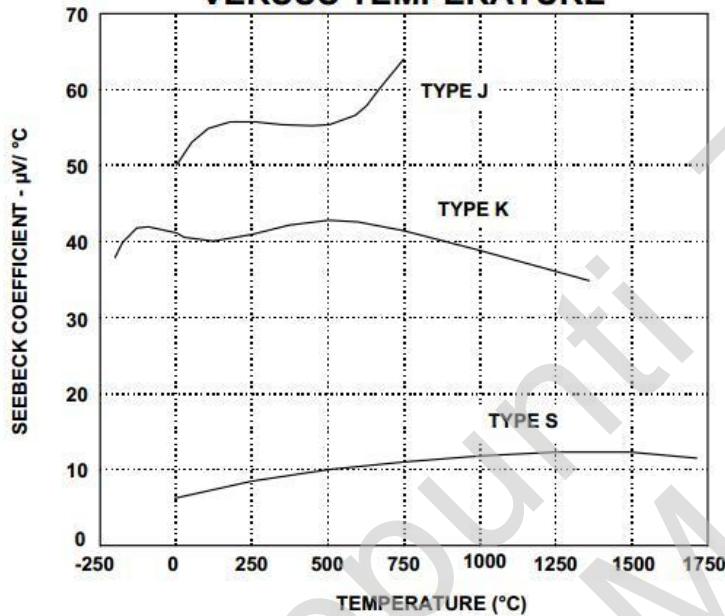
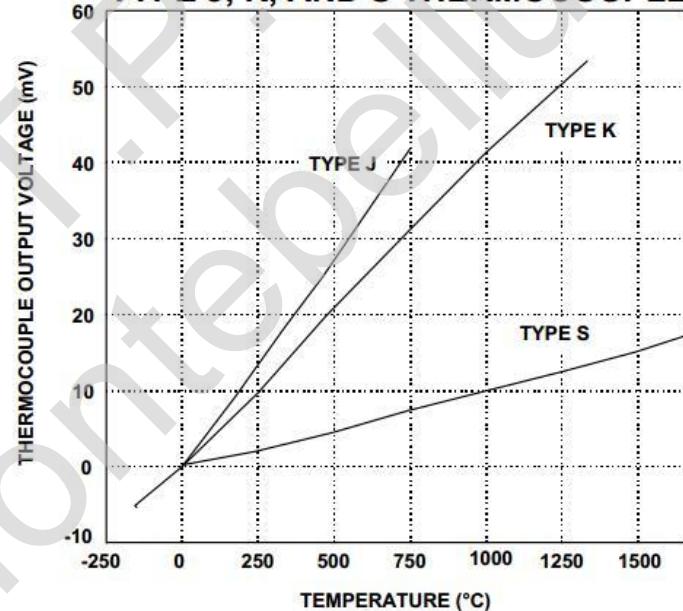
Il procedimento illustrato può apparire, a prima vista, assai strano, in quanto per misurare una temperatura (di un forno ad es.) è necessario introdurre un'altra misura di temperatura (ambiente). La giustificazione è legata al fatto che il secondo problema di misura è molto più semplice del primo e può essere risolto usando un sensore di basso costo che non sarebbe assolutamente idoneo a misurare le temperature all'interno del forno.

Per completare il discorso sull'interfacciamento della termocoppia occorre ricordare che si tratta di un sensore "auto-eccitante" e quindi, in generale, flottante rispetto a massa. Se per l'amplificazione si usa un amplificatore di strumentazione occorre effettuare un collegamento a massa del circuito per garantire una via di scarico delle correnti di polarizzazione dell'amplificatore.



Rif. Analog Device AD594/AD595 e APPLICATION NOTE AN-369

JUNCTION MATERIALS	TYPICAL USEFUL RANGE (°C)	NOMINAL SENSITIVITY ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	ANSI DESIGNATION
Platinum (6%)/ Rhodium-Platinum (30%)/Rhodium	38 to 1800	7.7	B
Tungsten (5%)/Rhenium - Tungsten (26%)/Rhenium	0 to 2300	16	C
Chromel - Constantan	0 to 982	76	E
Iron - Constantan	0 to 760	55	J
Chromel - Alumel	-184 to 1260	39	K
Platinum (13%)/Rhodium-Platinum	0 to 1593	11.7	R
Platinum (10%)/Rhodium-Platinum	0 to 1538	10.4	S
Copper-Constantan	-184 to 400	45	T

THERMOCOUPLE SEEBECK COEFFICIENT VERSUS TEMPERATURE**THERMOCOUPLE OUTPUT VOLTAGES
TYPE J, K, AND S THERMOCOUPLE**

Termoresistenza RTD (Resistance Temperature Detector)**Principio di funzionamento**

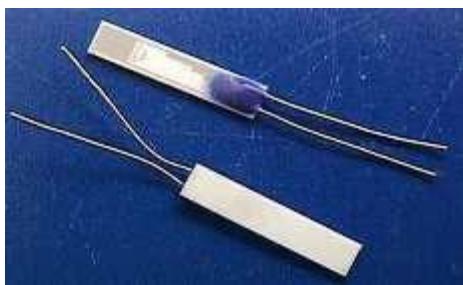
Si basa sull'effetto Termoresistivo per cui la resistenza di un metallo varia positivamente al variare della temperatura. L'uso di metalli nobili come il Platino, l'Oro ed il Nikel consente di garantire caratteristiche stabili con l'uso e nel tempo. Per migliorare la sensibilità del dispositivo è opportuno usare metalli ad alta resistività e pertanto la scelta si limita pressoché esclusivamente al Platino. Occasionalmente e per limitate escursioni di temperatura si possono utilizzare il Rame ed il Nikel.

La loro resistenza varia secondo la legge: **$R = R_0 (1 + \alpha \cdot T)$**

dove R_0 è la resistenza a 0°C

α è il coef di temperatura ($^\circ\text{C}^{-1}$)

T è la temperatura in $^\circ\text{C}$



T ($^\circ\text{C}$)	R (Ω)						
-200	18.56	-30	88.22	60	123.24	350	229.72
-150	39.73	-20	92.16	70	127.07	400	247.11
-100	60.27	-10	96.09	80	130.89	450	264.20
-90	64.31	0	100.00	90	134.70	500	281.01
-80	68.33	10	103.90	100	138.50	550	297.53
-70	72.34	20	107.79	150	157.32	600	313.77
-60	76.33	30	111.67	200	175.85	650	329.7
-50	80.31	40	115.54	250	194.09	700	345.5
-40	84.28	50	119.40	300	212.05	750	360.8

Descrizione

Le prime termoresistenze erano realizzate avvolgendo un filo elicoidale di metallo su un supporto di mica, il tutto inserito in un tubo di vetro. Sebbene questa costruzione garantisca un sensore molto stabile, il contatto tra il metallo e l'elemento da misurare è scadente. Ne consegue una risposta abbastanza lenta ed una certa fragilità di esecuzione. Una moderna termoresistenza, in termini tecnici RTD, è realizzata mediante il deposito di un film di metallo (Platino in generale) su un piccolo supporto piatto di ceramica. Questo garantisce una costruzione più compatta e robusta, e consente un migliore contatto con il punto di misura e di conseguenza una risposta più pronta alle variazioni di temperatura. Come risulta evidente, si tratta di un sensore *modulante* in quanto non produce direttamente nessun segnale di uscita. Poiché la resistenza elettrica non è una grandezza direttamente misurabile, normalmente si inserisce il componente in un circuito dotato di un generatore di corrente. La variazione di resistenza modula il valore di tensione ai suoi capi.

Caratteristiche essenziali

L'RTD più comune è realizzato in Platino in modo tale da presentare una resistenza di 100Ω a 0°C . Viene normalmente definita come Pt100. Un elemento importante per caratterizzare un RTD è il Coefficiente di Temperatura, che per il Platino vale $+0.00392 (\text{ }^\circ\text{C})^{-1}$. Questo significa che per un Pt100, una variazione di 1°C comporta una variazione di 0.392Ω . Si tratta quindi di variazioni abbastanza significative che vanno tenute in conto nella realizzazione del circuito di interfaccia. Il campo di applicazione delle RTD è abbastanza esteso ($-200 \div +850^\circ\text{C}$ per il Pt 100) ma inferiore a quello delle termocoppie. La linearità è molto migliore di quelle della Termocoppia anche se nel range esteso andrebbe compensata. In Tab sono riportate alcune caratteristiche dei diversi tipi di termoresistenze.

		filo	film spe.	film sot.
R_{nom} @ 0°C	Ω	$100 \div 1000$	$100 \div 300$	$100 \div 1000$
Off-set	%	0.1	0.1	0.1
nonlin	%	0.6	0.6	0.6
τ (aria)	s	$5 \div 15$	$10 \div 20$	$3 \div 10$
size $I \times \Phi$	mm	25x5	25x1.5	10x1

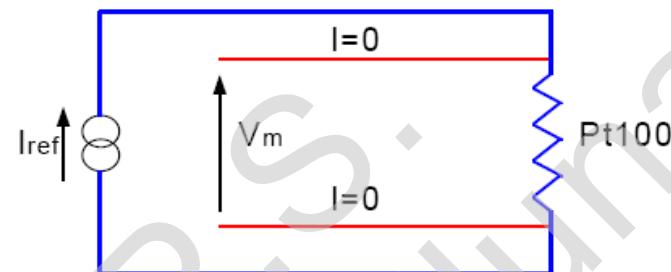
Principali problemi di interfacciamento

Trattandosi di un sensore *modulante*, occorre connetterlo ad un opportuno generatore di riferimento. Le possibili soluzioni sono:

1. Collegamento ad un generatore di riferimento di corrente e misura della tensione ai capi del sensore.

Si tratta del ben noto metodo "Volt-ampermetrico" che, come noto, richiede una connessione a 4 fili per garantire la massima precisione. Diversamente, non potendo collocare il generatore di riferimento ed il circuito di misura all'interno del forno, le resistenze dei cavi di collegamento si verrebbero a trovare in serie a quella del sensore e ad essa si sommerebbero.

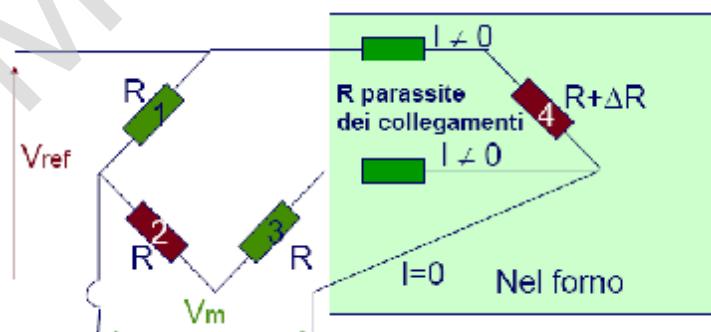
Resistenze di collegamento dell'ordine di qualche Ohm sono tipiche in lunghi collegamenti e pregiudicherebbero la qualità della misura. Il circuito di misura corretto è pertanto quello riportato in fig. a lato. In questo caso le resistenze dei collegamenti in serie all'RTD rispetto al generatore di corrente non alterano il valore di corrente sull'RTD, mentre la presenza di un circuito di misura ad elevata resistenza di ingresso limita le correnti sui cavi di misura, cancellando gli effetti della loro resistenza.



2 Inserimento del sensore in un ponte di resistenze

Questo tipo di collegamento non è particolarmente indicato per la misura di resistenza di un RTD perchè, come noto, fornisce la massima linearità in condizioni di piccolo sbilanciamento. Nel range di temperatura ammissibile la resistenza del RTD può variare da qualche Ω (-200°C) a qualche centinaio di Ω (+850°C) e pertanto un ponte, bilanciato ad es. a 100 Ω , **non fornirebbe una tensione linearmente dipendente dalla temperatura** se non in un intervallo di qualche grado intorno allo zero. Solo nel caso in cui si dovessero misurare piccole variazioni di temperatura intorno ad un punto di lavoro si può adottare una configurazione a ponte con l'accorgimento di utilizzare un RTD a 3 fili, come mostrato in fig. seguente. Le resistenze RL dei due cavi di collegamento risultano collocate su due rami adiacenti e, se uguali, si compensano. I problemi di non linearità dovuti allo sbilanciamento del ponte rimangono tuttavia irrisolti.

Indipendentemente dal tipo di collegamento, per trasformare la resistenza in un segnale elettrico misurabile occorre far circolare corrente nel dispositivo. Ne consegue un autoriscaldamento dello stesso per effetto Joule (I^2R). Questo autoriscaldamento appare come un errore di misura.



Specialmente con le RTD a film, caratterizzate da piccole dimensioni e quindi da resistenza termica elevata, occorre prestare la massima attenzione al livello di corrente iniettato nel componente per effettuare la misura. Valori tipici di resistenza termica sono nel range delle centinaia di °C/W in aria ferma e di qualche decina di °C/W se inseriti in un flusso d'aria in movimento. Si ricorda che la resistenza termica (in completa analogia con quella elettrica) indica l'incremento di temperatura per autoriscaldamento per ogni unità di potenza dissipata al suo interno. Dissipando ad es. 10mW in un Pt100 caratterizzato da una resistenza termica di 500°C/W e posto a temperatura di 0°C (corrispondente ad una corrente di 10mA sui 100Ω nominali) si ottiene un autoriscaldamento di 5°C.

Rif. PT100

Approfondimento**Misura della temperatura dal valore di resistenza dalla sonda Pt100 - RTD**

In realtà la modellizzazione è più complessa, poiché anche la sezione e la lunghezza del conduttore aumentano con la temperatura, ma in modo molto meno significativo, in particolare nel caso di materiali opportunamente scelti.

$$R_T = R_0 [1 + AT + BT^2 + CT^3(T - 100)] \quad (-200 \text{ } ^\circ\text{C} < T < 0 \text{ } ^\circ\text{C}),$$

$$R_T = R_0 [1 + AT + BT^2] \quad (0 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T < 850 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

$$A = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5.775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4.183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$$

Se una corrente costante nota viene applicata alla sonda viene registrata la caduta di tensione attraverso essa. Utilizzando la legge di Ohm, la tensione registrata e la corrente nota possono essere utilizzate per determinare la resistenza della sonda, che varia con la temperatura.

Il valore di resistenza viene quindi utilizzato per calcolare la temperatura utilizzando l'equazione Callendar-Van Dusen.

$$T_R = \frac{-R_0 A + \sqrt{R_0^2 A^2 - 4R_0 B(R_0 - R_T)}}{2R_0 B}$$

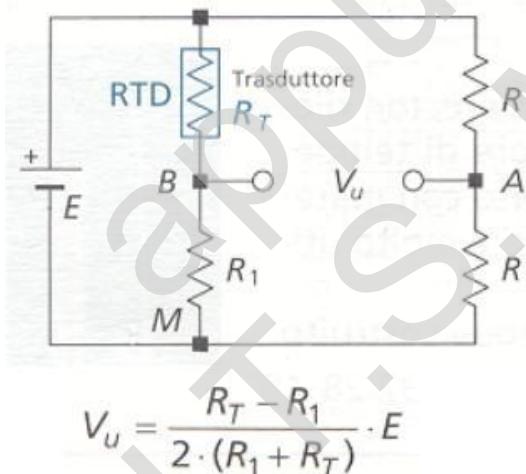
T_R = temperatura rilevata,

R_0 = resistenza nominale,

R_T = resistenza sonda

A B = costanti fornite dal costruttore del sensore utilizzato

$R_0 = 100$



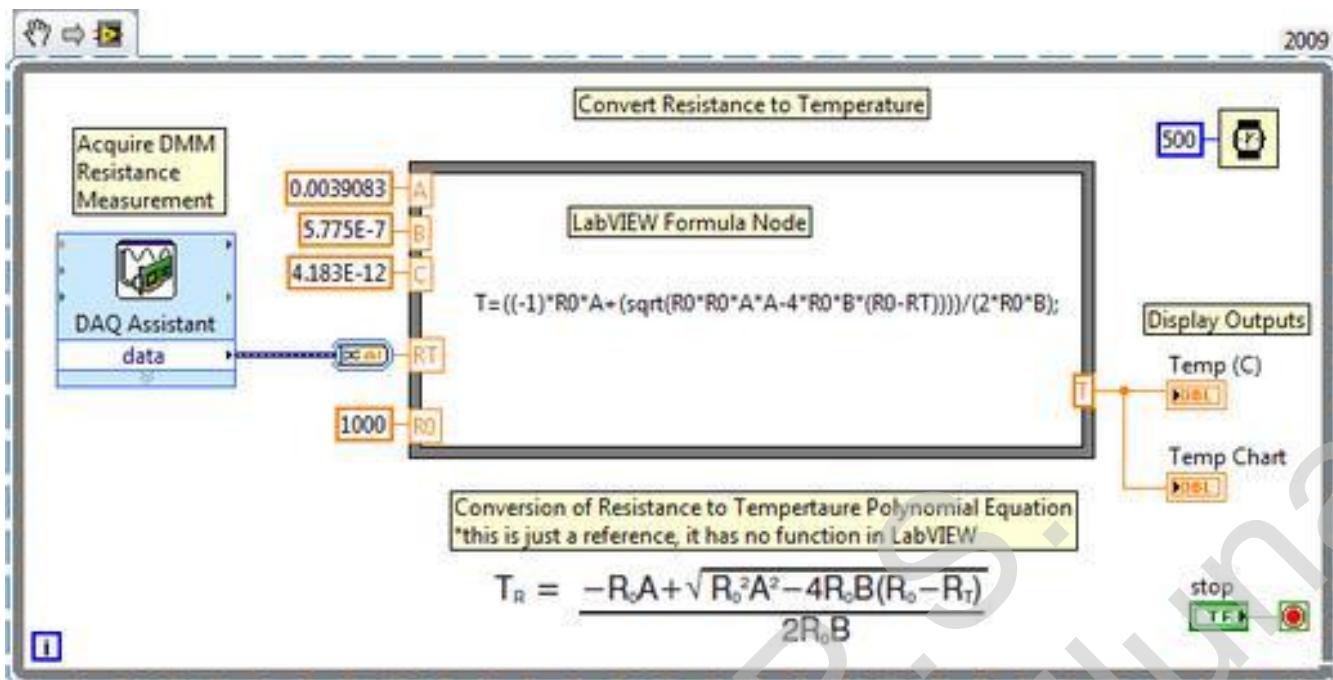
La tensione d'uscita $V_u = F(T)$ non è una funzione lineare della temperatura ma una funzione razionale fratta della variabile dipendente RT . Non può essere rappresentata con l'equazione di una retta. Il circuito introduce una non linearità anche se ha il pregio di fornire una tensione d'uscita $V_u = 0 \text{ V}$ per una qualsiasi temperatura minima (fattore di offset).

Limitando la corrente a 2 mA per limitare l'effetto Joule (autoriscaldamento) per $T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

$E = (R_T + R_1) 2 \text{ mA} = 0,4 \text{ V}$ ed è possibile ricavare i valori della tabella seguente

T [°C]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RT[Ω]	100	103,85	107,70	111,55	115,40	119,25	123,10	126,95	130,80	134,65	138,50
Vu [mV]	0	3,77	7,41	10,91	14,29	17,55	20,70	23,74	26,68	29,53	32,28
ΔV [mV]	-	3,77	3,64	3,50	3,38	3,26	3,15	3,04	2,94	2,85	2,75

L'analisi dei dati della tabella conferma che ad uguali incrementi della temperatura T non corrispondono aumenti proporzionali della tensione d'uscita Vu.



Secondo la norma IEC 751 (1995) le Pt100 sono classificate a seconda della tolleranza nella misura fornita:

- Pt100 Classe A $\pm 0,15^\circ\text{C}$ [0°C] $\pm 0,06 \Omega$ [0°C]
- Pt100 Classe B $\pm 0,30^\circ\text{C}$ [0°C] $\pm 0,12 \Omega$ [0°C]

Il TCR (*Temperature Coefficient of Resistance*) di una termoresistenza indica la variazione media per grado centigrado del valore della resistenza fra gli 0°C e i 100°C . Può essere espresso con la formula:

$$TCR = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100}$$

Il TCR viene indicato con α perché coincide col coefficiente α dell'equazione lineare che esprime R in funzione della temperatura. Un maggiore valore di TCR indica una maggiore sensibilità dovuta ad una più grande purezza del platino usato. In pratica il TCR viene usato per distinguere fra le varie curve resistenza/temperatura disponibili per le termoresistenze al platino, per le quali i valori variano da 0,00375 a 0,003928 $\Omega/\Omega/\text{ }^\circ\text{C}$.

La norma IEC 751 prescrive per le Pt100 un TCR di 0,00385 $\Omega/\Omega/\text{ }^\circ\text{C}$

Termistore**Principio di funzionamento**

Si basa ancora, come l'RTD, sull'effetto termoresistivo ma utilizzando materiale semiconduttore per cui la resistenza varia (di solito negativamente) al variare della temperatura. L'uso di semiconduttore consente di ottenere variazioni di resistenza molto significative con la temperatura.

Descrizione

Costruttivamente molto simili alle termoresistenze anche se molto più piccoli, i Termistori, grazie alla loro elevata sensibilità, sono in grado di rilevare piccole variazioni che le Termocoppie e le RTD non possono rilevare. Il prezzo da pagare per questa elevata sensibilità è una altrettanto elevata non linearità. E' in atto uno sforzo per realizzare Termistori lineari, almeno per range di temperature limitato. In virtù delle sue piccole dimensioni il Termistore possiede una elevata velocità di risposta alle variazioni di temperatura, ma soffre maggiormente di problemi di autoriscaldamento. L'elevato coefficiente di temperatura (tipicamente 4 %/°C) rende trascurabile la resistenza dei cavi di collegamento.

I termistori sono resistori ad ossidi metallici, la cui resistenza varia fortemente con la temperatura. Generalmente i termistori vengono prodotti sinterizzando miscele di polveri di ossidi metallici per ottenere sensori dalla forma opportuna per le varie applicazioni. I materiali adoperati nella realizzazione degli NTC sono miscele di ossidi di ferro, di cobalto, di manganese e di nichel.

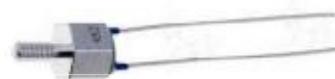
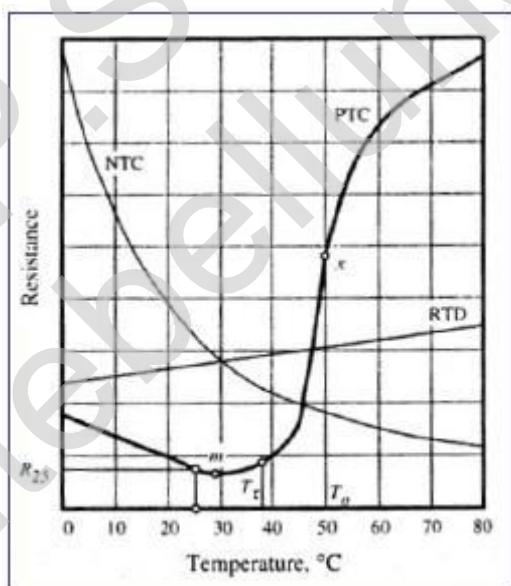
Due elettrodi metallici vengono introdotti nelle polveri prima della sinterizzazione che costituiranno i terminali del resistore. Gli ossidi usati si comportano da semiconduttori. Opportune sostanze droganti consentono di variare la resistività dei dispositivi. Un processo alternativo di fabbricazione prevede l'uso di inchiostri costituiti dalle polveri degli ossidi mescolate in una matrice fluida. L'inchiostro viene utilizzato per deporre resistori a film spesso su substrati isolanti quali allumina o ossido di silicio.

I termistori possono essere divisi in due grandi categorie:

NTC a coef. negativo

PTC a coef. positivo, come i metalli

I PTC proprio per la loro proprietà di aumentare rapidamente la resistenza all'aumentare della temperatura sono soprattutto utilizzati come elementi di protezione da sovratemperatura o da sovraccorrenti.

Termistori NTC

In questi termistori viene sfruttata la caratteristica dei semiconduttori puri di possedere una conducibilità che aumenta al crescere della temperatura, poiché aumenta il numero delle coppie elettrone-lacuna (ossia il numero dei portatori liberi di carica).

L'andamento della resistenza al variare della temperatura può essere espresso approssimativamente da una funzione esponenziale:

Dove :

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

$$\beta = \frac{T}{\ln \frac{R_T}{R_0} + \frac{\beta}{T_0}}$$

T_0 è la temperatura di riferimento tipicamente pari a 25° C [298 K]

R_0 è la resistenza alla temperatura T_0 di riferimento [Ω]

B è una costante dipendente dalla geometria e dal materiale impiegato; tipicamente essa ha valori compresi tra 2500 e 5700 [°K]

Per ottenere diverse sensibilità alla variazione di temperatura e diversi valori della resistenza di riferimento $R(T_0)$, si variano le proporzioni degli elementi che costituiscono la miscela.

In ogni caso l'analisi dei termistori NTC dimostra una notevole sensibilità rilevabile dai valori del coefficiente α (valori compresi tra -2.3% ° K⁻¹ e -4.6% ° K⁻¹).

Questo è particolarmente utile in applicazioni in cui è richiesto un livello alto del segnale di uscita su un range relativamente ristretto di temperature.

Di particolare interesse è l'espressione matematica del coefficiente di temperatura pari a:

$$\alpha = \frac{1}{R(T)} \cdot \frac{dR(T)}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

Tale formulazione evidenzia, oltre al segno negativo del coefficiente, la sua dipendenza dalla temperatura e dal parametro costruttivo B (variabile anch'esso con la temperatura).

Spesso i costruttori forniscono anche il valore della costante B mediato tra 25°C e 85°C indicato con $B_{25/85}$ che costituisce un utile riferimento per un'indicazione della sensibilità del termistore.

Per gli NTC esiste, ed è rilevante, il problema dell'autoriscaldamento dell'elemento per effetto della corrente di alimentazione.

A tal proposito i costruttori forniscono un parametro che, indicato con la lettera δ , viene detto coefficiente di dissipazione e viene misurato in mW/°K.

Esso permette di determinare rapidamente l'autoriscaldamento in funzione della potenza dissipata.

Ad esempio, con δ pari a 7.5 mW/°K e con una potenza dissipata P pari a 10mW si ottiene un autoriscaldamento (ossia un errore sulla misura di temperatura) di:

$$\Delta T = \frac{P}{\delta} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{7.5 \cdot 10^{-3}} = 1.3^\circ K$$

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.

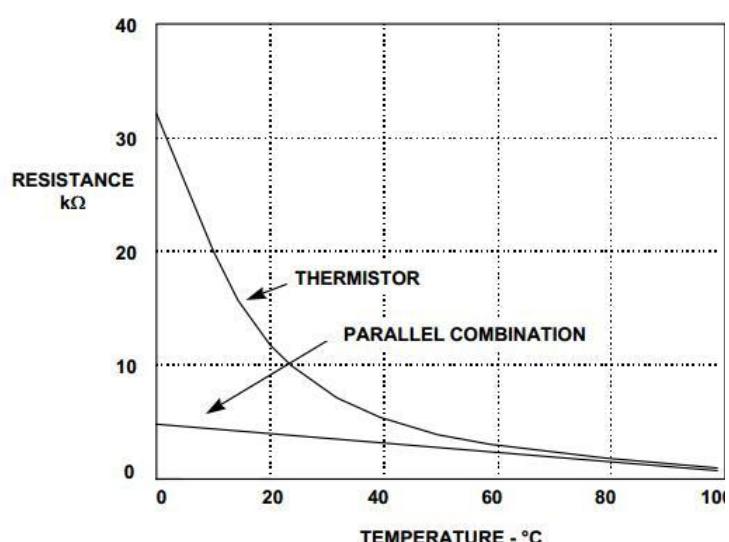
Il valore della resistenza da inserire viene calcolato tramite l'equazione:

$$R = \frac{RT_2 \cdot (RT_1 + RT_3) - 2 \cdot RT_1 \cdot RT_3}{RT_1 + RT_3 - 2 \cdot RT_2}$$

RT1 è il valore del termistore alla temperatura inferiore T1, RT3 al valore superiore T3 e RT2 al valore medio $T_2 = (T_1 + T_3)/2$.

Per un valore tipico 10kΩ, con RT1 = 32,650Ω a 0°C, RT2 = 6,532Ω a 35°C, RT3 = 1,752 Ω a 70°C, il valore R = 5.17 kΩ

LINEARIZATION OF NTC THERMISTOR USING SHUNT RESISTOR



Caratteristiche essenziali

- *Campo di misura*: -100 ÷ +150 °C (-30 ÷ +100 °C per versioni lineari)
- *Linearità*: limitata
- *Riproducibilità*: limitata
- *Sensibilità*: elevatissima

Il Termistore viene spesso utilizzato in sistemi di protezione termica nei quali l'elevato guadagno e la notevole non linearità sono utilizzati per realizzare un sensore ad uscita logica, in grado di rilevare il superamento di una certa soglia di temperatura. La realizzazione a semiconduttore lo rende abbastanza delicato ed inadatto ad impieghi in condizioni di elevato stress meccanico.

Principali problemi di interfacciamento

Se usato come sensore continuo il Termistore si interfaccia come un RTD. Se usato come rivelatore di soglia termica, una volta alimentato (in tensione o in corrente) va accoppiato con un circuito comparatore opportunamente calibrato.

Per un'accurata misura della relazione resistenza/temperatura dei termistori NTC si usa l'equazione di **Steinhart-Hart** che consente un'approssimazione del terzo ordine.

$$T(R) = \left(A_1 + B_1 \ln \frac{R}{R_{ref}} + C_1 \ln^2 \frac{R}{R_{ref}} + D_1 \ln^3 \frac{R}{R_{ref}} \right)^{-1}$$

I parametri A1, B1, C1, D1 vengono forniti dal costruttore del termistore (<http://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Thermistor23816403-1.pdf>) L'equazione di Steinhart-Hart permetterà di ricavare il valore di temperatura espresso in Kelvin [K]

Per il termistore **Vishay NTCLE-100E-3103 10k** termistore a basso costo ma con buona precisione che può essere utilizzato in una vasta gamma di applicazioni si trova:

$$\begin{aligned} R_{ref} &= 10000 \\ A_1 &= 0.00335402 \\ B_1 &= 0.000256985 \\ C_1 &= 2.62013E-6 \\ D_1 &= 6.38309E-8 \end{aligned}$$

Tipicamente un termistore può avere una resistenza Rref di 5000 Ω a 25 °C e una variazione di tale resistenza dell'ordine del 4%/°C.

Quindi, un grado di variazione di temperatura provoca una variazione di resistenza pari a $0.04(\Omega/\Omega)/^\circ\text{C} \cdot 5000\Omega \cdot 1^\circ\text{C} = 200 \Omega$. Non ci sono particolari problemi a rilevarla; anche se utilizziamo in serie dei cavetti per la misura che abbiano una resistenza, poniamo, di 10 Ω, l'errore corrispondente in termini di temperatura è di $10\Omega/200(\Omega/^\circ\text{C}) = 0,05^\circ\text{C}$.

Assolutamente trascurabile.

Termistori KTY (PTC)

Un sottogruppo dei termistori PTC è rappresentato dai termistori **KTY** ideati dalla Siemens e realizzati con l'impiego del silicio.

Il vantaggio principale di tali dispositivi consiste nel metodo di misura della resistenza basato sul principio della spreading-resistance: con tale tecnica il valore della resistenza misurato (e quindi quello di temperatura ad esso legato) è indipendente dalle dimensioni della zona di silicio in cui si effettua la misura, eliminando di conseguenza gran parte delle tolleranze costruttive legate ad imperfezioni nella fabbricazione.

Nello strato di ossido che riveste il wafer di silicio si effettua un foro metallizzato in cui si va a rilevare il valore della resistenza; si dimostra che, nell'ipotesi di dimensioni del foro ridotte rispetto a quelle del wafer di silicio, tale valore è:

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot \delta}$$

Dove:
 ρ è la resistività del silicio (che dipende dal drogaggio)
 δ è il diametro del foro (parametro meccanico)

Per comprendere il meccanismo di funzionamento occorre ricordare che il cristallo di silicio viene drogato con atomi donatori (tipo n) in modo abbastanza intenso.

In tal modo la conduzione è governata dal numero degli elettroni derivanti dal drogaggio e non dalle coppie elettrone-lacuna del semiconduttore.

L'aumento della temperatura determina un incremento dell'agitazione termica degli atomi di silicio del reticolo cristallino.

Ne consegue sia la generazione di coppie elettrone-lacuna (che incrementa la conduzione) dovuta alla rottura di legami covalenti, sia una maggiore difficoltà nel movimento degli elettroni di conduzione.

Pertanto nel campo di temperatura in cui le coppie elettrone-lacuna sono numericamente poco rilevanti, la resistività del materiale cresce all'aumentare della temperatura poiché la conduzione affidata agli elettroni risulta ostacolata dalle vibrazioni del reticolo.

Per i termistori KTY è possibile esprimere la relazione che lega la resistenza alla temperatura mediante la seguente formula:

$$R_T = R_{25} \cdot (1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2)$$

R_T è la resistenza alla temperatura T [$^{\circ}\text{K}$]

R_{25} è la resistenza alla temperatura di 25°C

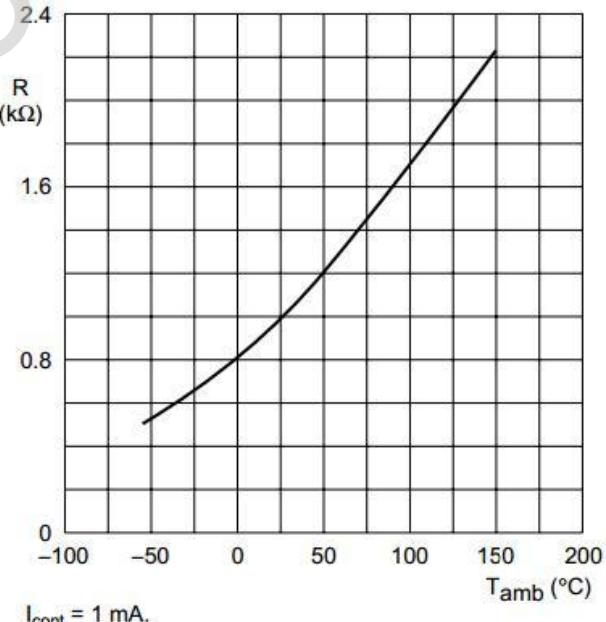
$$\alpha = 0.00784 [\text{K}^{-1}]$$

$$\beta = 1.874 \cdot 10^{-5} [\text{K}^{-2}]$$

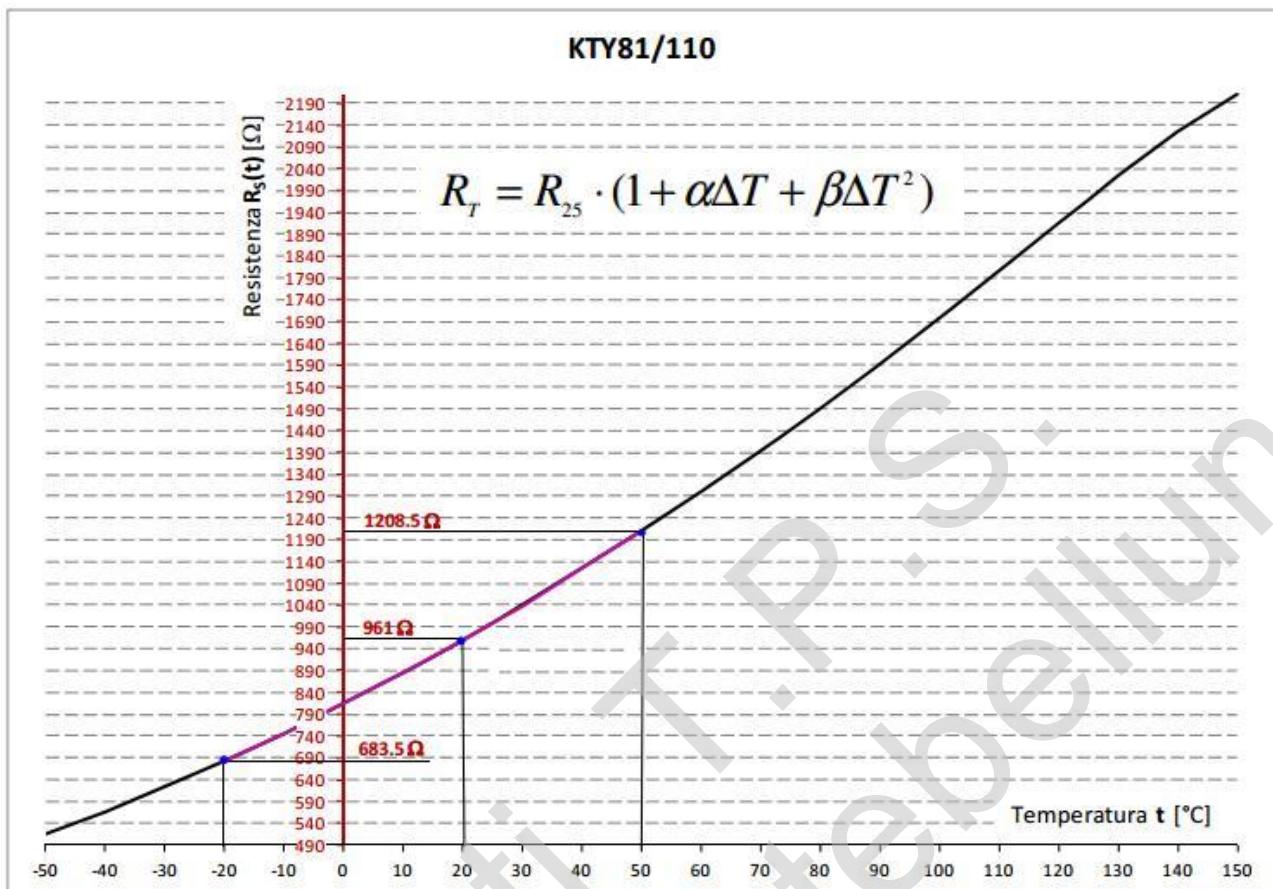
Anche per i termistori KTY esiste il problema dell'autorisaldamento, essendo la sensibilità alla temperatura maggiore che nel caso delle Pt100, occorre scegliere in modo accurato la corrente di alimentazione dell'elemento sensibile onde evitare marcate imprecisioni nella misura.

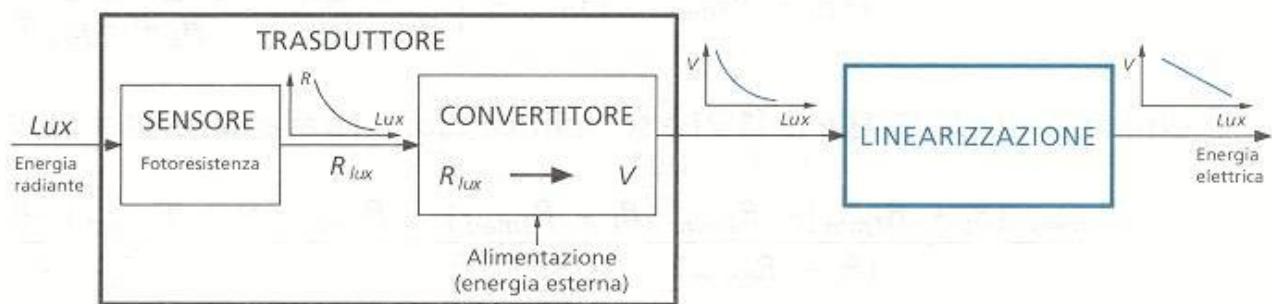
I costruttori forniscono solitamente dei grafici dell'errore di misura in funzione della corrente di alimentazione, nonché il valore consigliato della corrente stessa.

Rif. [PTC] - KTY81

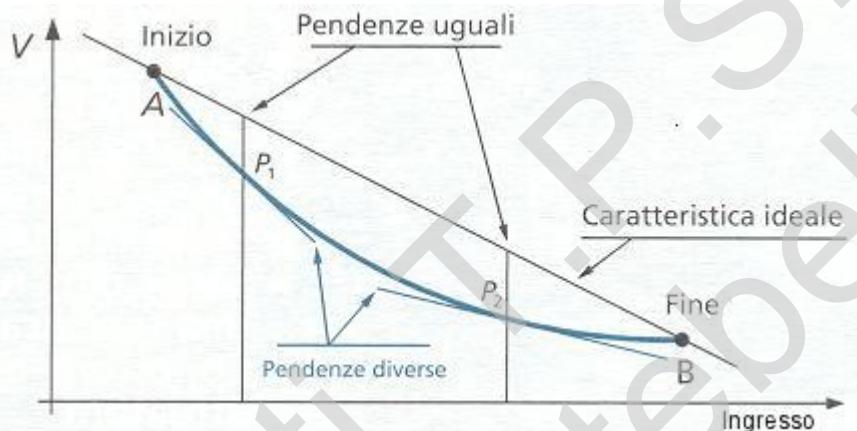


Sensor resistance as a function of ambient temperature; average values.





Poiché la non linearità della caratteristica di un trasduttore non dà proporzionalità tra la grandezza fisica controllata e la grandezza elettrica d'uscita è necessario linearizzare la caratteristica, ossia correggerla in modo da renderla lineare affinché il sistema di misura sia ad elevata precisione

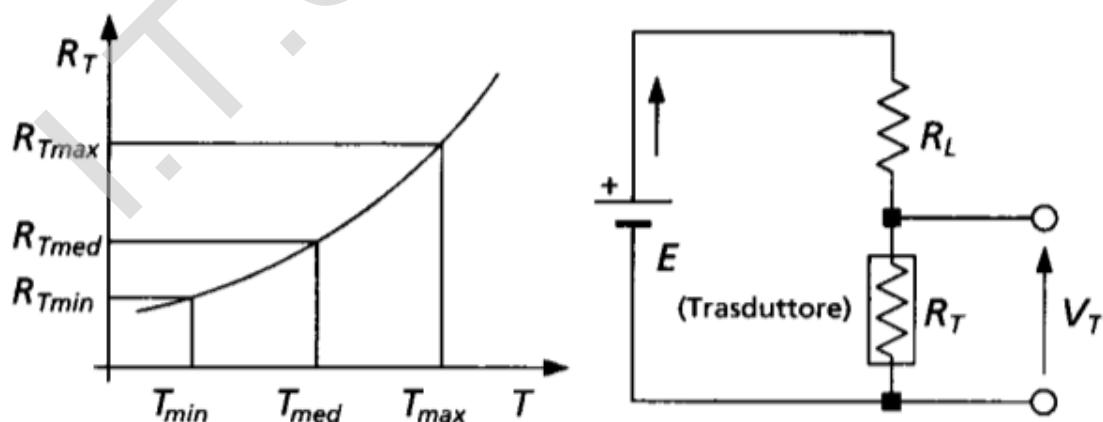


Il processo di linearizzazione può essere fatto utilizzando tecniche diverse e più o meno sofisticate, sia via software sia con circuiti hardware.

- Ø Nel primo caso si opera con appositi programmi oppure correggendo i valori già acquisiti, confrontandoli con altri preventivamente registrati in una tabella posta in memoria.
- Ø Nel secondo caso si utilizzano componenti quali amplificatori particolari o circuiti che hanno una curva di risposta complementare a quella del trasduttore.

Nella figura è riportata la caratteristica di un trasduttore non lineare.

Per linea rizzare la caratteristica esponenziale di un trasduttore di temperatura a variazione di resistenza si utilizza una resistenza di linearizzazione R_L collegata in serie alla resistenza R_T del trasduttore.



Lo schema precedente converte la variazione della resistenza R_T , provocata dalla variazione di temperatura T , in una variazione di tensione V_T utilizzabile nei circuiti elettronici.

Si osservi che il circuito proposto fornisce una nuova caratteristica tra la tensione V_T e la temperatura T .

Per calcolare la resistenza di linearizzazione R_L è necessario fissare il range di temperatura T e calcolare il valore medio della temperatura.

Indicando con T_{min} la temperatura minima e con T_{max} quella massima si ha la T_{med} :

$$T_{med} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

Il circuito di linearizzazione proposto modifica la caratteristica T/V_T se è verificata la seguente uguaglianza

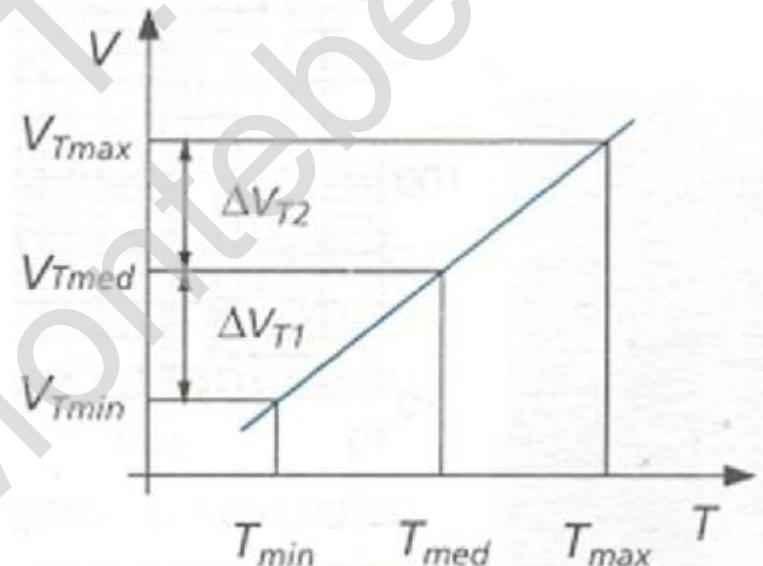
$\Delta V_{T1} = \Delta V_{T2}$	ΔV_{T1} variazione di tensione nel range di temperatura $T_{med} + T_{max}$
	ΔV_{T2} variazione di tensione nel range di temperatura $T_{min} + T_{med}$

Detti R_{Tmin} , R_{Tmed} e R_{Tmax} le resistenze del trasduttore rispettivamente alle temperature T_{min} , T_{med} e T_{max} , dal circuito sopra si ricavano i valori delle tensioni V_{Tmin} , V_{Tmed} e V_{Tmax} [partitore di tensione]

$$V_{T\ min} = \frac{R_{T\ min}}{R_L + R_{T\ min}} E$$

$$V_{Tmed} = \frac{R_{Tmed}}{R_L + R_{Tmed}} E$$

$$V_{Tmax} = \frac{R_{Tmax}}{R_L + R_{Tmax}} E$$



Le variazioni di tensioni ΔV_{T1} e ΔV_{T2} , in funzione delle rispettive variazioni di temperatura, sono:

$$\Delta V_{T1} = V_{Tmed} - V_{Tmin} = \left[\frac{R_{Tmed}}{R_L + R_{Tmed}} - \frac{R_{T\ min}}{R_L + R_{T\ min}} \right] E$$

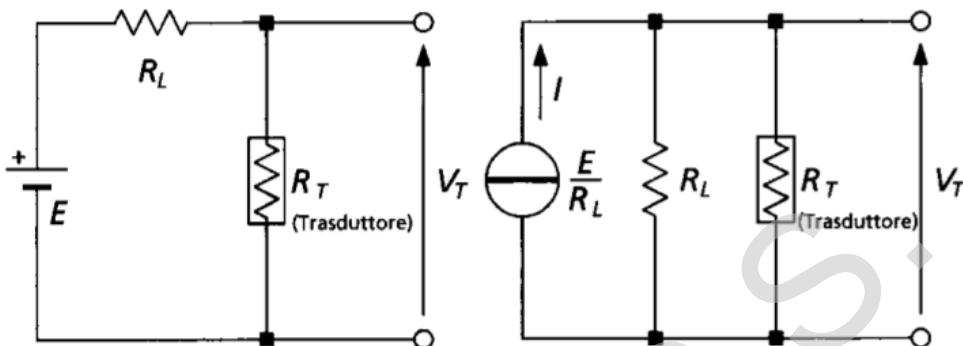
$$\Delta V_{T2} = V_{Tmax} - V_{Tmed} = \left[\frac{R_{Tmax}}{R_L + R_{Tmax}} - \frac{R_{Tmed}}{R_L + R_{Tmed}} \right] E$$

Uguagliando le due equazioni sopra e semplificando, si ricava la resistenza di linearizzazione

$$R_L = \frac{R_{Tmed}(R_{T\ min} + R_{T\ max}) - 2R_{T\ min} \cdot R_{T\ max}}{R_{T\ min} + R_{T\ max} - 2R_{Tmed}}$$

Poiche la resistenza R_L dipende solo dai valori delle resistenze $R_{T\min}$, $R_{T\text{med}}$ e $R_{T\max}$.la formula trovata può essere utilizzata per tutti i trasduttori a variazione di resistenza con caratteristiche non lineari, indipendentemente dal tipo di grandezza fisica rilevata.

La linearizzazione della caratteristica del trasduttore può essere fatta sia con un collegamento serie sia con un collegamento parallelo, poiché quest'ultimo deriva dal primo applicando il teorema di Norton



Linearizzare la caratteristica R/T della NTC K25 nel range di temperatura.

Tipo	$R (\Omega)$	Tolleranza	$B [K]$
K 25 - 1K	1 K Ω	20 %	3530

Si calcolano i valori delle resistenze :

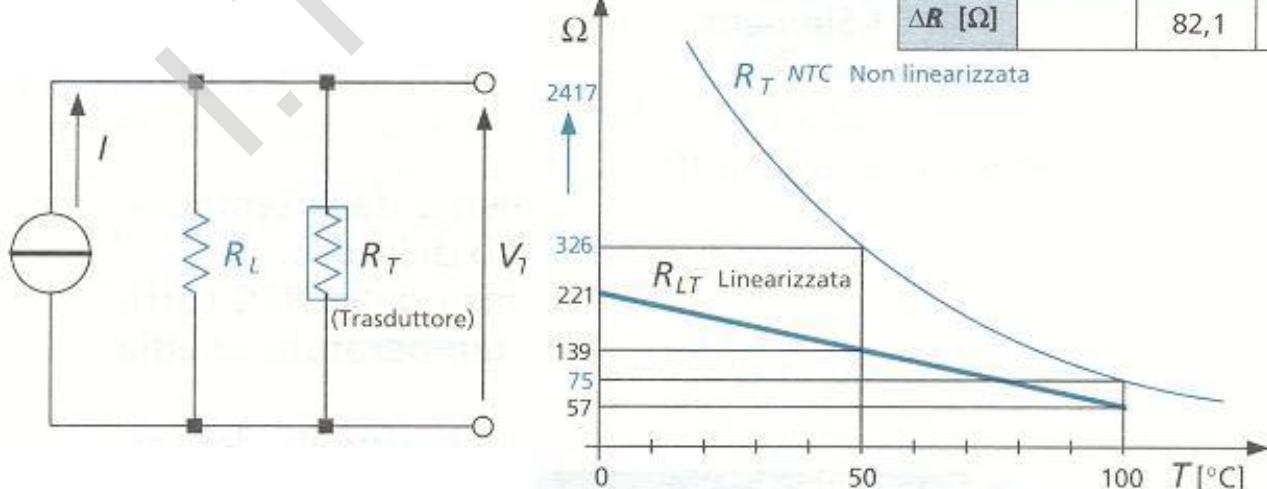
Tmin	$0^\circ\text{C} = 273 \text{ }^\circ\text{K}$	$R_{T\min} = 2417 \Omega$	$\Delta R \% = - 641 \%$
Tmed	$50^\circ\text{C} = 323 \text{ }^\circ\text{K}$	$R_{T\text{med}} = 326 \Omega$	
Tmax	$100^\circ\text{C} = 373 \text{ }^\circ\text{K}$	$R_{T\max} = 75 \Omega$	$\Delta R \% = + 76,9 \%$

Con i valori precedenti si calcola il valore della resistenza di linearizzazione $R_L = 244 \Omega$

La linearizzazione della caratteristica può essere verificata tramite un circuito parallelo tra la resistenza R_T del trasduttore e la R_L di linearizzazione e calcolando i valori delle resistenze equivalenti alle diverse temperature.

ReqTmin	$0^\circ\text{C} = 273 \text{ }^\circ\text{K}$	$R_{T\min} = 221,62 \Omega$
ReqTmed	$50^\circ\text{C} = 323 \text{ }^\circ\text{K}$	$R_{T\text{med}} = 139,5 \Omega$
ReqTmax	$100^\circ\text{C} = 373 \text{ }^\circ\text{K}$	$R_{T\max} = 57,35 \Omega$

$T [^\circ\text{C}]$	0	50	100
$T [\text{K}]$	273	323	373
$R_T [\Omega]$	2417	326	75
$R_{TL} [\Omega]$	221,6	139,5	57,3
$\Delta R [\Omega]$		82,1	82,2



Sensori di temperatura con c.i.

In un diodo polarizzato direttamente la relazione corrente-tensione (I V) è:

$$I = I_s \cdot e^{\frac{V}{nV_T}} = I_s \cdot e^{\frac{qV}{nkT}}$$

Dove:

I_s è la corrente inversa di saturazione [dell'ordine dei $10^{-6} \div 10^{-9}$ A] dipendente dalla temperatura

n è una costante empirica dipendente dal tipo di semiconduttore usato [$n=2$ per Si, $n=1$ per il Ge]

V_T è la tensione termica [25 mV alla temperatura di $27^\circ C$]

k è la costante di Boltzmann [$1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K]

q è la carica dell'elettrone [$1.6 \cdot 10^{-19}$ C]

T è la temperatura [$^\circ K$]

Tale relazione porta alla formulazione inversa pari a:

$$V = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_s}\right)$$

Ricordando che I_s dipende anche dalla temperatura, tramite opportuni passaggi, si arriva a una relazione tensione-temperatura del tipo:

$$V = \frac{E_g}{q} - \frac{kT}{q} \cdot (\ln C - \ln I)$$

Dove:

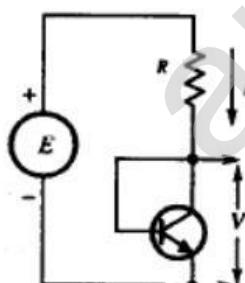
E_g è il gap di energia del materiale

C è una costante del materiale indipendente dalla temperatura

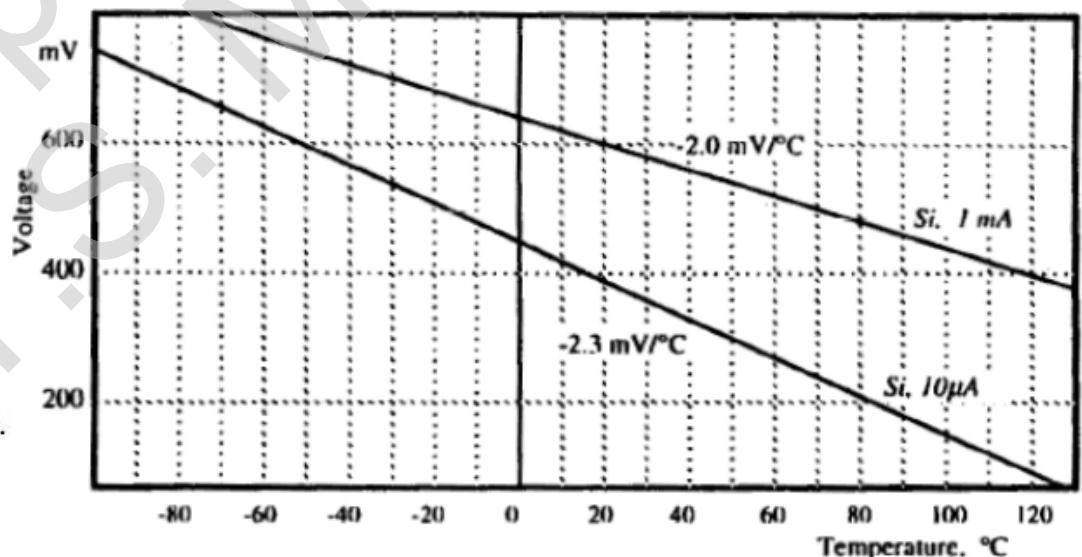
Pertanto, quando la giunzione è alimentata a corrente costante, la tensione varierà linearmente con la temperatura, ottenendo una sensibilità pari a:

$$S = \frac{\partial V}{\partial T} = -\frac{k}{q} \cdot (\ln C - \ln I)$$

Tipicamente per un diodo al silicio, con corrente pari a 1 mA, il valore di S è **-2 mV/ $^\circ C$** , ossia la tensione ai suoi capi diminuirà di 2 mV in corrispondenza di un aumento di temperatura di $1^\circ C$.



Transistor connesso a diodo.



Il discorso è equivalente nel caso di un transistor "connesso a diodo" (VBE = VCE), per cui è richiesto un opportuno circuito di polarizzazione.

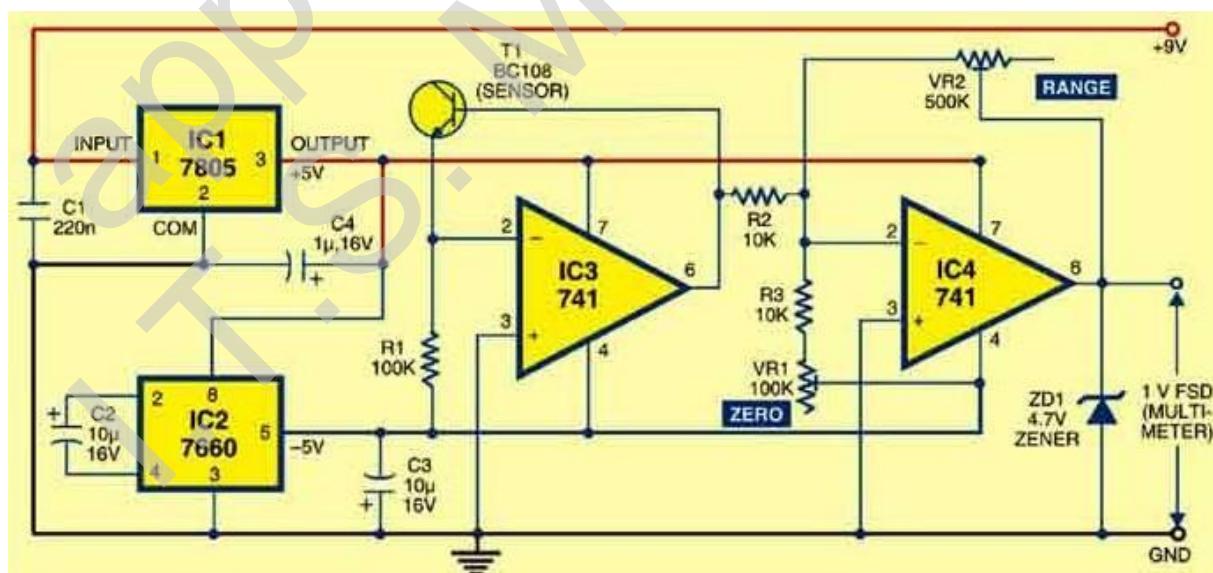
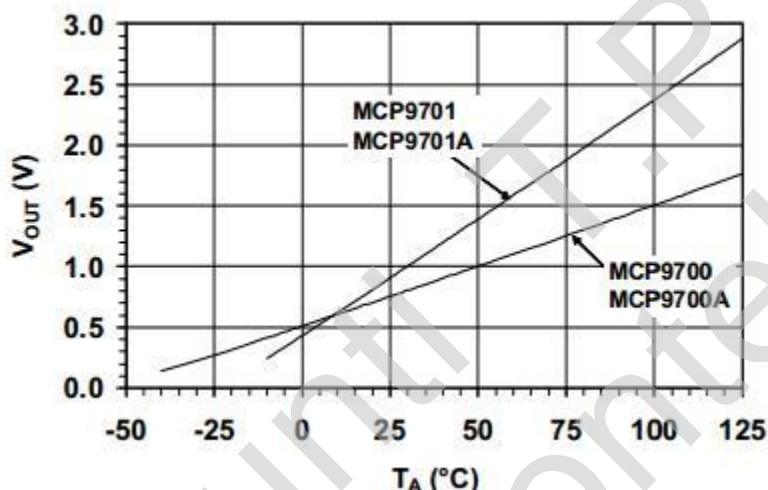
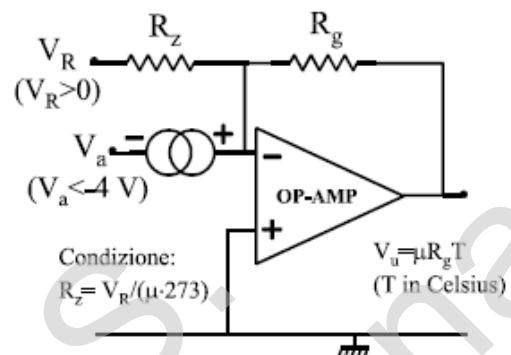
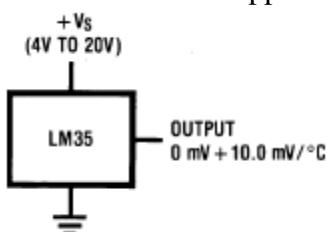
Recentemente sono stati introdotti sul mercato sensori di temperatura realizzati con circuiti integrati monolitici. Sono disponibili sia in configurazione in corrente che in tensione.

Caratteristiche comuni sono l'elevata linearità e l'uscita proporzionale alla temperatura assoluta. Tipiche costanti di proporzionalità sono $1 \mu\text{A}/^\circ\text{K}$ oppure $10 \text{mV}/^\circ\text{K}$. A parte il pregiò della linearità hanno più o meno gli stessi pregi e difetti dei termistori e quindi sono economici, ma delicati ed utilizzabili in un range limitato di temperatura. Sono spesso utilizzati nella realizzazione di termometri digitali e nella compensazione delle Termocoppie.

$$I = K \cdot T \quad K = 1 \mu\text{A}/^\circ\text{K}$$

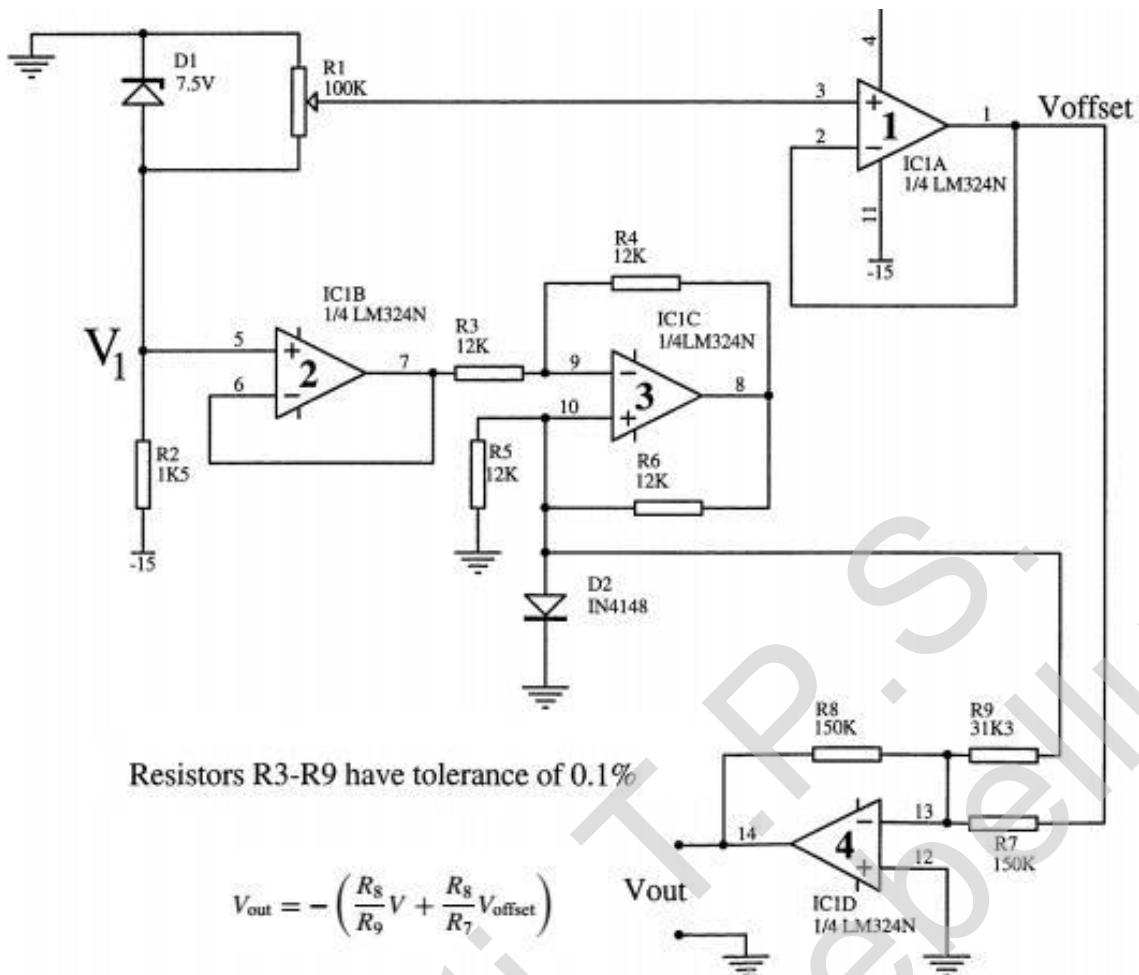


Sensore AD590.



Rif. LM35 – MCP9700A

Rif. AD590 Linear Current Output: $1 \mu\text{A}/^\circ\text{K}$

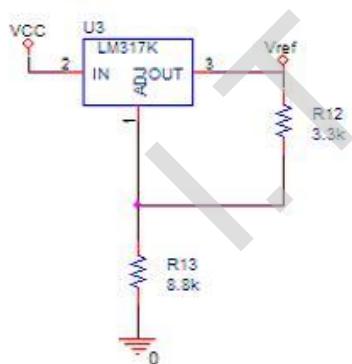
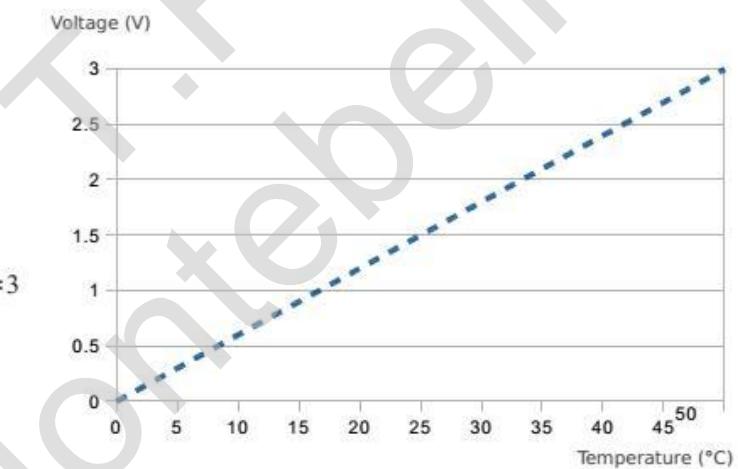
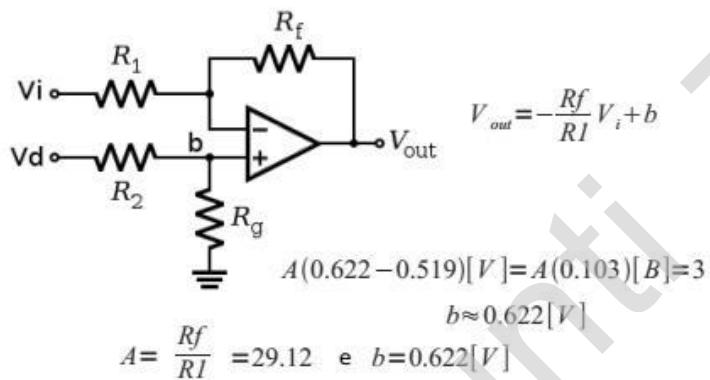
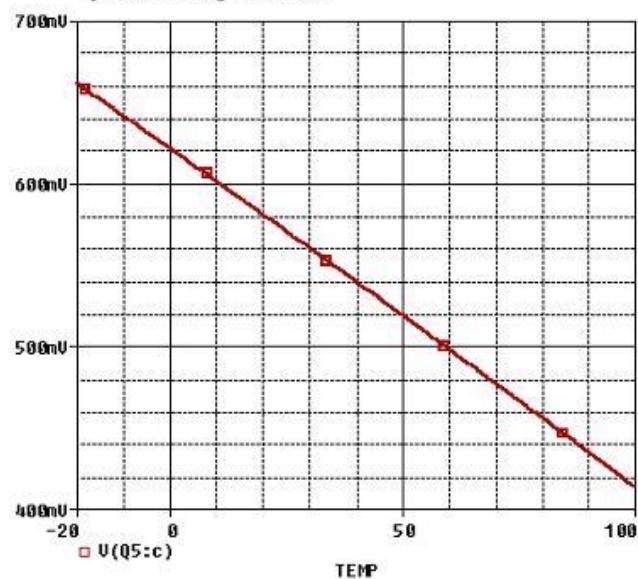


Signal conditioning circuit for the IN4148 silicon diode.

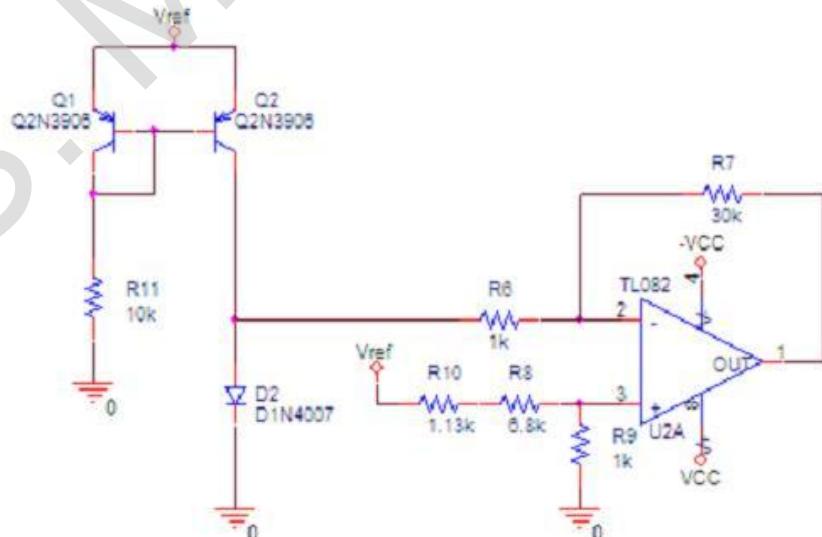
LM317K

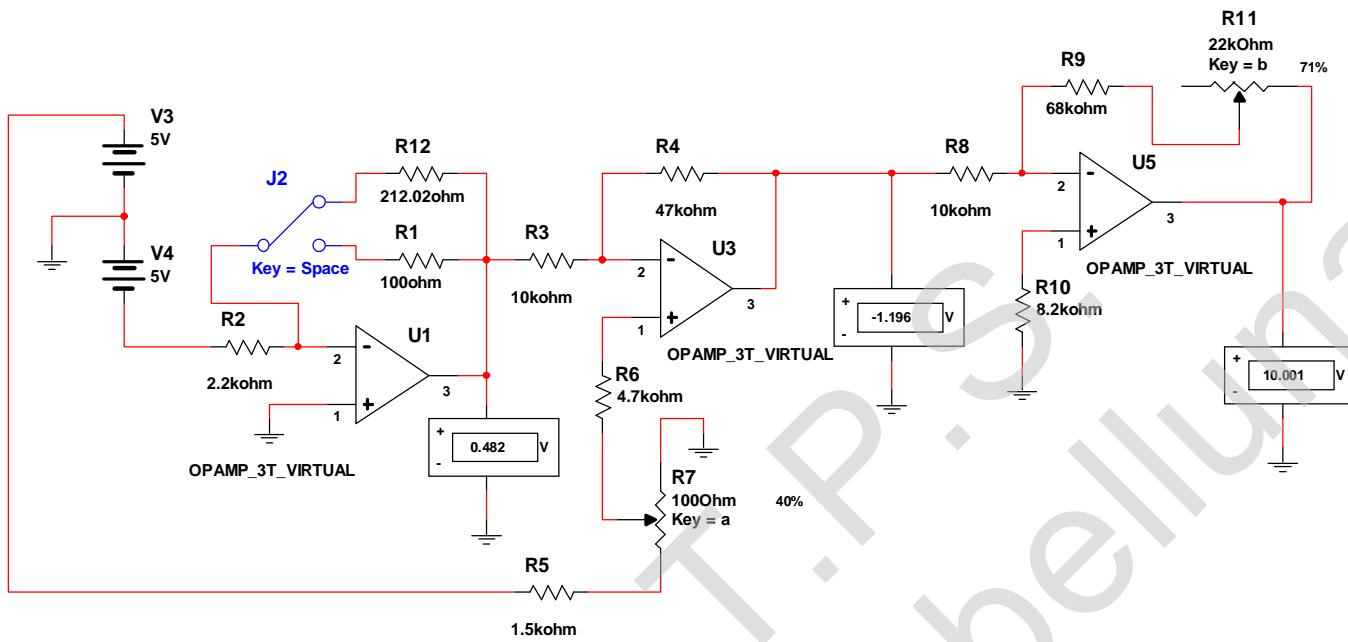
	Min.	Max
Temperature (C°)	0	50
Output Voltage (V)	0	3

: Junction voltage variation.

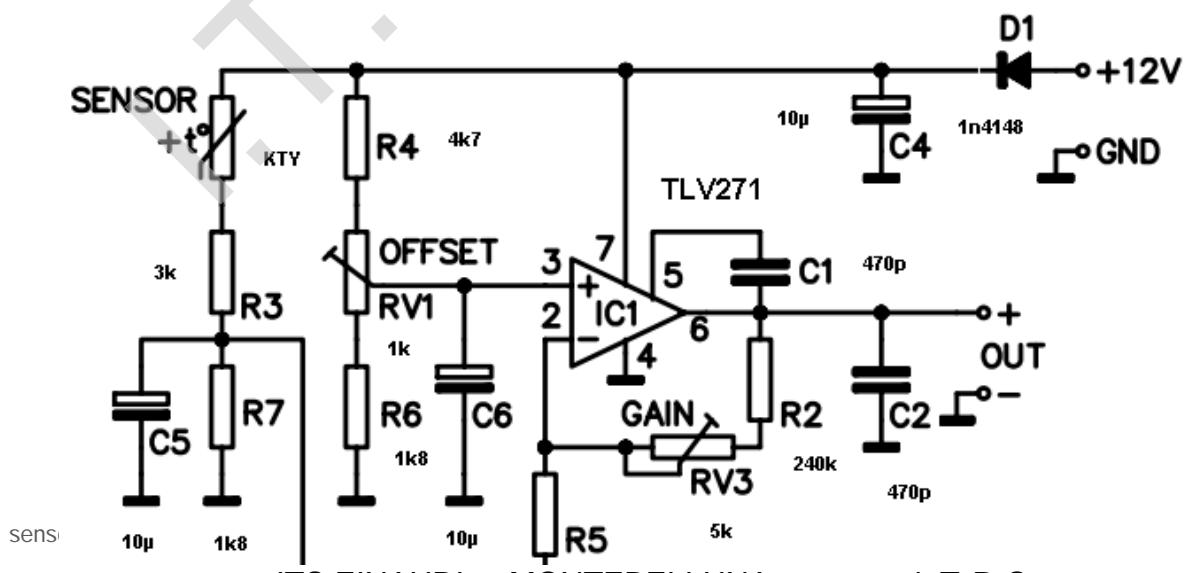
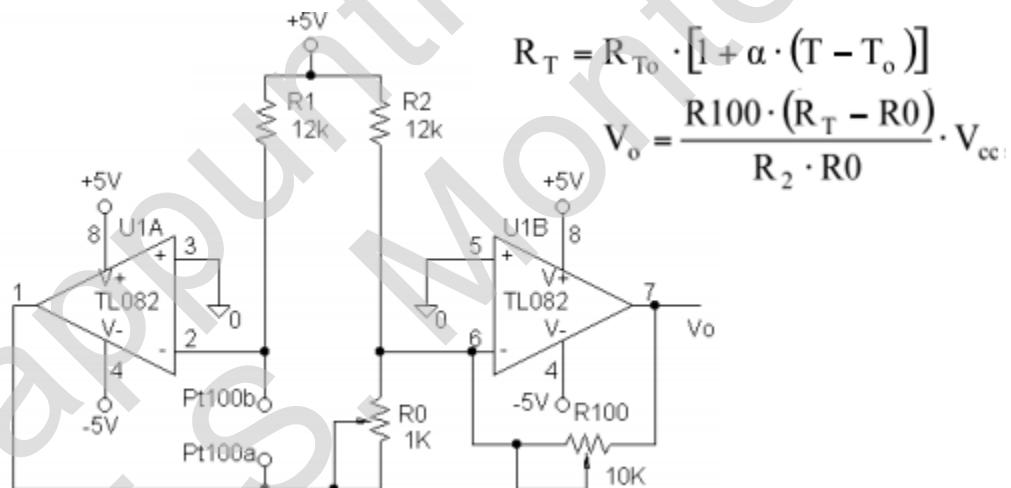


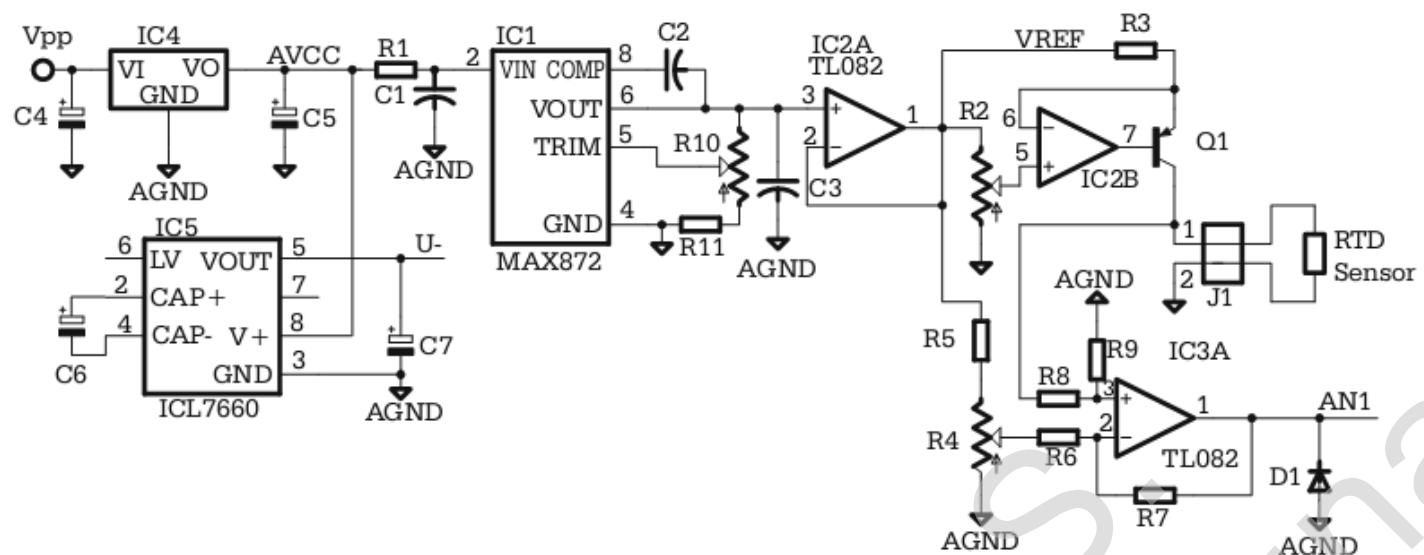
Voltage Reference circuit.



Circuito di condizionamento

Circuito di condizionamento per PT100





RTD PT100

MAX 872 => Vref 2,5V

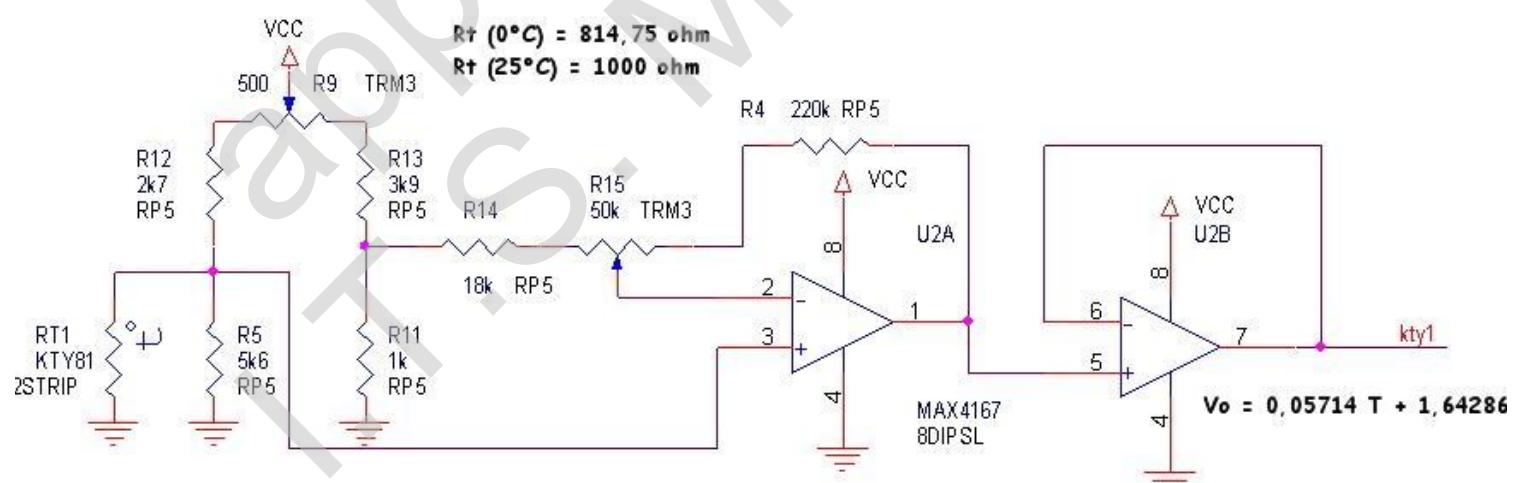
ICL7660 => -V (x alim duale op)

IC2B – Q1 – R3 => convertitore V-I per RTD [I = (Vref-V5)/R3) circa 2,5 mA]

IC3 => G =10

VAN1 = 10mv/C°

Linearizzazione e condizionamento per KTY81-110



Sensori di deformazione, pressione e forza

Quando una forza è applicata ad un corpo esso si deforma. Più che la deformazione assoluta è di solito interessante conoscere la deformazione per unità di grandezza. Nella letteratura tecnica questa deformazione relativa è definita come *strain* ed è indicata con il simbolo ϵ . In definitiva $\epsilon = \Delta L/L$ ed è quindi una grandezza adimensionale. Per mantenere un significato fisico allo *strain* spesso si associa ad esso l'unità di misura cm/cm. Nella maggior parte delle applicazioni il valore dello *strain* è piccolissimo (<0.005 cm/cm) e si preferisce esprimere in $\mu\epsilon$. Questa rappresentazione è equivalente ad esprimere la deformazione relativa in parti per milione o ppm. Vi sono molti modi per rilevare lo strain in un corpo, ma il sensore più utilizzato è l'*Estensimetro* o *Strain-gage*. E' poi evidente che dalla misura della deformazione di un corpo si può facilmente risalire alla pressione o alla forza esercitate sul corpo stesso. Pertanto, la maggior parte dei sensori di Pressione e Forza è basata sull'integrazione di uno o più estensimetri in una opportuna struttura meccanica atta a trasformare la pressione o la forza su di essa esercitata in una corrispondente deformazione. Nel seguito verrà analizzato in dettaglio l'estensimetro e verranno presentati alcuni schemi per il suo utilizzo nella realizzazione di sensori di pressione e di forza.



Estensimetro

Principio di funzionamento

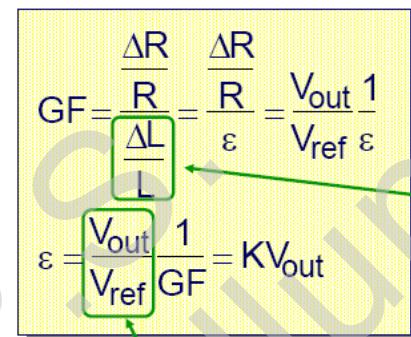
Si basa sull'effetto piezoresistivo secondo il quale la resistenza di un metallo o di un semiconduttore varia in presenza di deformazione meccanica.

Descrizione

Esistono sostanzialmente due tipi di estensimetri, quelli a semiconduttore e quelli metallici (a filo o a film). Gli *estensimetri a semiconduttore* possono essere realizzati in dimensioni piccolissime, hanno una grande sensibilità, ma presentano una caratteristica non lineare. Inoltre, la loro resistenza risulta molto dipendente dalla temperatura. Essi possono misurare deformazioni sia statiche che dinamiche. Per l'elevato costo e la relativa difficoltà di manipolazione essi sono solitamente utilizzati direttamente solo in applicazioni dove lo spazio a disposizione o il livello di deformazione risultino molto ridotti. Sono invece spesso usati per la realizzazione di sensori di pressione integrati ed anche di sensori di accelerazione. Nel contenitore trovano posto molto spesso anche i circuiti di condizionamento e di compensazione termica.

Gli *estensimetri metallici* sono decisamente quelli più usati. Essi sono realizzati deponendo su un apposito supporto (carrier matrix) una griglia fine di fili, come riportato in fig. seguente. Per l'uso il supporto è incollato all'oggetto, con opportuni adesivi.

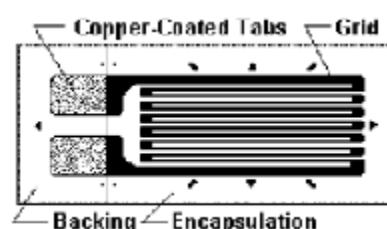
L'estensimetro metallico è disponibile a basso costo, in dimensioni molto contenute e risente in modo limitato della temperatura. La principale limitazione è la scarsa sensibilità.



misura raziometrica



Estensimetro - Caratteristiche tecniche essenziali		
Parametro	film metallico	semiconduttore
Gage factor	@ $2 \pm 1 \%$	@ $100 \pm 3\%$
Rnom (Ω)	120 - 350	molti valori
$\Delta R/\Delta T$ (p.p.m/ $^{\circ}\text{C}$)	5 - 50	100 - 500



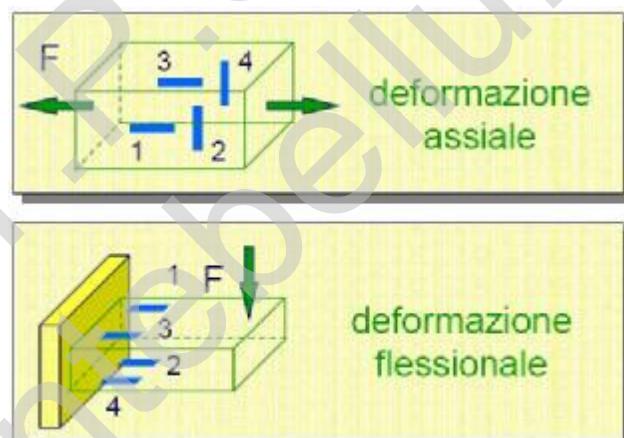
Principali problemi di Interfacciamento

Come per la termoresistenza si tratta di rilevare la variazione di resistenza in funzione della deformazione. A differenza di quella, la variazione di resistenza dell'estensimetro è legata alla variazione di dimensione dell'oggetto su cui l'estensimetro è collegato che risulta di solito abbastanza limitata. Ne consegue che le variazioni di resistenza risultano assai limitate e la loro misura diviene un compito non facile. Nella quasi totalità dei casi sia per estensimetri metallici che a semiconduttore si utilizza una configurazione a ponte di Wheatstone per trasformare la variazione di resistenza in una corrispondente di tensione.

Nella realizzazione del circuito di misura occorre fare attenzione ad alcuni particolari realizzativi.

1. Le resistenze nei tre rami inattivi devono mantenere inalterato il loro valore in presenza di deformazione. Per compensare le variazioni di resistenza con la temperatura dell'estensimetro spesso si usano altri tre estensimetri in sostituzione delle tre resistenze di compensazione.

Questo garantisce una buona corrispondenza dei valori iniziali di resistenza (soprattutto se si ordinano quaterne selezionate) e delle variazioni indotte dalla temperatura se i tre estensimetri ausiliari sono incollati sullo stesso supporto di quello di misura, purché in posizione non deformata. Ovviamente, disponendo di altri tre estensimetri, qualora lo spazio disponibile e la geometria del dispositivo meccanico lo permettano è possibile porre sotto deformazione anche due o quattro estensimetri, come mostrato in fig. seguente ottenendo così una maggiore sensibilità di risposta dal ponte (V_{out} maggiore a parità di deformazione).



Estensimetri incollati su una struttura metallica che si deforma con l'applicazione della forza

- 2.** Utilizzare un generatore di riferimento ad elevata stabilità o effettuare una misura raziométrica rispetto al riferimento o misurare anche il riferimento oltre al segnale. (radiometrico : la tensione di uscita è proporzionale alla tensione di alimentazione)
- 3.** Utilizzare un circuito di amplificazione ad elevata impedenza per non caricare il ponte ed alterare così la misura.
- 4.** Utilizzare estensimetri con un Gage-Factor costante e noto.
- 5.** Curare molto bene i collegamenti e le schermature per evitare che disturbi elettromagnetici si accoppino sui segnali (di solito assai piccoli) deteriorando il rapporto segnale rumore prima dell'amplificazione.

Considerazioni generali

L'estensimetro è un componente di largo utilizzo in diverse applicazioni. La versione metallica trova applicazione generalizzata per il basso costo e la grande affidabilità. La versione a semiconduttore è più difficile da manipolare e viene di solito utilizzata per la realizzazione di sensori a stato solido in configurazione a ponte di quattro estensimetri, che incorporano spesso anche il generatore di riferimento ed il circuito di amplificazione e compensazione termica.

Nell'utilizzo di estensimetri occorre prestare molta attenzione alla compatibilità del supporto e del materiale su cui esso viene incollato e del tipo di collante utilizzato. Esistono estensimetri appositamente realizzati per garantire buona corrispondenza con determinati materiali garantendo così che, in un limitato range di temperatura, le deformazioni indotte dalla temperatura sul materiale siano compensate dagli equivalenti effetti termici sull'estensimetro.

Sensore integrato di pressione

Viene di solito realizzato fissando ad una membrana flessibile due o quattro estensimetri in configurazione a ponte. Ai due lati della membrana è applicata una differenza di pressione che genera una deformazione ad essa proporzionale. Il ponte estensimetrico, opportunamente alimentato, trasforma la deformazione in una tensione elettrica. Le possibili realizzazioni si differenziano per:

- il materiale usato per la membrana ↔ metallo o silicio
- il tipo di estensimetro ↔ metallico, più spesso a semiconduttore
- il numero di estensimetri ↔ due o quattro
- la realizzazione meccanica ↔ misura di pressione differenziale o assoluta.

La pressione P è definita come la forza F esercitata su una superficie S

$$P = F / S$$

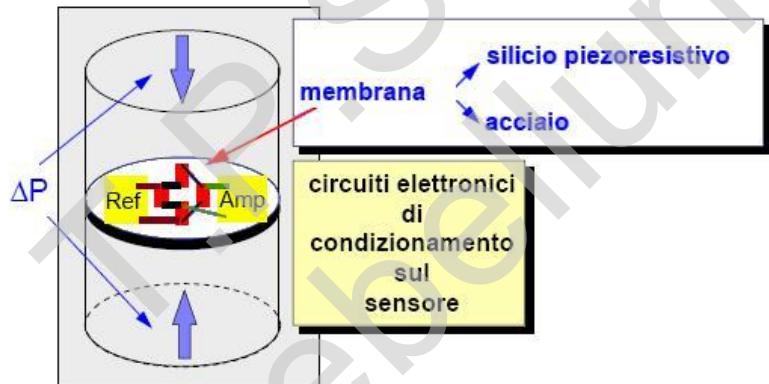
L'unità di misura è il Pascal
 $Pa = 1 \text{ Nw/m}^2$

Altre unità di misura :

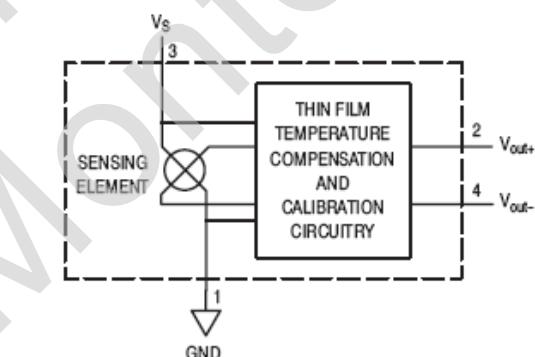
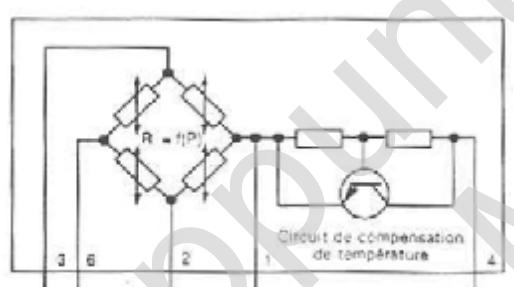
$$1 \text{ Bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Atm} = 1.012 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

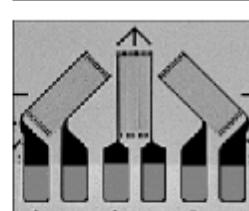
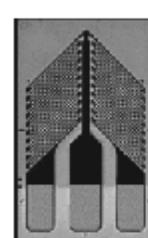
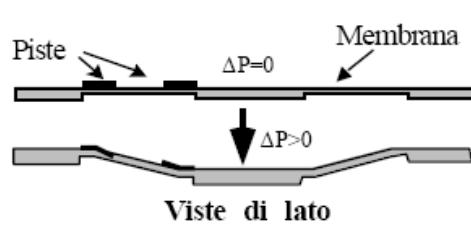
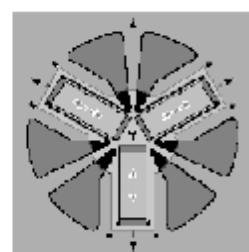
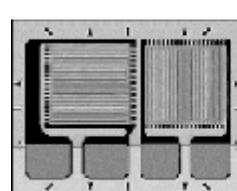
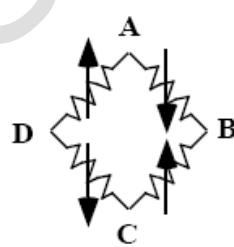
$$1 \text{ psi} = 6895 \text{ Pa}$$

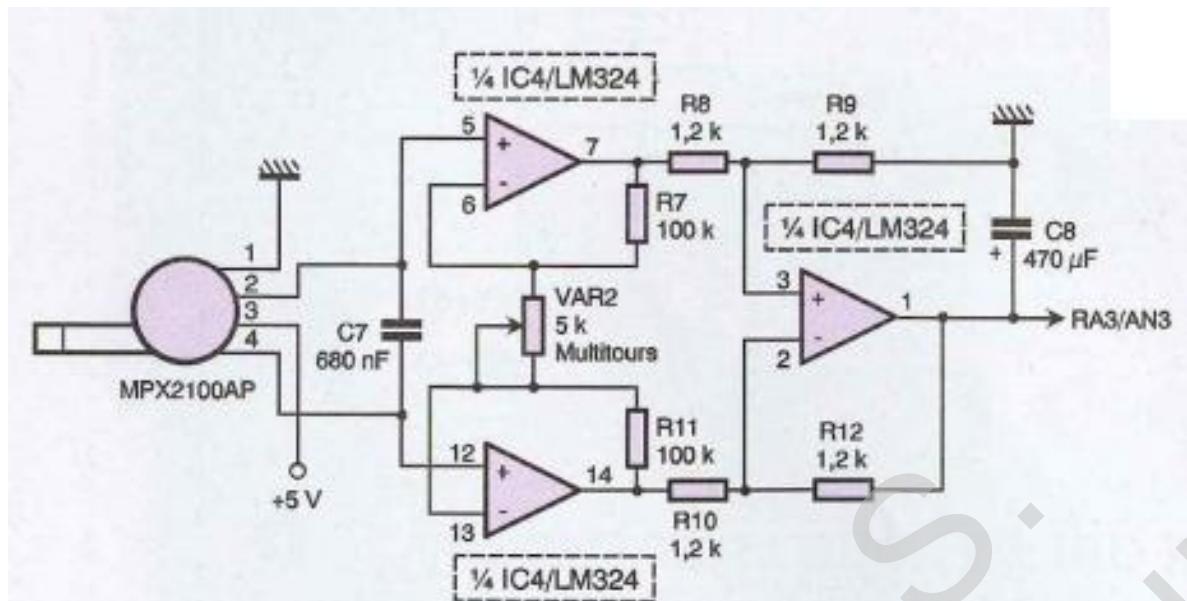
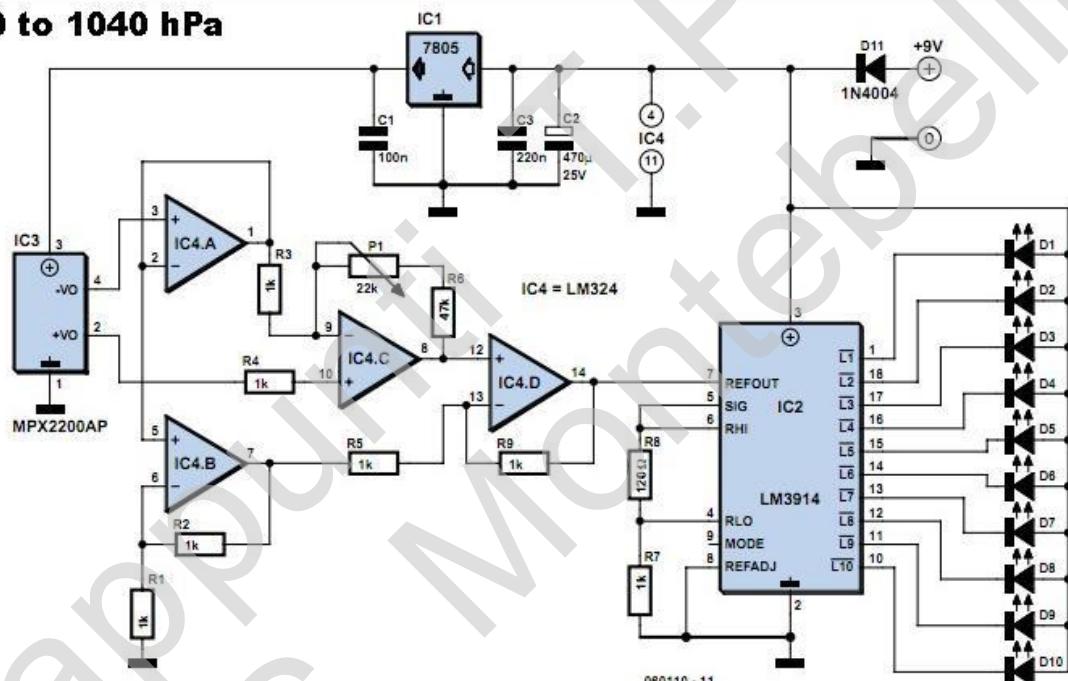


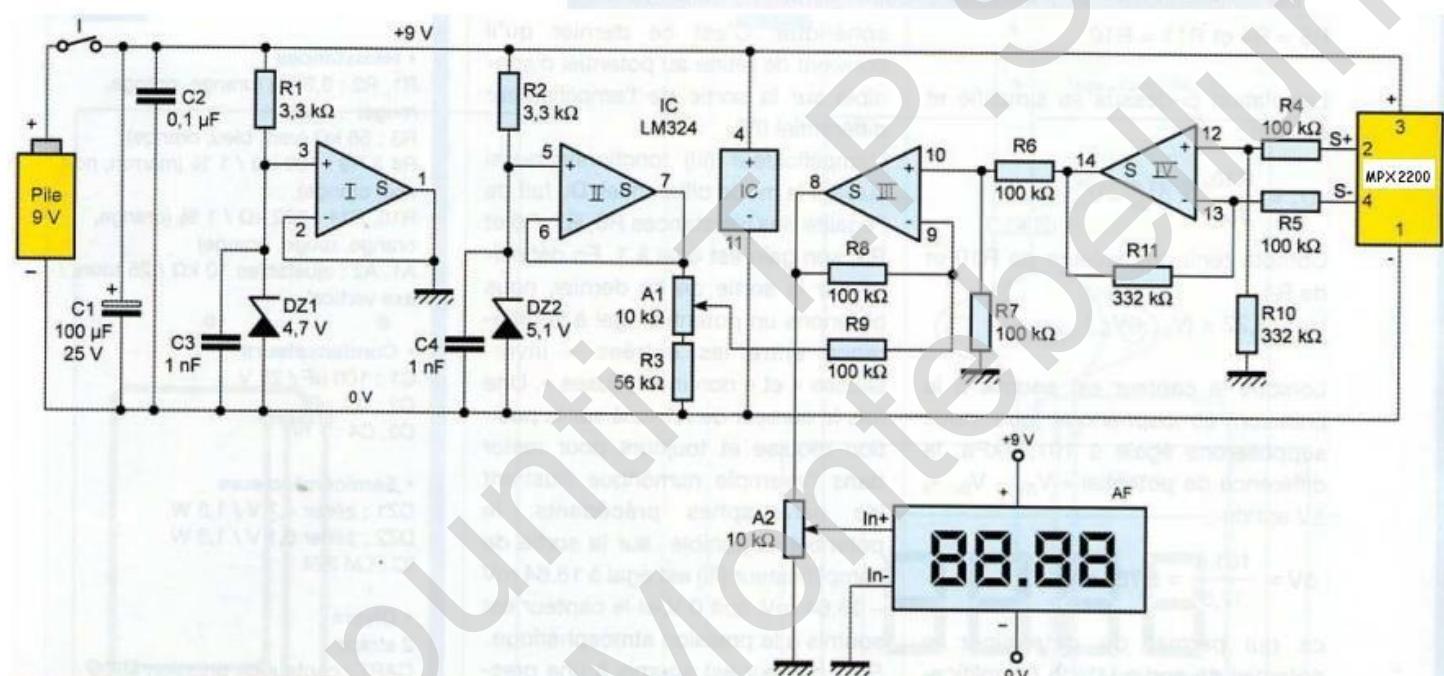
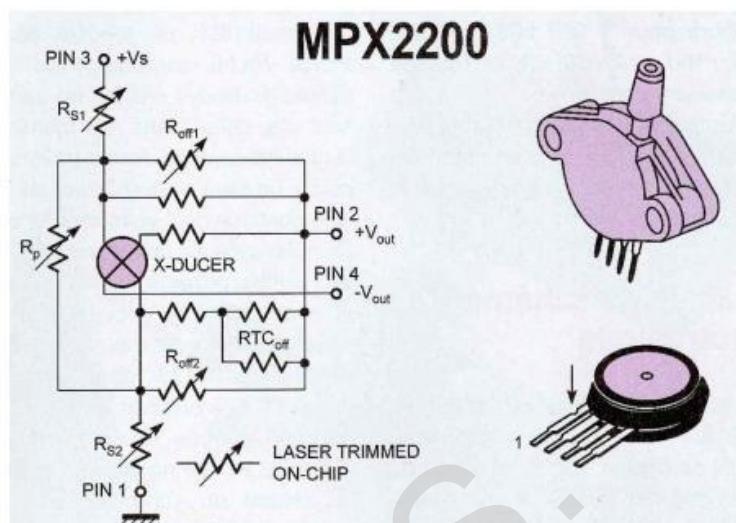
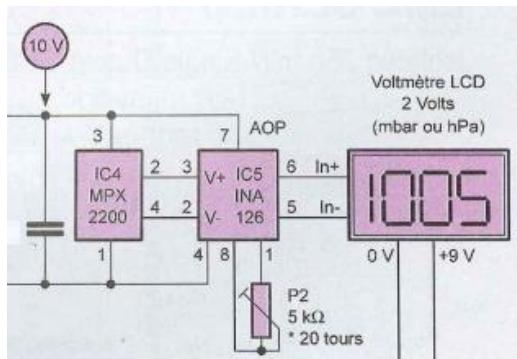
Rif. KP101A MPX200X MPX4115A



Temperature Compensated Pressure Sensor Schematic



**950 to 1040 hPa**



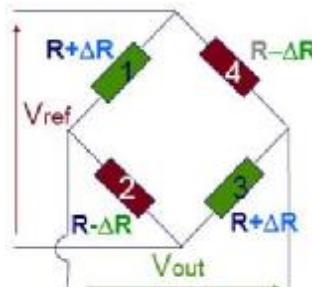
Micro Load Cell (0-5kg) - CZL635

Sensore di Forza/Peso

La realizzazione di sensori di forza richiede la definizione di un opportuno allestimento meccanico che trasformi la forza in una deformazione corrispondente in una zona del dispositivo dove allocare gli estensimetri. La misura più comune di forza è utilizzata nei sistemi di pesatura.

In questo caso il dispositivo meccanico di base su cui alloggiano gli estensimetri si chiama Cella di Carico.

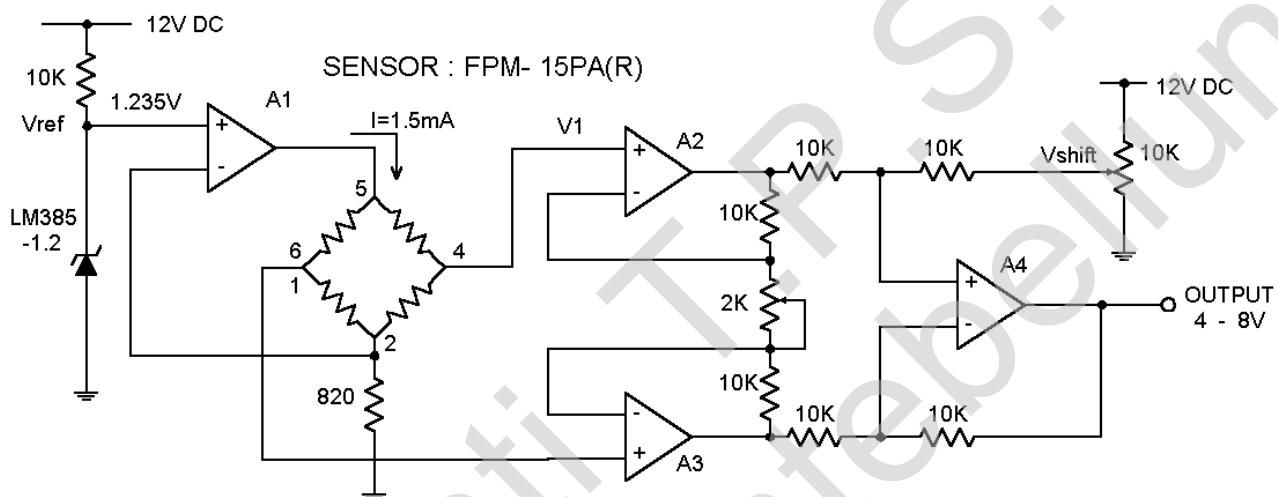
Sul mercato sono disponibili numerosissimi tipi di celle di carico per le più svariate applicazioni.



$$V_{out} = V_{ref} \left(\frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{R - \Delta R}{2R} \right) = V_{ref} \frac{\Delta R}{R}$$

relazione lineare

ponte intero di Wheatstone



Amplificatore differenziale

Impossibilità di avere resistenze uguali e con uguale coefficiente termico

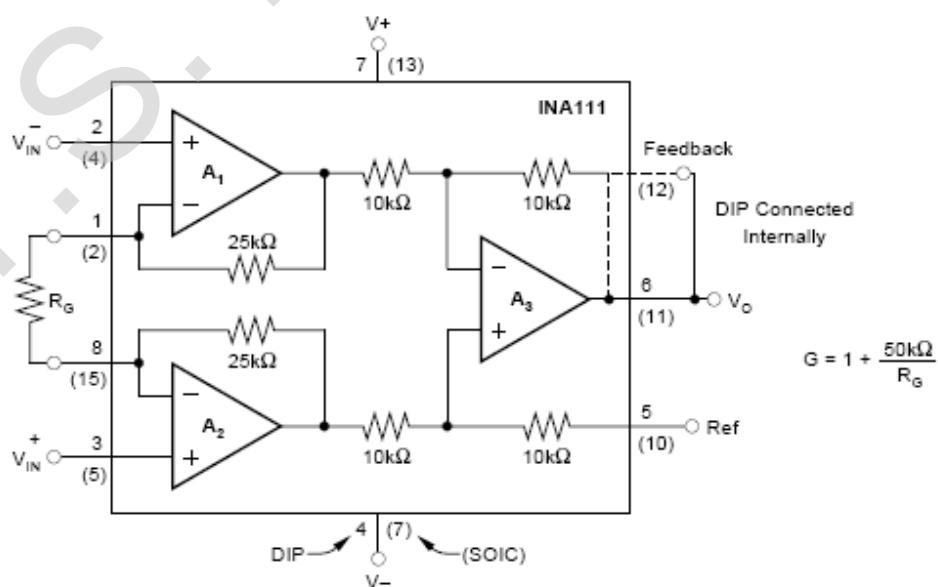
Impedenza di ingresso dipendente dal guadagno e sbilanciata

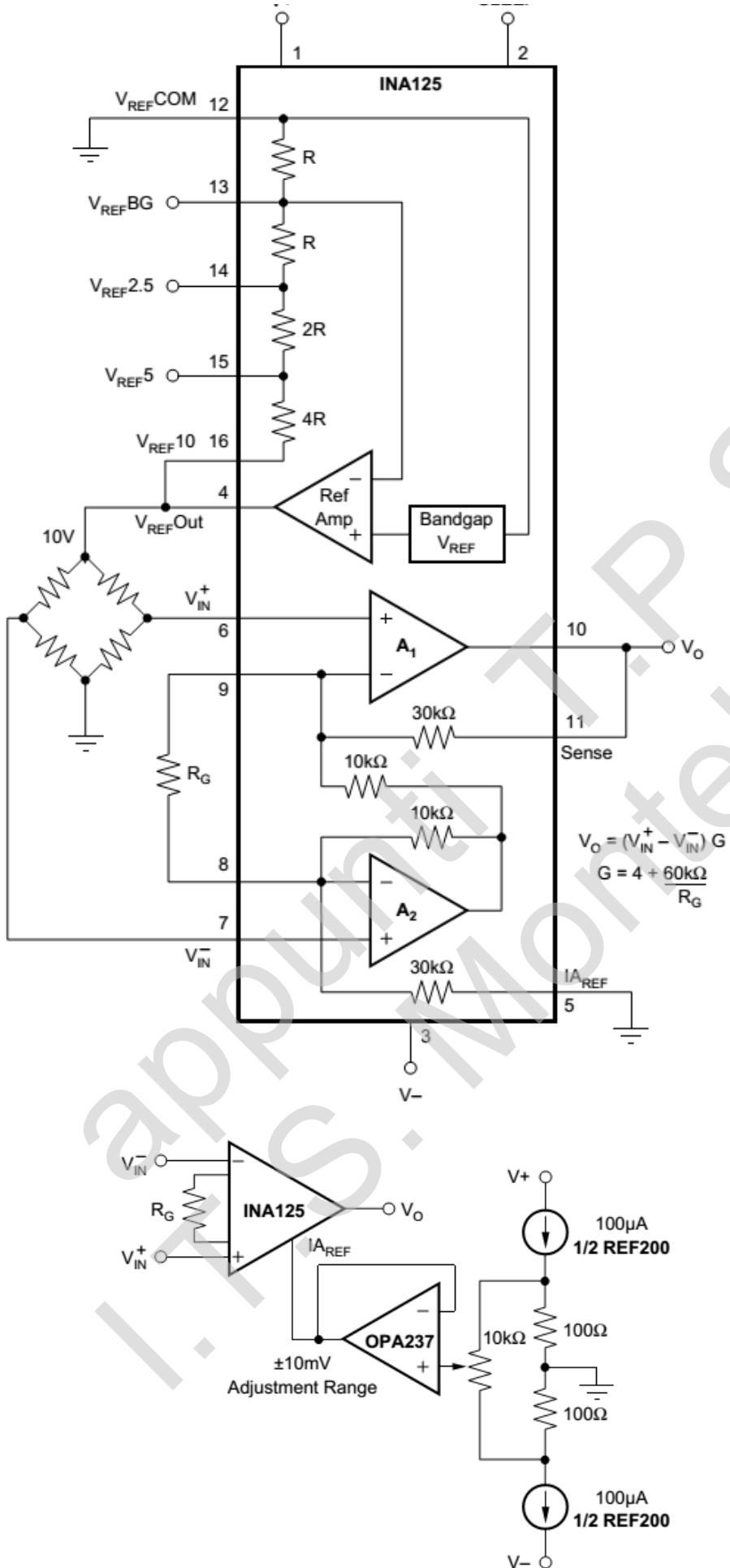
Non utilizzabile in applicazioni industriali ad elevato guadagno insieme ad un sensore

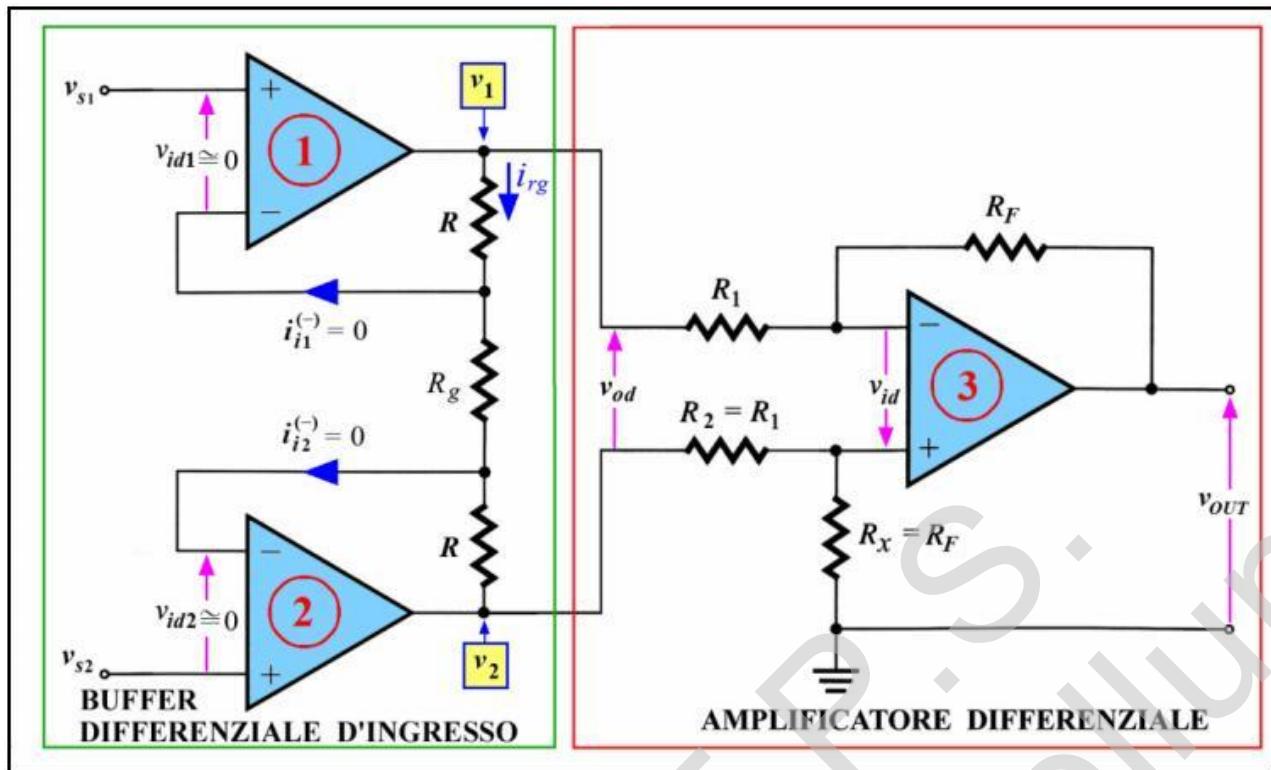
Si usa un amplificatore differenziale per strumentazione

Rif INA111 INA126

$$A = 1 + \frac{2R}{R_g}$$







il terzo operazionale, costituisce con le resistenze R_1 e R_F un amplificatore "sottrattore".
l'uscita sarà data da:

$$v_{OUT} = \left(-\frac{R_F}{R_1} \right) (v_1 - v_2) = \left(-\frac{R_F}{R_1} \right) \cdot v_{od}$$

nell'ipotesi di amplificatori operazionali ideali $i_{i1}^{(-)} = 0$ e $i_{i2}^{(-)} = 0$, si ha:

$$v_1 - v_2 = v_{od} = (R_g + 2R) \cdot i_{rg}$$

la tensione d'uscita diventa:

$$v_{OUT} = \left(-\frac{R_F}{R_1} \right) (v_1 - v_2) = \left(-\frac{R_F}{R_1} \right) \cdot (R_g + 2R) \cdot i_{rg}$$

In un amplificatore ideale gli ingressi sono equipotenziali, pertanto ai capi della resistenza R_g si trova la differenza di potenziale $v_{s1} - v_{s2}$. Conseguentemente la corrente i_{rg} che scorre in R_g sarà:

$$i_{rg} = \frac{v_{rg}}{R_g} = \frac{v_{s1} - v_{s2}}{R_g}$$

$$v_{OUT} = \left(-\frac{R_F}{R_1} \right) \cdot (R_g + 2R) \cdot i_{rg} = -(v_{s1} - v_{s2}) \left(1 + \frac{2R}{R_g} \right) \left(\frac{R_F}{R_1} \right)$$

Sensore di posizione

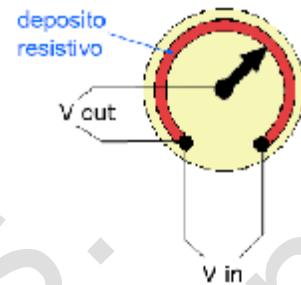
Potenziometro

Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento è basato sulla variazione di resistenza in un circuito elettrico determinata dallo spostamento dell'oggetto di cui si vuole misurare la posizione.

Descrizione

Il potenziometro è forse il più semplice sensore elettrico di posizione. È un sensore di tipo assoluto ed è disponibile sia in versione rotativa che lineare. Si tratta di un dispositivo in cui su un resistore fisso (realizzato a filo o a film) è collocato un cursore mobile. La resistenza del circuito compreso tra uno qualsiasi dei due terminali ed il cursore dipende ovviamente dalla posizione di quest'ultimo. Risulta evidente che il potenziometro è un sensore "modulante", in quanto per ricavare una informazione elettrica utile occorre inserirlo in un circuito in cui sia presente una sorgente di alimentazione ausiliaria. Come si vede analizzando il componente mediante la legge di Ohm, la tensione di uscita è una frazione di quella di alimentazione e pertanto l'azione meccanica (la grandezza da misurare) agisce modulando in uscita la tensione di alimentazione.



Caratteristiche essenziali

- **Risoluzione:** Nei potenziometri a filo dipende dal numero e dalla spaziatura delle spire; può essere anche migliore di 0.1% e cresce al crescere della resistenza totale (numero maggiore di spire). Nei potenziometri a film la risoluzione è apparentemente infinita; in realtà è limitata dalla granularità residua del film e dalle incertezze del contatto.
- **Linearità:** > 0.1%
- **Resistenza totale:** $10^3 \div 10^5$ a filo; $10^3 \div 10^6$ a film.
- **Numero di giri:** 1 \div 10
- **Coefficiente di variazione della resistenza con la temperatura:** $10 \div 1000 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$

Principali problemi di interfacciamento

- **Scelta della tensione di riferimento.** In funzione della resistenza totale determina la potenza dissipata nel dispositivo e quindi l'autoriscaldamento. La temperatura ambiente sommata all'autoriscaldamento rappresenta la temperatura di funzionamento del componente che determina una variazione del valore base di resistenza.
- **Impedenza di uscita non nulla e variabile con la posizione.** Questo crea problemi di:
a) interfacciamento col successivo dispositivo, che deve possedere una impedenza di ingresso molto maggiore per evitare effetti di carico significativi rispetto alla precisione che si vuole ottenere;
b) di sensibilità ai disturbi accoppiati capacitivamente, dai quali ci si deve proteggere schermendo il cavo di collegamento e riducendo l'impedenza in alta frequenza. Questo può essere fatto semplicemente inserendo un condensatore tra il cursore ed il terminale a massa.
- **Stabilità del generatore di tensione ausiliario.** Occorre alimentare il potenziometro con un generatore che garantisca una stabilità migliore della precisione che si desidera ottenere nella misura.

Considerazioni generali

E' un dispositivo economico ma poco affidabile a causa del contatto strisciante che può deteriorarsi e risentire di vibrazioni e shock meccanici. E' scarsamente utilizzato nelle macchine automatiche per misurare posizioni di parti importanti o critiche. E' spesso utilizzato come generatore di set-point negli anelli di controllo. In questo caso al cursore, che viene azionato dall'operatore di impianto, è associata una scala numerata che indica approssimativamente all'operatore il valore corrente del set-point.

Trasformatore differenziale**Principio di funzionamento**

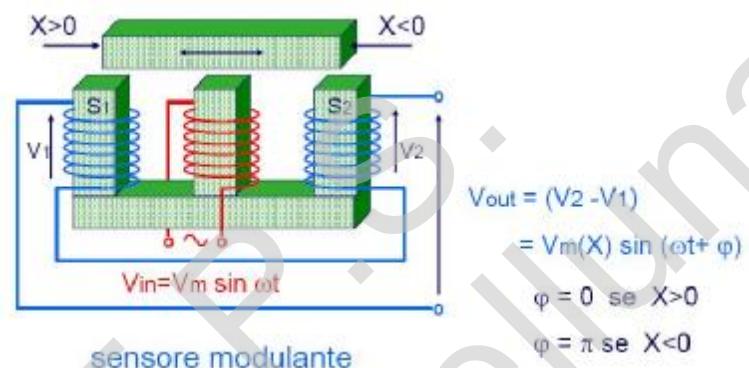
E' basato sul principio dell'induzione elettromagnetica. Una variazione di mutua induttanza (e quindi di flusso concatenato) in un circuito di tipo trasformatorico è determinata dallo spostamento di un cursore collegato all'oggetto di cui si vuole misurare la posizione.

Descrizione

Il trasformatore differenziale è un sensore di tipo assoluto ed è disponibile sia in versione rotativa (chiamata **Rotary Variable Differential Transformer RVDT**) che lineare (chiamata **Linear Variable Differential Transformer LVDT**).

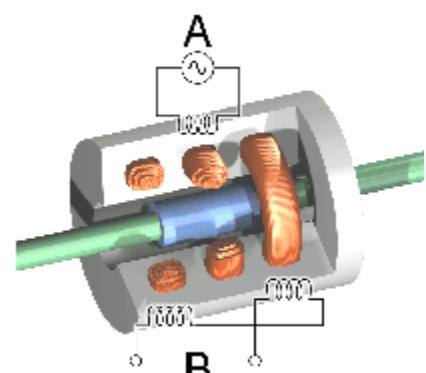
Si tratta di un sensore "modulante" in quanto richiede un generatore ausiliario per il funzionamento che risulta abbastanza semplice da descrivere. In entrambe le realizzazioni sono presenti un circuito primario e due circuiti secondari. Il primario è alimentato da un generatore sinusoidale ausiliario che imprime un flusso al traferro. L'accoppiamento magnetico tra primario e secondario avviene in parte attraverso l'aria (pessimo accoppiatore) ed in parte attraverso l'equipaggio mobile di materiale ferromagnetico (ottimo accoppiatore) collegato all'esterno. Una molla provvede a mantenere l'equipaggio mobile in posizione di riposo, corrispondente alla perfetta simmetria dei circuiti magnetici tra primario ed entrambi i secondari. Ne consegue che in condizione di riposo le tensioni indotte sui due secondari sono perfettamente identiche e la loro differenza risulta nulla. Se l'equipaggio mobile si sposta (o ruota) in una direzione (ad esempio verso S1), i due circuiti magnetici diventano diversi perché in uno (S1) è presente più ferro e nell'altro (S2) è presente più aria. Le ampiezze delle due tensioni di uscita risultano pertanto diverse e l'ampiezza della loro differenza è funzione della posizione dell'equipaggio mobile. Il segnale di uscita disponibile in questo sensore è una tensione alternata caratterizzata da:

- pulsazione pari a quella del segnale applicato al circuito primario (detto portante),
- ampiezza dipendente dalla posizione dell'equipaggio mobile,
- fase rispetto alla portante concorde o in opposizione in funzione del segno dello spostamento rispetto alla posizione di riposo.

**Caratteristiche essenziali**

- **Risoluzione:** $2 \div 20 \mu\text{m}$ (lineare); $10^{-5} \div 10^{-4}$ rad (rotativo)
- **Sensibilità:** $50 \div 100 \text{ mV out}/(\text{mm } V_{in})$
- **Linearità:** $0.1 \div 0.5\%$
- **Aampiezza del campo di misura:** $1 \div 10 \text{ cm}$ (lineare); $\pm 45^\circ$ (rotativo)
- **Frequenza di eccitazione:** $1 \div 50 \text{ KHz}$

I modelli a più elevata risoluzione sono realizzati per misurare spostamenti più contenuti.

**Principali problemi di interfacciamento**

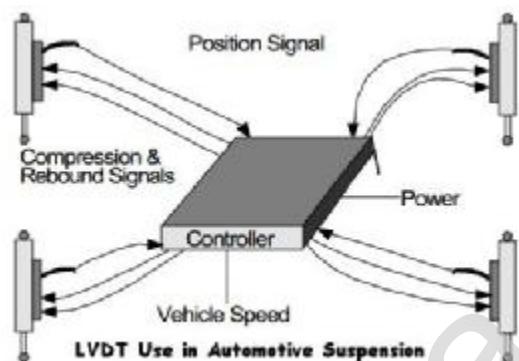
- Il segnale di uscita è modulato in ampiezza. Occorre un circuito che ricavi il valore di picco di una sinusoide e che ne rilevi la fase rispetto alla portante. Nei sistemi di controllo digitale si effettuano queste operazioni congiuntamente alla conversione analogico/digitale in uno speciale circuito (denominato Resolver to Digital Converter) utilizzato anche per altri sensori di posizione induttori (Resolver, Inductosyn).
- Stabilità del generatore di tensione ausiliario. Occorre alimentare il Trasformatore Differenziale con un generatore sinusoidale che garantisca una stabilità migliore della precisione che si desidera

ottenere nella misura. Come in altri sensori "modulanti", l'utilizzo della tensione del generatore ausiliario nei circuiti di demodulazione può contribuire a migliorare la qualità della misura globale.

Considerazioni generali

Trova la sua massima applicazione in applicazioni dove la risoluzione e la linearità siano più importanti della escursione utile. E' un sensore robusto, affidabile e ripetibile. Il suo costo però è abbastanza elevato e richiede una circuiteria aggiuntiva di alimentazione e soprattutto di demodulazione abbastanza costosa.

Ref. NE5520 AD598 2S54



Encoder**Principio di funzionamento**

Esistono realizzazioni basate su diversi principi di funzionamento. Le due tecnologie realizzative più comuni sono basate sull'effetto fotovoltaico e sull'induzione elettromagnetica per rilevare lo spostamento dell'oggetto da misurare.

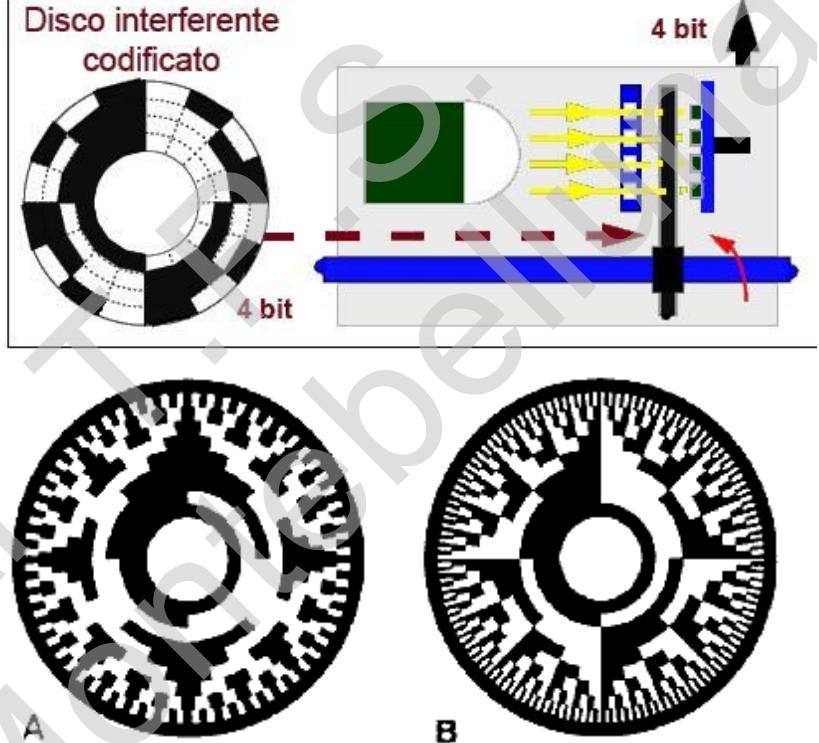
Descrizione

E' disponibile sia in versione rotativa che lineare con funzionamento di tipo incrementale o assoluto/incrementale. Per chiarire il funzionamento del dispositivo si fa riferimento ad un dispositivo ottico. Su un disco di vetro sono depositate strisce radiali opache ottenute ad es. per evaporazione sotto vuoto di metalli su una maschera opportuna.

Nella versione assoluta si evidenziano diverse corone circolari (il loro numero dipende dalla risoluzione desiderata per il dispositivo) su cui le zone opache e trasparenti si alternano a formare una codifica della posizione. Viene di solito utilizzato un codice Gray per garantire codici adiacenti caratterizzati dalla variazione di un solo bit. Questo consente di evitare configurazioni spurie nel passaggio da una posizione a quella successiva.

Nella versione incrementale sulla corona circolare esterna del disco si alternano zone trasparenti ed opache di eguale larghezza. Si definisce passo angolare la rotazione corrispondente alla distanza di due strisce della stessa natura (opache o trasparenti).

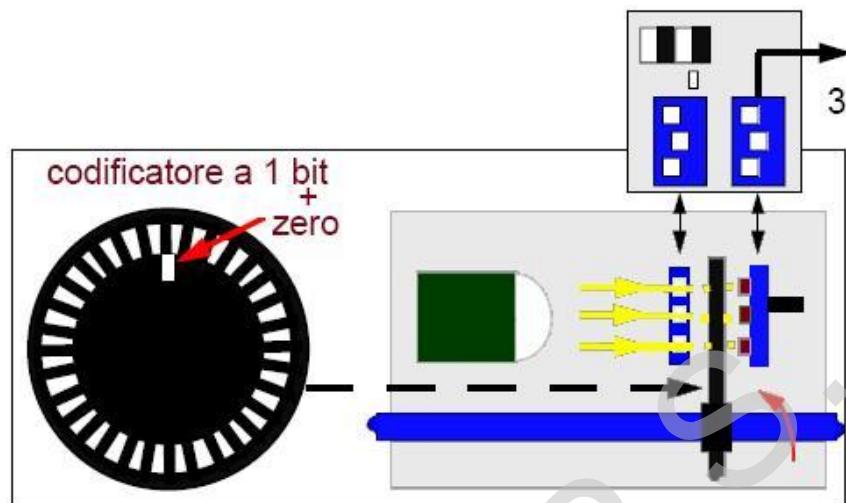
La caratterizzazione degli encoder è di solito riportata in passi (angolari) per giro per quelli incrementali ed in bit per quelli assoluti. Pertanto un encoder incrementale con 1024 passi per giro ha la stessa risoluzione di uno assoluto a 10 bit.



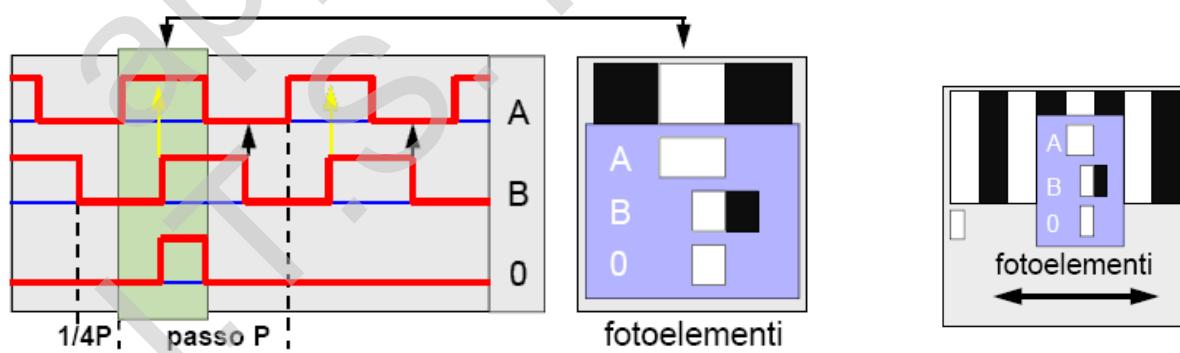
Nel seguito è descritto in qualche dettaglio l'encoder incrementale; quello assoluto è realizzato concettualmente allo stesso modo, fatto salvo il maggior numero di sensori necessari.

Il disco di vetro, calettato su un albero di trasmissione, viene posizionato in una flangia su cuscinetti a sfere facendo molta attenzione ad evitare eccentricità o disassamenti che riducono la precisione del dispositivo. Su opportuni supporti fissati alla flangia sono posizionati una sorgente luminosa, una lente di collimazione, una piastra di scansione ed una piastra di supporto degli elementi fotosensibili. Sulla piastra di scansione sono ricavate 2 finestre trasparenti, posizionate una sotto l'altra e distanziate radialmente di un quarto di passo angolare. Vi è, inoltre, un'altra finestra di riferimento sia sul disco che sulla piastra di scansione. Dall'altra parte del disco sono posizionati, in corrispondenza alle finestre della piastra di scansione, altrettanti elementi fotosensibili. La luce emessa dalla lampada viene collimata da una lente in raggi paralleli sulle finestre situate sulla piastra di scansione, e da questa passa sul disco, che ne modula l'intensità in funzione della posizione. Dall'altra parte del disco gli elementi fotosensibili danno in uscita una tensione corrispondente all'intensità luminosa che li colpisce. Ne consegue che su ogni sensore si avrà una variazione (quasi sinusoidale) di tensione in funzione del movimento del disco. Il posizionamento delle finestre sulla piastra di scansione e corrispondentemente dei sensori garantisce forme d'onda sfasate di 1/4 di passo (90 gradi elettrici). Per semplificare l'utilizzo del dispositivo solitamente il

costruttore integra in esso una semplice elettronica di condizionamento, basata su circuiti a Trigger di Schmitt, per la trasformazione dei segnali sinusoidali in treni di impulsi, includendo spesso anche i segnali negativi per consentire la trasmissione differenziale.

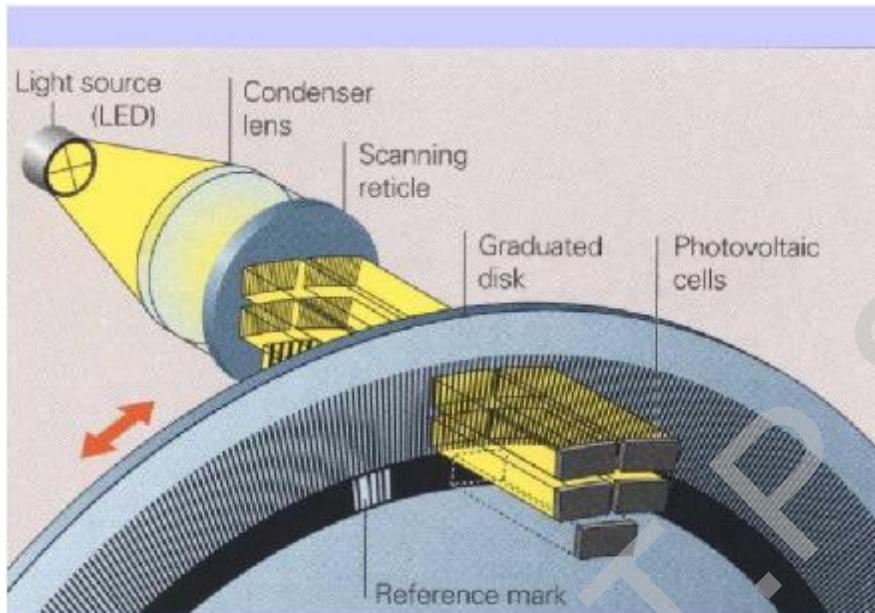


Così come descritto finora l'encoder incrementale rappresenta un sensore di velocità che fornisce in uscita un segnale la cui frequenza è ad essa proporzionale. Per ottenere un sensore di posizione è necessario un circuito di conteggio che effettui l'integrazione del segnale di velocità. La doppia uscita con segnali sfasati di $1/4$ di passo è indispensabile per rilevare il verso di rotazione e consentire una corretta accumulazione del conteggio dei passi. Infatti, con rotazione oraria il segnale B è in ritardo rispetto ad A, mentre con rotazione antioraria il segnale A è in ritardo rispetto a B. Può essere utile abituarsi ad osservare le forme d'onda dell'encoder nel modo seguente. Per rotazioni orarie si considera il diagramma nel modo usuale, con l'asse dei tempi orientato da sinistra a destra. Le forme d'onda corrispondenti alla rotazione antioraria si possono ottenere, senza ridisegnare il diagramma, semplicemente considerando l'asse dei tempi orientato da destra a sinistra. La determinazione del verso di rotazione si effettua facilmente osservando il livello del segnale A in corrispondenza del fronte di salita del segnale B (o viceversa). Si nota che con rotazione oraria il livello di A si mantiene costantemente alto, mentre per rotazione antioraria si mantiene costantemente basso.



Caratteristiche essenziali

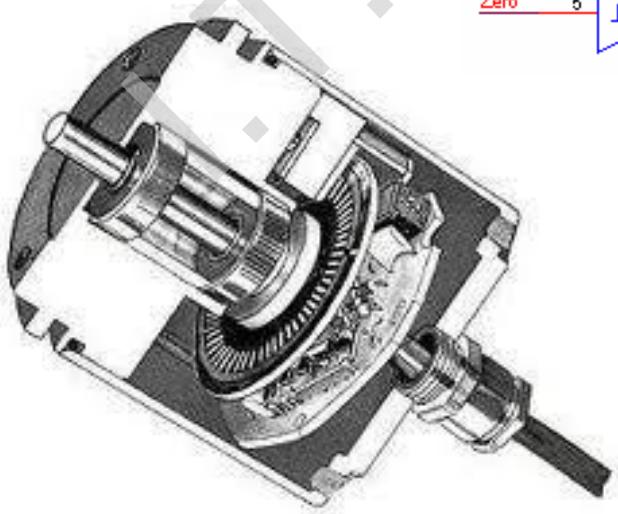
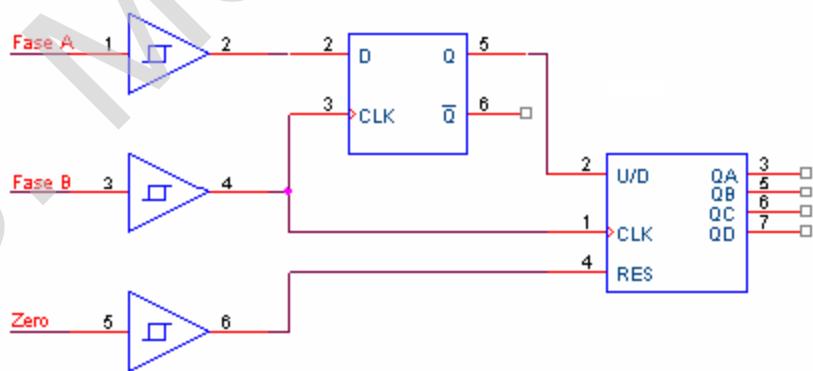
- **Sensibilità:** a) uscita logica: 0 - 5V TTL, 0 -15V push-pull, oppure o.c.
b) uscita analogica sinusoidale qualche decina di mVpp su carico di $1\text{ k}\Omega$
- **Risoluzione:** anche >16bit per versione assoluta standard fino a 5000 impulsi/giro, speciali anche >100K impulsi/giro con elettronica aggiuntiva.

**Encoder Assoluto**

La posizione è già codificata e l'interfacciamento risulta semplice. L'utilizzo di un codice di tipo Gray semplifica anche il problema delle commutazioni spurie che si potrebbero verificare nel passaggio tra due configurazioni successive dovuti agli inevitabili piccoli errori di allineamento radiale delle diverse tracce. Nel codice Gray un solo bit varia tra due configurazioni adiacenti e l'errore di allineamento della traccia che commuta rispetto al valore ideale si traduce in un cambiamento (corretto) del valore di posizione leggermente anticipato o posticipato.

Encoder Incrementale

Occorre determinare il verso di rotazione ed accumulare (integrare) il conteggio per ricostruire la posizione assoluta. Un semplice circuito per la determinazione del verso di rotazione ed il conteggio è riportato nello schema seguente.



Trasduttori ad effetto Hall

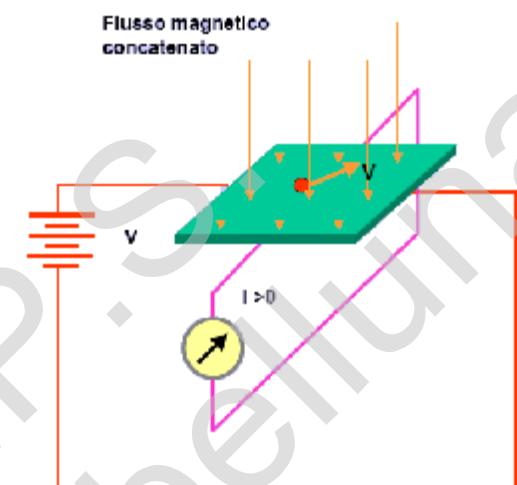
In una lamina rettangolare di materiale conduttore o semiconduttore, opportunamente polarizzata, il flusso di elettroni avviene, in assenza di flusso magnetico incidente, in linea retta tra i bordi frontali, senza flusso di elettroni in direzione trasversale, cioè senza corrente circolante nel circuito che collega i bordi laterali della lamina.

In presenza di un campo magnetico incidente, il moto degli elettroni viene deviato per effetto delle forze di Lorentz, acquistando una componente di velocità non nulla in direzione trasversale e produce una differenza di potenziale (tensione di Hall).

Nel circuito che collega i due bordi trasversali si ha circolazione di corrente, la cui intensità è proporzionale alla intensità del flusso concatenato alla lamina.

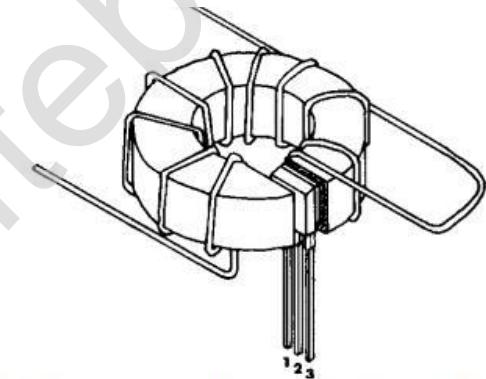
Caratteristiche essenziali

- Elevata linearità
- Buona sensibilità
- Basso consumo
- Dimensioni ridotte
- Frequenza di funzionamento elevata
- Integrazione di altri componenti sullo stesso chip
- Costo contenuto
- Uscita analogica o digitale

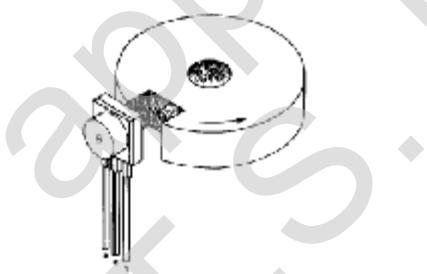


Questo tipo di trasduttore permette molteplici utilizzazioni in campo industriale, automobilistico, e può essere utilizzato per:

- misure dell'intensità del campo magnetico, dell'intensità di corrente, del numero di giri dei motori, di posizione, di pressione;
- il riconoscimento di polarità magnetiche;
- il controllo di direzione dello stato di un apparato



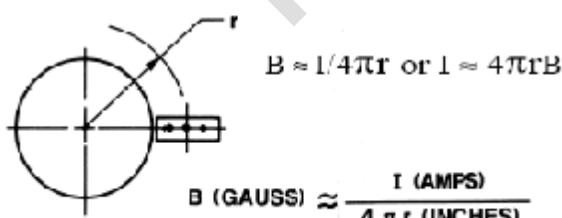
Multiple Turns for Measuring Low Currents



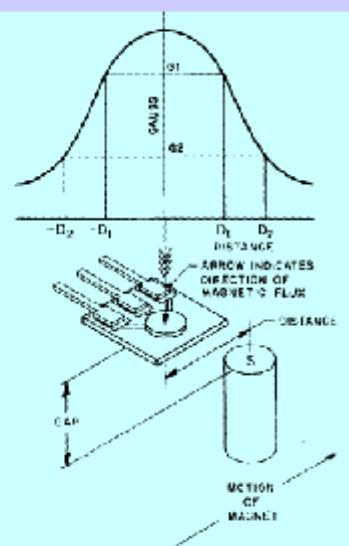
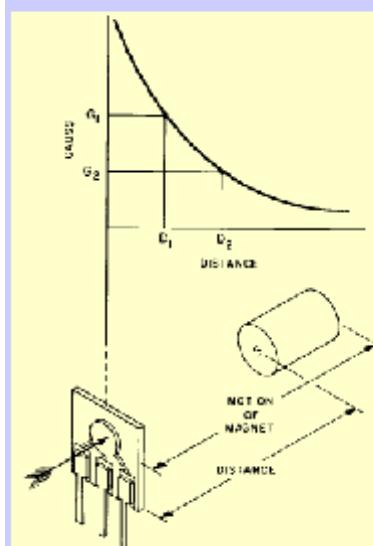
B = field strength in gauss

I = current in amperes

r = distance from wire center to sensor chip in inches.



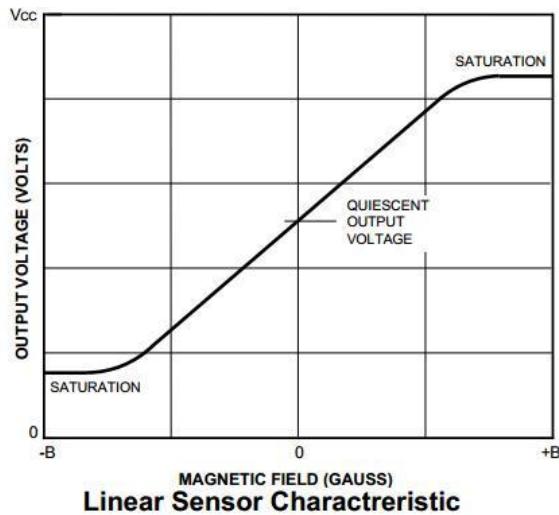
Curve di risposta in funzione della distanza e della direzione di movimento



Rif. UGN3503 SPRAGUE

sensori e trasduttori

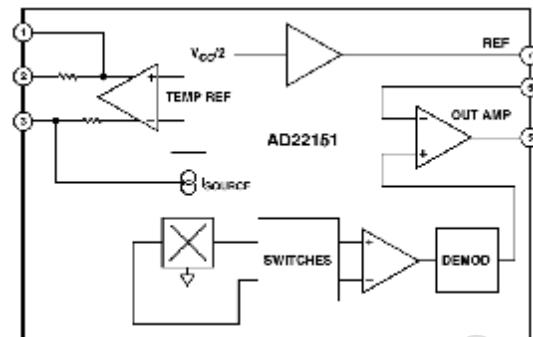
43



AD22151

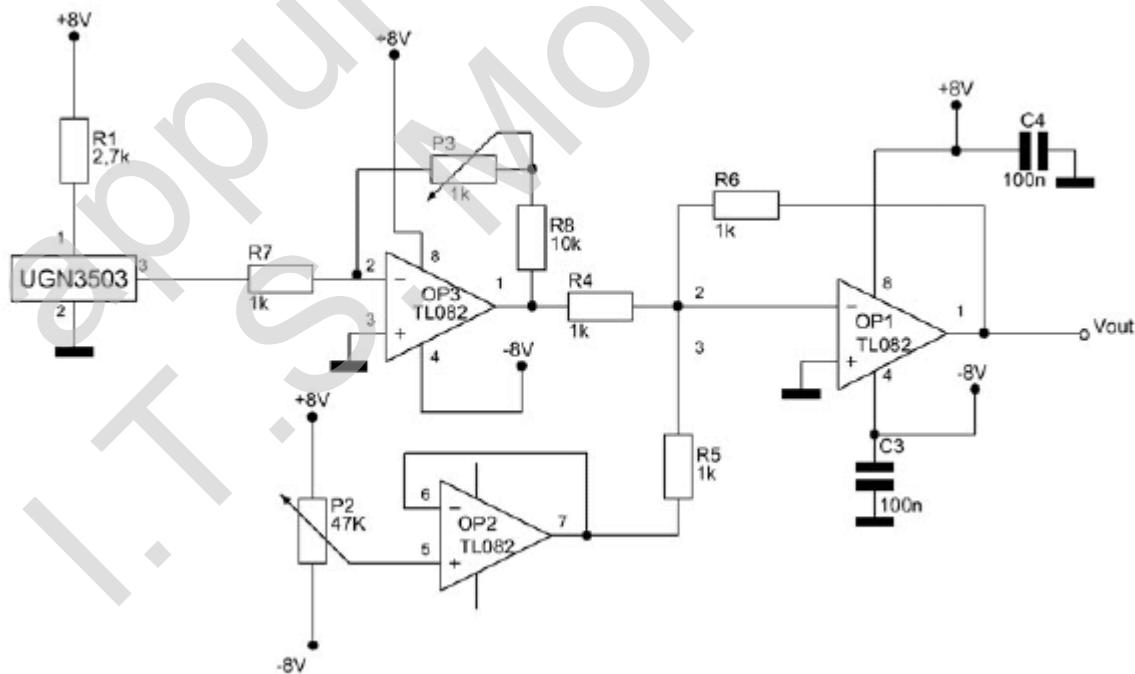
Linear Output
Magnetic Field Sensor

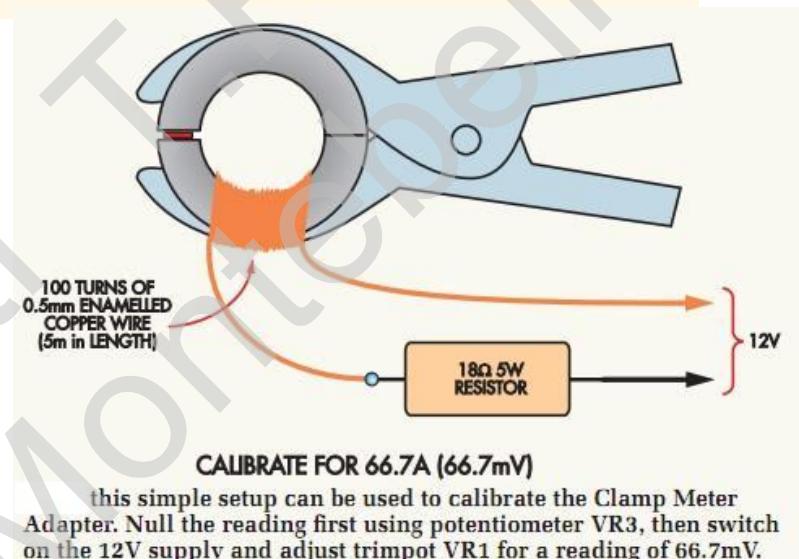
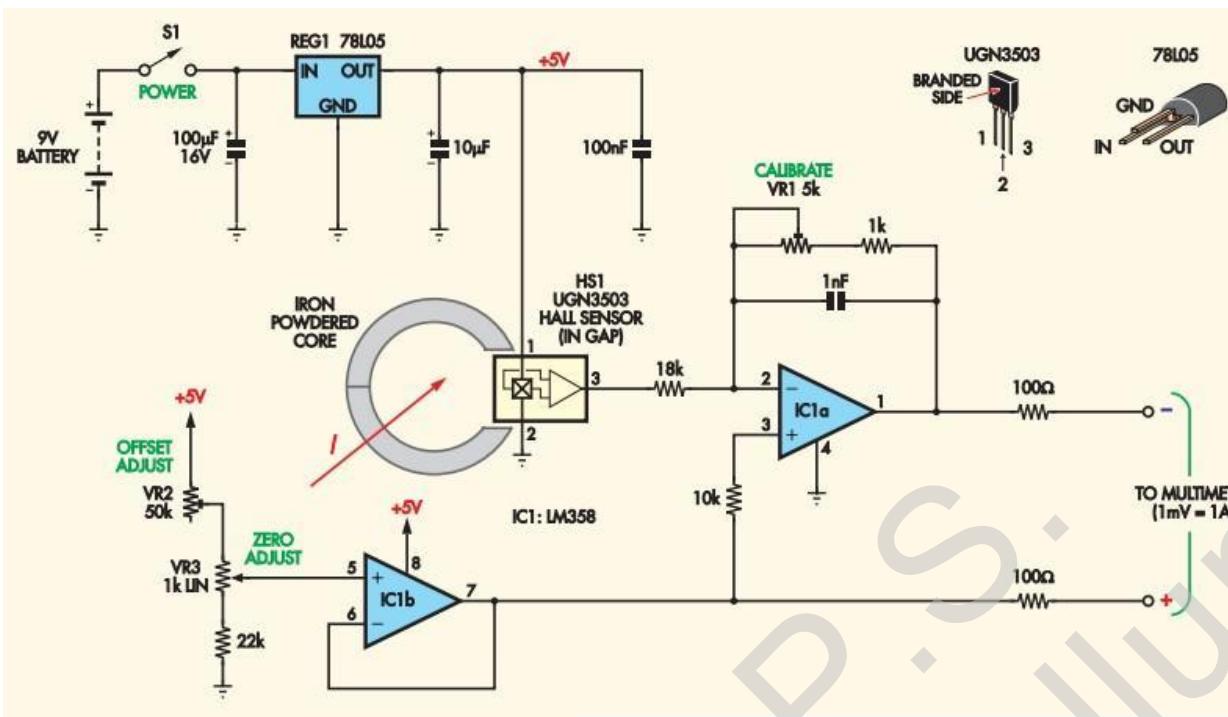
APPLICATIONS
 Automotive
 Throttle Position Sensing
 Pedal Position Sensing
 Suspension Position Sensing
 Valve Position Sensing
 Industrial
 Absolute Position Sensing
 Proximity Sensing



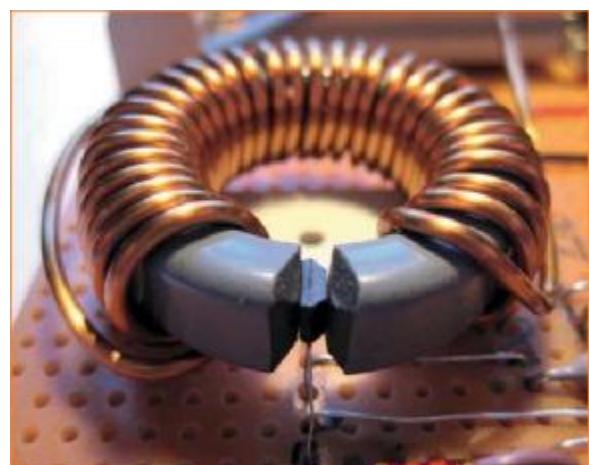
CIRCUITO DI CONDIZIONAMENTO PER UGN3503

Questo circuito di condizionamento permette di regolare l'offset e il fondo scala, facendo in modo da adattare le caratteristiche del segnale uscente dal sensore ai circuiti a valle (ad esempio convertitori A/D). Il circuito è formato da tre amplificatori operazionali. Il primo amplificatore operazionale collegato al sensore provvede a regolare il fondo scala, il secondo è un sommatore invertente che regola l'offset del sensore e il terzo è un buffer che regola l'impedenza del trimmer per evitare una richiesta maggiore di corrente. Il sensore UGN3503 è del tipo radiometri (converte direttamente il campo magnetico in segnale elettrico) ad effetto hall e fornisce in uscita 2,5V in assenza di campo magnetico. Questa tensione può essere eliminata regolando il trimmer del sommatore invertente a 2,5V. Il range di funzionamento va da 0 a 900 Gauss e in uscita fornisce 1,3mV/G.





ACS712 [Allegro MicroSystems]



Dispositivi fotoelettrici

Lo studio della luce e dei suoi fenomeni ha portato, grazie alla meccanica quantistica, a definire il quanto di luce denominato *fotone*, al quale è stata assegnata una energia ricavabile dalla relazione:

$$E = h \cdot f$$

E = energia

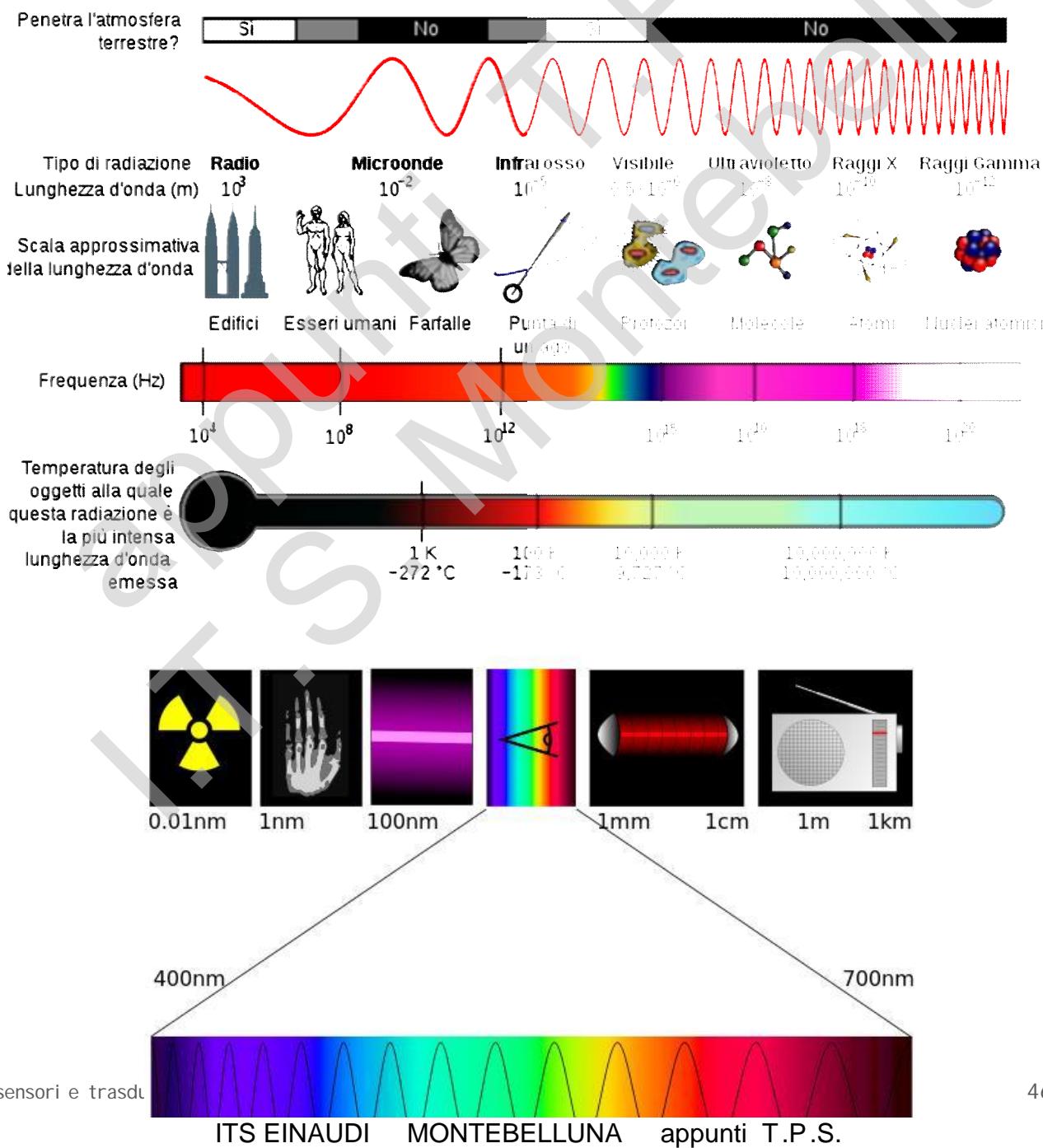
h = costante di Planck ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,135 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$)

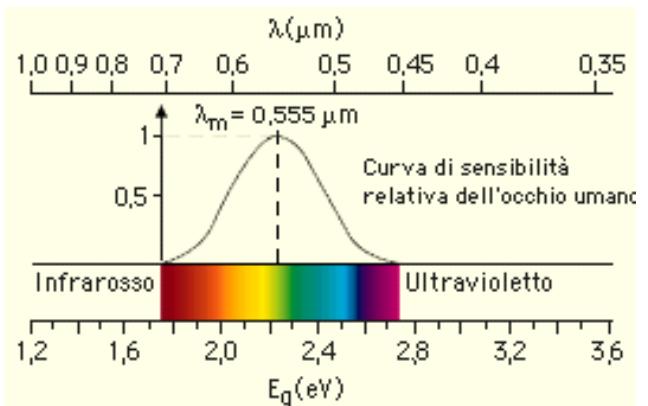
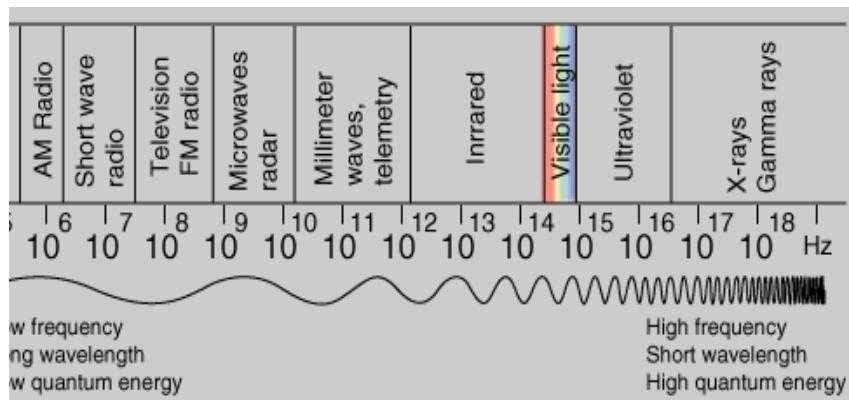
f = Frequenza dell'onda elettromagnetica

Un'onda elettromagnetica può essere generata da una carica in movimento e si propaga con velocità $c = 2,99 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ (299.792,5 Km/s \approx 300.000 Km/s). La velocità con cui si muove l'onda è la velocità della luce. Si definiscono pertanto la lunghezza d'onda λ e il periodo T, legati dalla relazione:

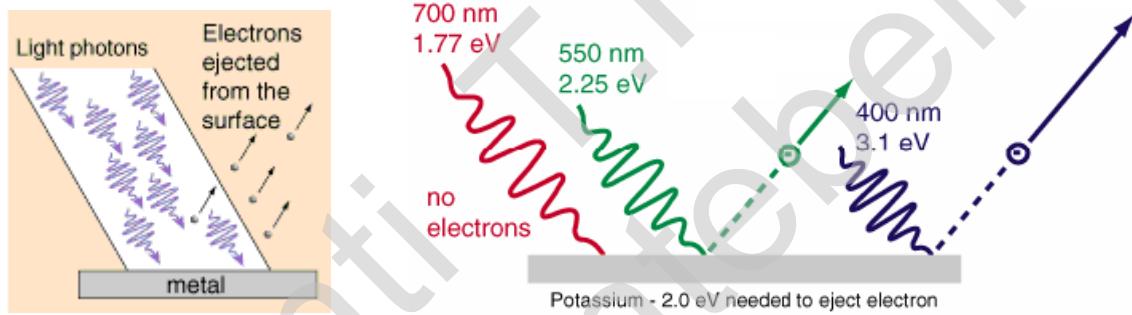
$$I = c \cdot T \quad \text{oppure} \quad I = c / f$$

Le onde elettromagnetiche con frequenza compresa tra $3,8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ e $7,8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ sono onde a cui è sensibile l'occhio umano e consentono di individuare il luogo da cui provengono. Esse costituiscono lo spettro luminoso del visibile e ad ognuna di esse corrisponde un diverso colore.





Effetto fotoemittente o fotoelettrico si verifica quando una radiazione luminosa, colpendo la superficie di un materiale, produce una emissione di elettroni.



Questo fenomeno trova spiegazione considerando la radiazione come un insieme di corpuscoli energetici (fotoni), i quali colpendo gli elettroni della superficie di un materiale forniscono loro un'energia sufficiente a staccarsi dal materiale di appartenenza. Gli elettroni emessi possiedono una energia ricavabile dalla relazione

$$E_e = h \cdot f - W_o$$

in cui

E_e = energia degli elettroni emessi

$h \cdot f$ = energia del fotone incidente

W_o = lavoro di estrazione, energia necessaria a strappare l'elettrone al materiale di appartenenza

Per il GaAs per il quale $W_o = 1,38 \text{ eV}$

$$\lambda = 900 \text{ nm}$$

$$I_c = \frac{h \cdot c}{W_o} = \frac{1,236 \cdot 10^{-6}}{W_o}$$

per la figura precedente:

700 nm -> $W_o = 1,77 \text{ eV}$

550 nm -> $W_o = 2,25 \text{ eV}$

400 nm -> $W_o = 3,10 \text{ eV}$

Work Functions for Photoelectric Effect

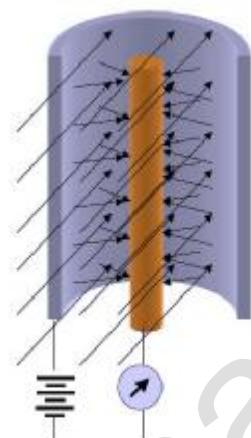
Element	Work Function(eV)
Aluminum	4.08
Beryllium	5.0
Cadmium	4.07
Calcium	2.9
Carbon	4.81
Cesium	2.1
Cobalt	5.0
Copper	4.7
Gold	5.1
Iron	4.5
Lead	4.14
Magnesium	3.68
Mercury	4.5
Nickel	5.01
Niobium	4.3
Potassium	2.3
Platinum	6.35
Selenium	5.11
Silver	4.73
Sodium	2.28
Uranium	3.6
Zinc	4.3

L'effetto fotoemittente è stato scoperto per primo nei metalli, in quanto l'energia richiesta è inferiore rispetto agli altri materiali, visto che sono già liberi alcuni elettroni.

Si può studiare questo effetto tramite l'uso di una cella fotoelettrica, costituita da un anodo e da un fotocatodo. È formato da una lamina di materiale fotoemittente, che quando viene colpito da una radiazione superiore alla frequenza di soglia del materiale, emette elettroni che vengono spinti dal campo elettrico e possono essere raccolti dall'anodo dando luogo ad una corrente nel circuito.

Si definisce **sensibilità luminosa** il rapporto tra la photocorrente e l'intensità di luce che l'ha provocata e viene espressa in $\mu\text{A/lumen}$.

I materiali più usati per la costruzione dei fotocatodi sono:



Materiale	λ del picco di sensib.(nm)	Sensibilità ($\mu\text{A/lm}$)
Argento-Ossido-Cesio	800	25
Argento-Ossido-Rubidio	420	6,5
Antimonio-Cesio	400	40

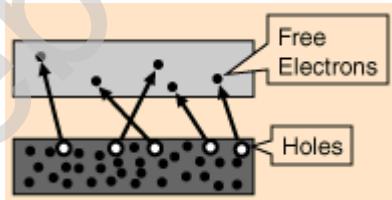
I dispositivi che sfruttano l'effetto fotoemittente sono: le fotocellule, i fotomoltiplicatori, i tubi intensificatori di immagine.

Effetto fotoconduttivo

Si ha nei materiali semiconduttori quando vengono colpiti dalla radiazione luminosa e si manifesta con un aumento di conducibilità del materiale irradiato. Il fotone può rompere un legame covalente, generando una coppia elettrone-lacuna, se possiede una energia tale da far passare l'elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione.

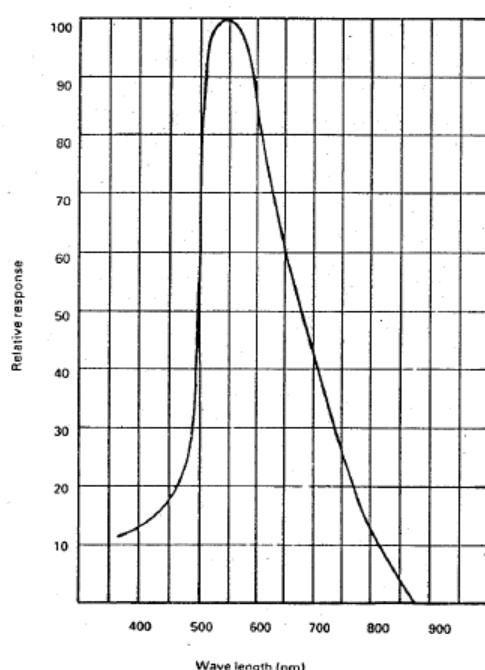
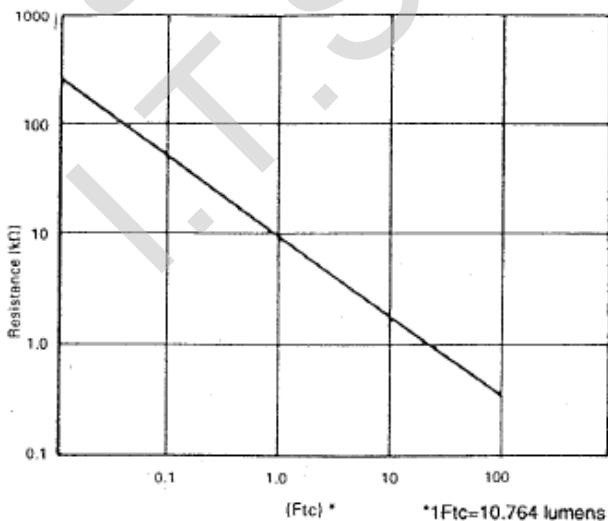
Si definisce *lunghezza d'onda critica* di un materiale, la lunghezza d'onda della radiazione incidente che produce il massimo effetto conduttivo, ed è data dalla relazione:

$$I_c = \frac{h \cdot c}{W_o} = \frac{1,236 \cdot 10^{-6}}{W_o}$$



Per il silicio la lunghezza d'onda critica è $\lambda_c = 1,13 \mu\text{m}$, per il germanio è $\lambda_c = 1,73 \mu\text{m}$, per il CdS (solfuro di cadmio) la risposta spettrale è $\lambda_c = 0,6 \mu\text{m}$, che corrisponde abbastanza a quella dell'occhio umano.

Rif. Norp12

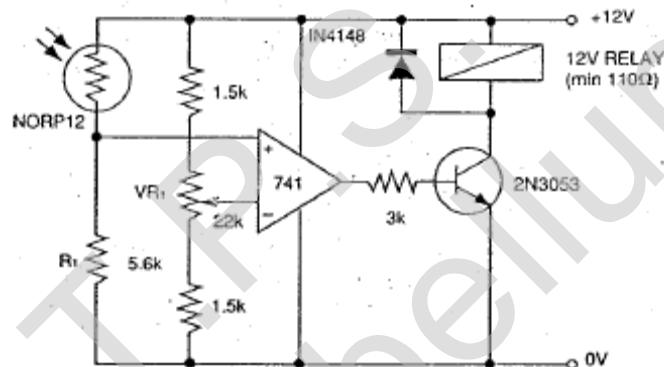
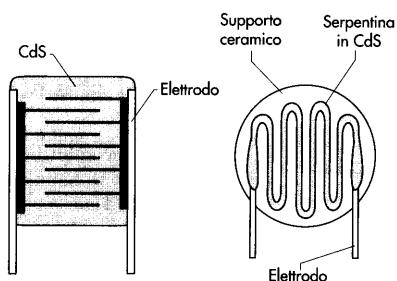


Guide to source illuminations

Light source	Illumination (Lux)
Moonlight	0.1
60W bulb at 1m	50
1W MES bulb at 0.1m	100
Fluorescent lighting	500
Bright sunlight	30,000

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Cell resistance	1000 lux	-	400	-	Ω
	10 lux	-	9	-	k Ω
Dark resistance	-	1.0	-	-	M Ω
	-	-	3.5	-	pF
Rise time 1	1000 lux	-	2.8	-	ms
	10 lux	-	18	-	ms
Fall time 2	1000 lux	-	48	-	ms
	10 lux	-	120	-	ms

Vengono utilizzate come rilevatori di radiazione luminosa nelle applicazioni in cui la variazione sia relativamente lenta, poiché il tempo di risposta può superare i 100 sec.



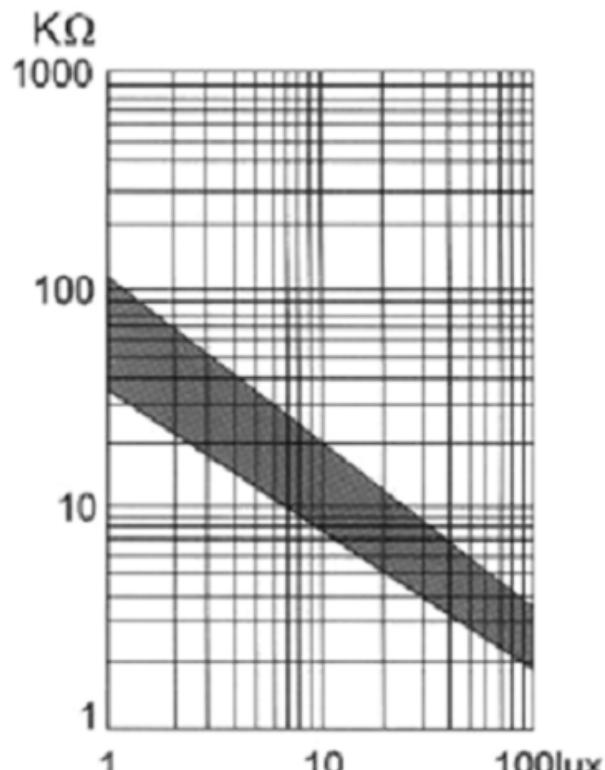
Il grafico è in scala logaritmica e quindi l'equazione che lega luminosità e resistenza è l'equazione di una "retta" in forma logaritmica:

$$\log R = -a \log IL + \log R_1$$

- R = resistenza del fotoresistore
- a = pendenza della retta chiamato valore Gamma (fornito dal costruttore)
- IL = illuminamento espresso in lux
- R_1 = resistenza del fotoresistore in condizioni di illuminamento IL unitario (ricavabile dal grafico)

Da questa equazione si può ricavare il valore di illuminamento IL espresso in lux in funzione degli altri dati. Si ottiene:

$$\log \frac{R}{R_1} = \log IL^{-a} \Rightarrow IL = \sqrt[a]{\frac{R}{R_1}}$$



sensori e trasduttori

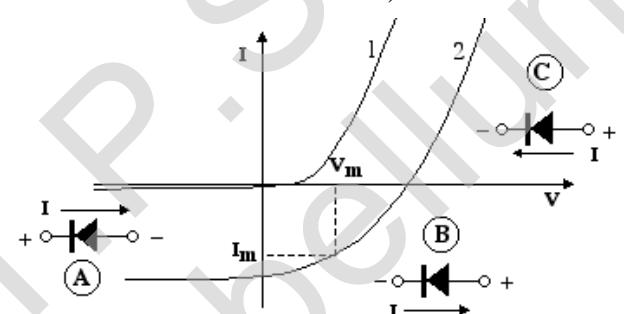
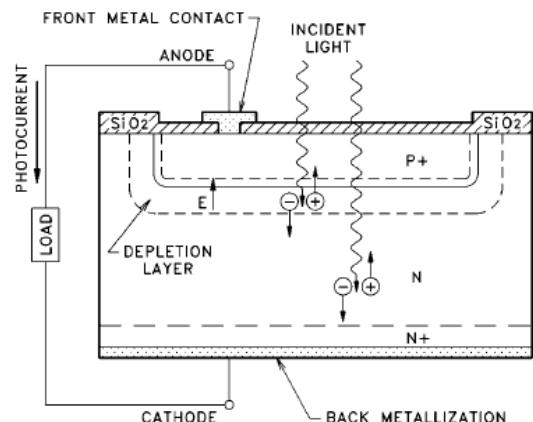
Effetto fotoelettrico di giunzione

Se viene irradiata una giunzione PN polarizzata inversamente si verifica un aumento della corrente inversa che è dovuta ai portatori minoritari. Il campo elettrico dello strato di svuotamento della giunzione separa gli elettroni dalle lacune dando origine a una corrente di cortocircuito o a una tensione a circuito aperto, detta effetto fotovoltaico, il cui valore è compreso tra 0,35 e 0,5 V.

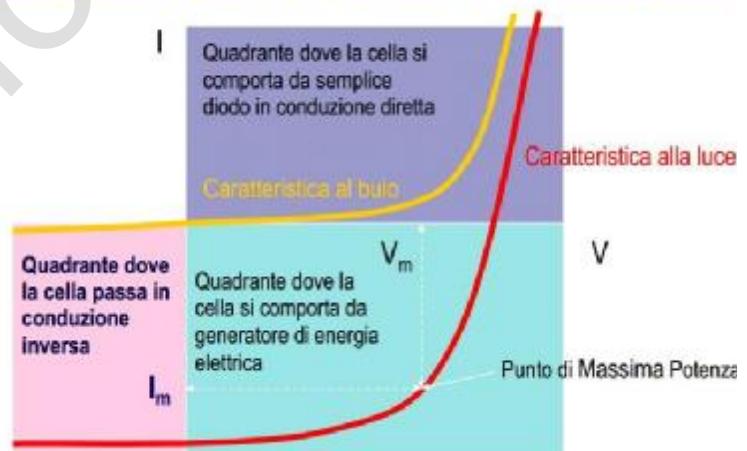
L'effetto fotoelettrico (o fotovoltaico) è un fenomeno a soglia: esso si verifica solo con luce la cui lunghezza d'onda è inferiore ad un valore critico, detto lunghezza d'onda di soglia λ_s che è quella per cui vale la relazione $(h \cdot c)/\lambda = E_g$ (ove E_g è il salto energetico che l'elettrone deve fare per passare dalla banda di conduzione alla banda di valenza).

Il comportamento di una cella fotovoltaica (o fotodiodo) è descrivibile schematicamente mediante un grafico tensione/corrente come quello di figura, che riporta in ordinata la corrente che attraversa la giunzione ed in ascissa la tensione ai capi della giunzione.

Le caratteristiche attraversano 3 quadranti: la curva indicata con 1 è quella in condizioni di buio, la curva indicata con 2 è quella che si ottiene in condizioni di illuminamento. Nel quadrante A il fotodiodo è polarizzato inversamente: nelle condizioni di buio la corrente inversa è trascurabile come per ogni diodo raddrizzatore che non conduce se polarizzato inversamente (Si tratta della generazione spontanea di coppie elettrone-lacuna nella prossimità della giunzione PN per effetto termico che cresce con la temperatura). Nelle condizioni di illuminamento tuttavia si nota che esso è attraversato da una apprezzabile corrente inversa. La pendenza di tale curva è prossima a zero: la corrente è praticamente indipendente dalla tensione di polarizzazione. Nel quadrante C il fotodiodo è polarizzato direttamente, e la corrente diretta, che scorre dall'elettrodo P a quello N, cresce esponenzialmente con la tensione applicata, come in ogni diodo (anche se si usa approssimare l'esponenziale con una retta, che intercetta l'asse delle tensioni ad un valore che viene chiamato V_F). Nel quadrante B (quello normalmente utilizzato nella produzione fotovoltaica di energia elettrica), pur essendo il fotodiodo polarizzato direttamente, esso è attraversato da una corrente inversa e si comporta come se avesse resistenza negativa. Di conseguenza, se si pone una resistenza tra gli elettrodi P e N il fotodiodo si comporta come una sorgente di forza elettromotrice, anche in assenza di un generatore di tensione.



Caratteristica Tensione – Corrente di una Cella Solare



TIPOLOGIE DI CELLE FOTOVOLTAICHE

Attualmente sul mercato le celle fotovoltaiche hanno diverse dimensioni a seconda della loro tipologia:

- **Celle a silicio monocristallino:** hanno un grado di maggior purezza del materiale e garantiscono le migliori prestazioni in termini di efficienza avendo il rendimento più alto pari al 15%. Si presentano di colore blu scurissimo uniforme e hanno forma circolare o ottagonale, di dimensione dagli 8 ai 12 cm di diametro e 0.2 -0.3 mm di spessore.

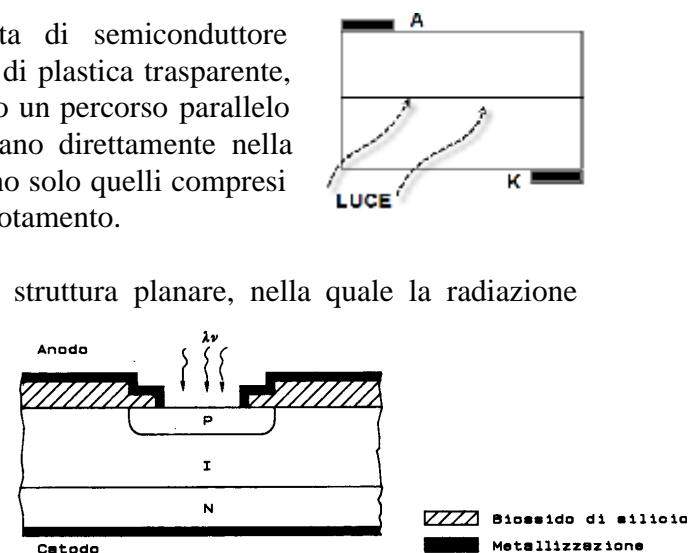
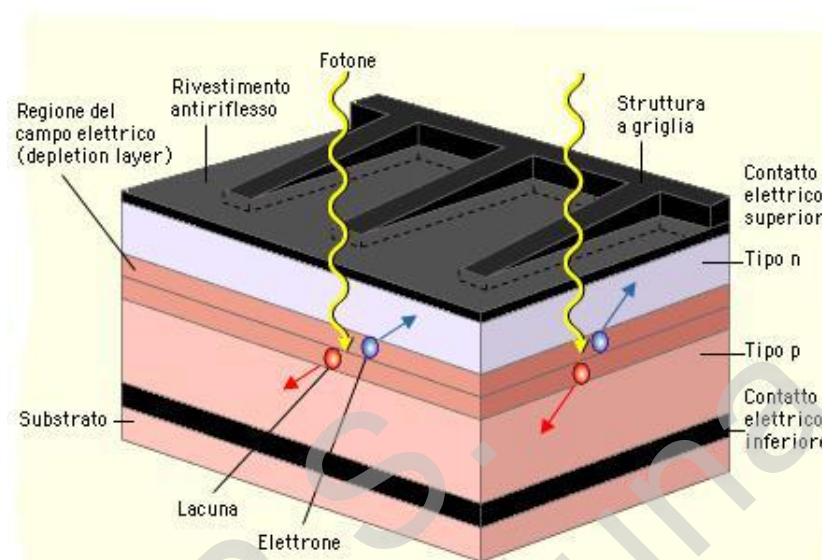
- **Celle a silicio policristallino:** hanno una purezza minore condizione che comporta una minor efficienza ossia il loro rendimento si aggira tra l'11 e il 14%. Si presentano di un colore blu intenso cangiante dovuto alla loro struttura policristallina. Hanno forma quadrata o ottagonale e di spessore analogo al precedente tipo.

- **Silicio amorfo:** si tratta della deposizione di uno strato sottilissimo di silicio cristallino (1-2 micron) su superfici di altro materiale, ad esempio vetri o supporti plastici. In questo caso è improprio parlare di celle, in quanto possono essere ricoperte superfici anche consistenti in modo continuo. L'efficienza di questa tecnologia è sensibilmente più bassa, nell'ordine del 5-8% ed è soggetta a un decadimento consistente (-30%) delle proprie prestazioni nel primo mese di vita (effetto Stabler- Wronsky) che impone quindi un sovradimensionamento della superficie installata, in modo da consentire in fase di esercizio la produzione di energia elettrica preventivata in sede di progetto.

Esistono anche altri tipi di celle solari in commercio e altri tipi in via di sperimentazione come la cella di Graetzel sviluppata dal politecnico di Losanna (EPFL). Una cella molto usata è la cella ad Arseniuro di Gallio per il suo ottimo rendimento. Infatti, pur essendo tossica, trova molte applicazioni in satelliti spaziali, dove l'energia del sole è l'unica fonte di energia disponibile.

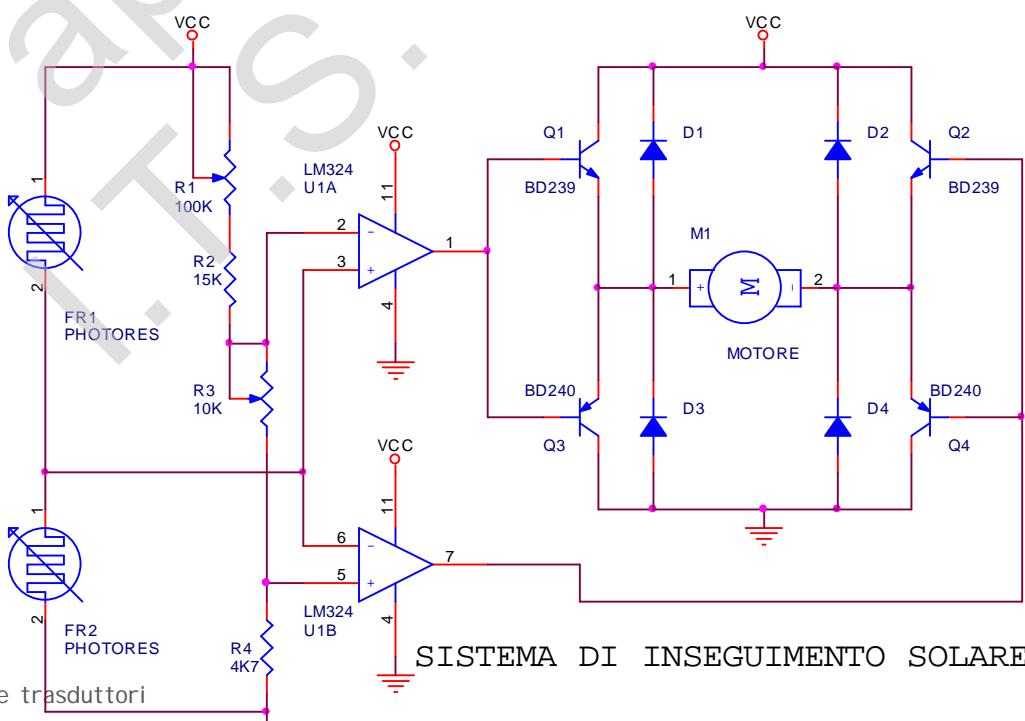
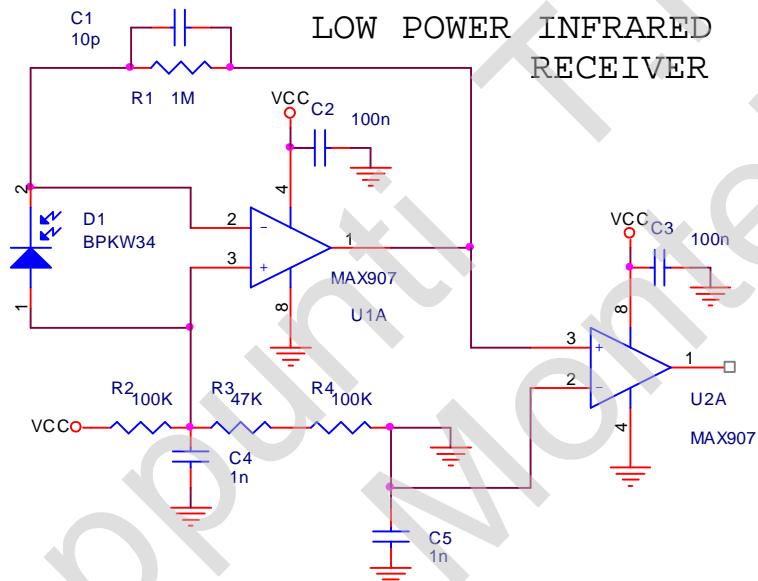
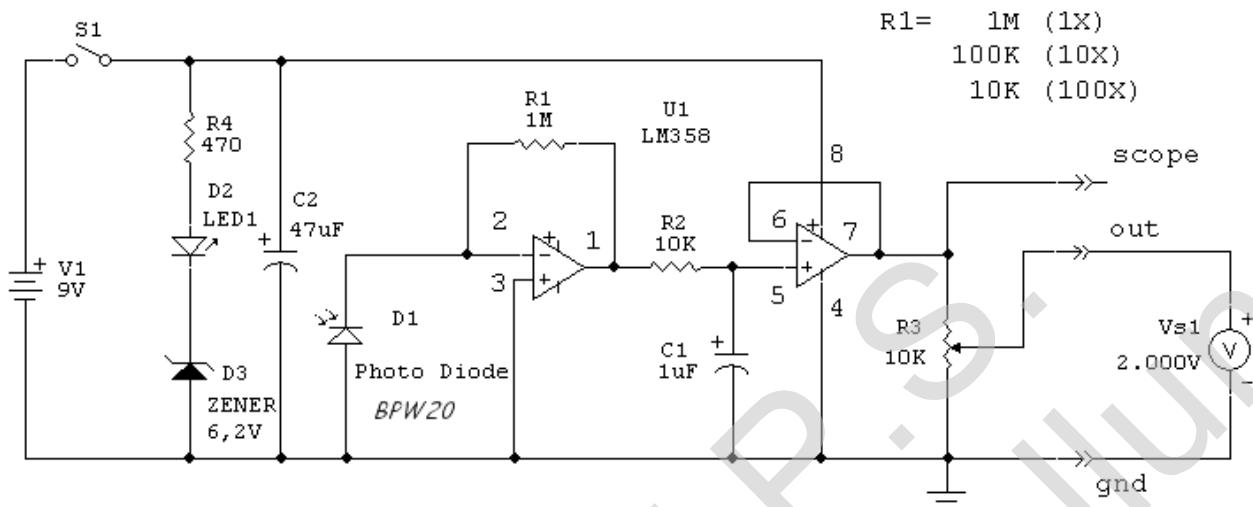
Il fotodiode può essere costituito da una barretta di semiconduttore contenente una giunzione PN annegata in una barretta di plastica trasparente, dove la luce arriva sulla zona di svuotamento seguendo un percorso parallelo alla superficie. Si ha il vantaggio che i fotoni arrivano direttamente nella zona di giunzione; lo svantaggio è che i fotoni utili sono solo quelli compresi in un fascio sottile avente lo spessore della zona di svuotamento.

Un miglioramento delle prestazioni si ottiene con la struttura planare, nella quale la radiazione investe la giunzione in modo perpendicolare al piano della giunzione stessa. Il fascio ha una larghezza maggiore rispetto al caso dei fotodiodi a barretta precedenti, di contro c'è lo svantaggio che la luce deve attraversare lo strato P prima di raggiungere la giunzione. Per migliorare l'efficienza è opportuno diminuire lo spessore della zona P, introducendo un drogaggio P+, e aumentare la zona di svuotamento. Un buon risultato si ottiene con la struttura PIN in cui le zone P e N sono separate da uno strato a bassissimo drogaggio I (intrinseco), ottenendo una zona di svuotamento molto larga nella regione intrinseca.

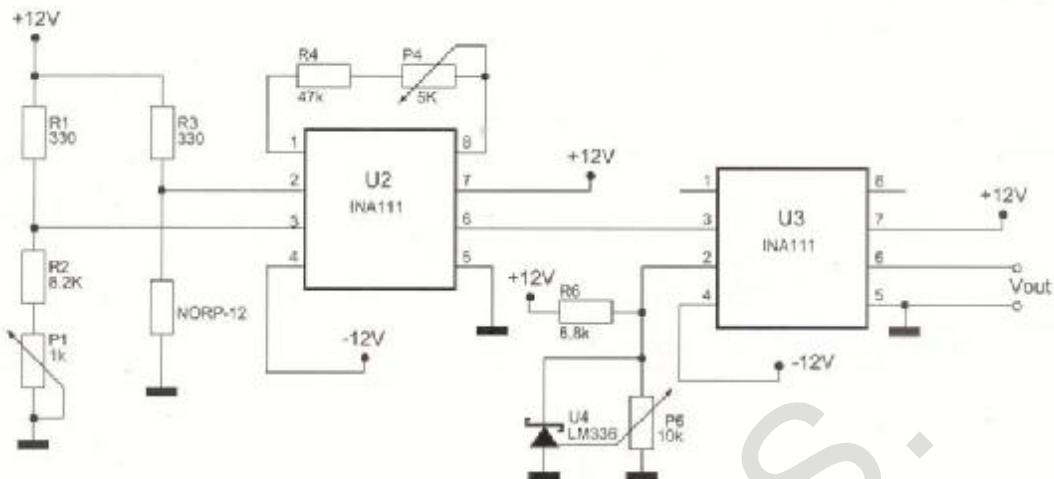


I fotodiodi, rispetto ai fotoresistori hanno una migliore linearità, minore rumore, e un tempo di risposta veloce (≈ 1 nsec). Di contro hanno una corrente di buio (dark current) che è fortemente influenzata dalla temperatura ed una superficie attiva molto minore.

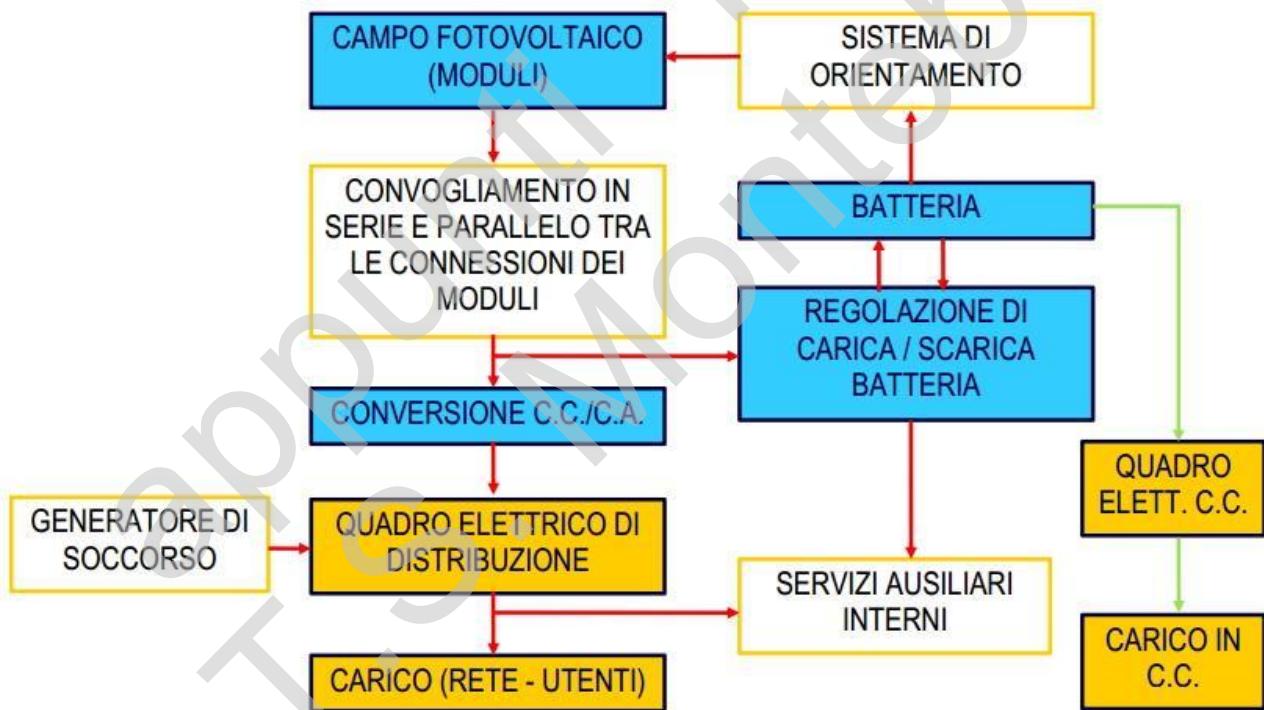
Rif. BPW34, BPW21, SFH506, BPW20

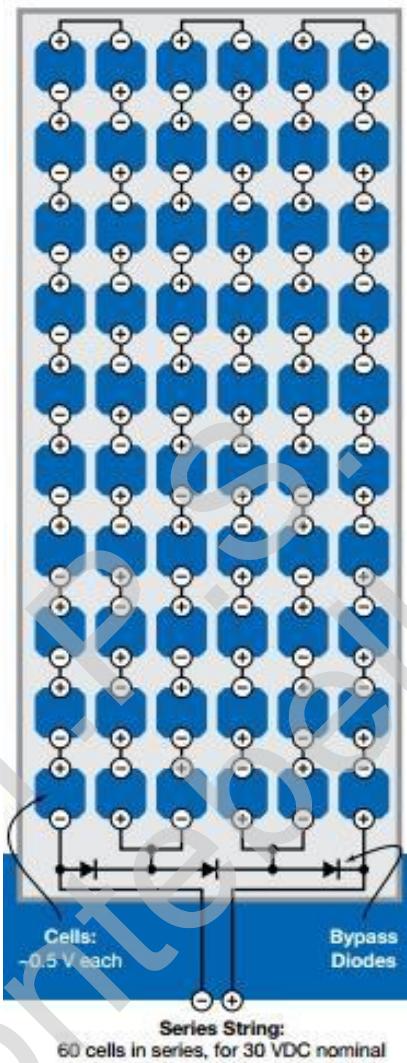
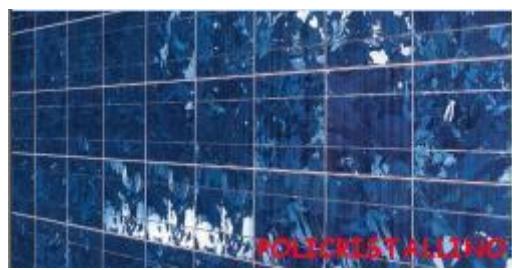


sensori e trasduttori



Circuito di condizionamento per NORP-12
Tensione di uscita da -5v a +5v quando la luminosità varia dai 10 ai 1000 lux



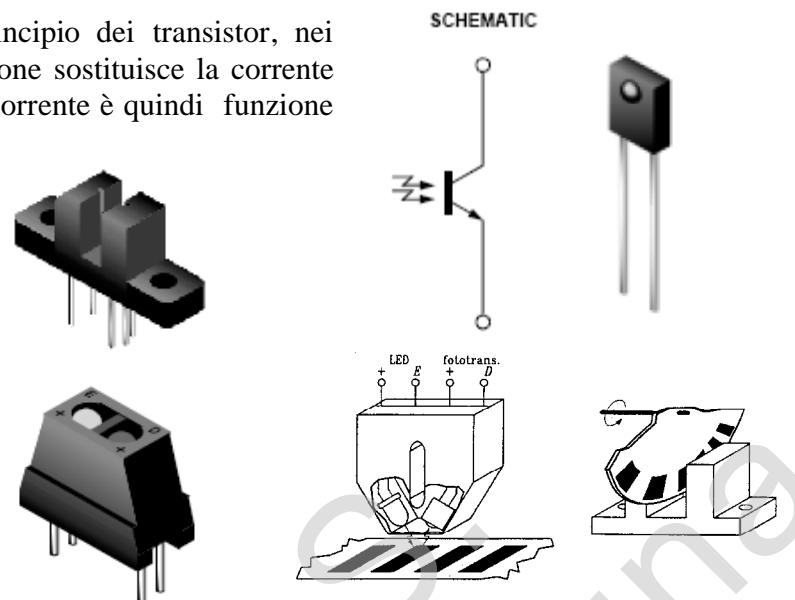


I fototransistor funzionano sullo stesso principio dei transistor, nei quali manca il terminale di base. La radiazione sostituisce la corrente di base. Il coefficiente di amplificazione di corrente è quindi funzione dell'intensità della radiazione incidente.

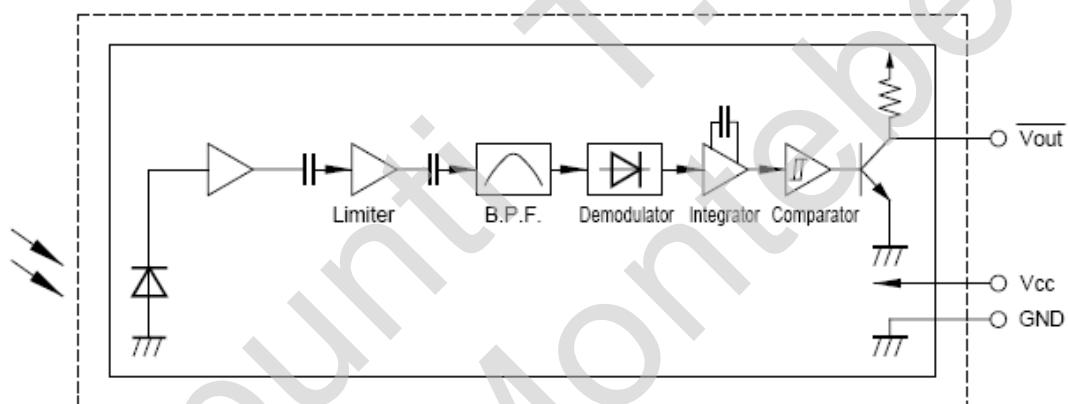
I principali parametri sono:

- I_c massima
- V_{ce} massima
- Potenza massima dissipabile
- Tempo di ritardo
- Tempo di salita
- Sensibilità (A/lux)

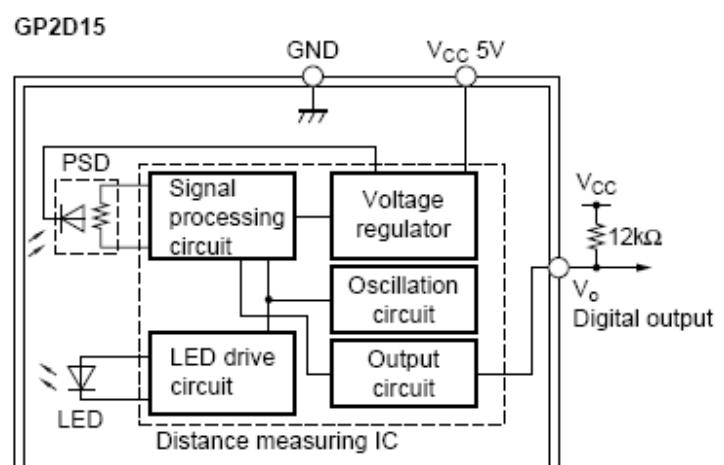
Rif. SDP8405

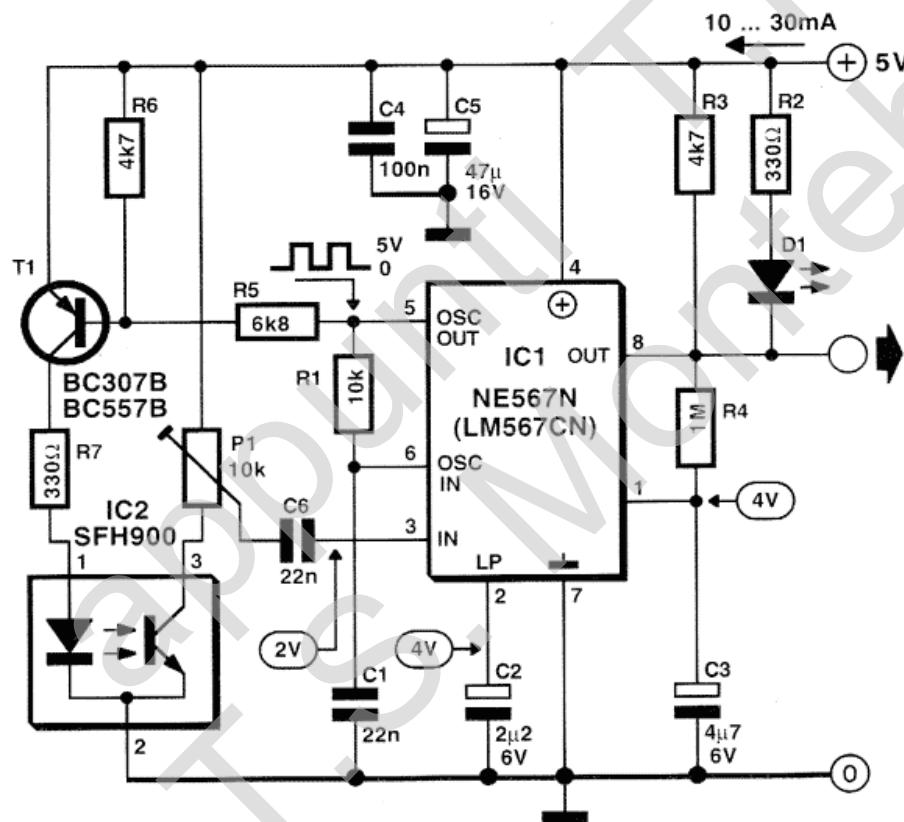
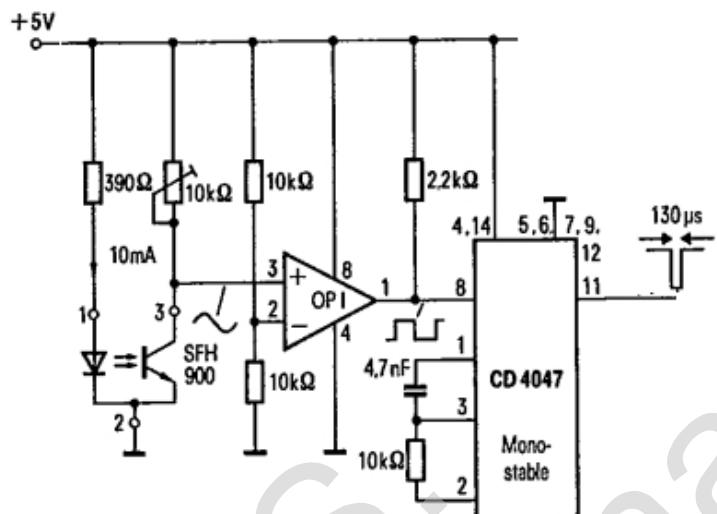
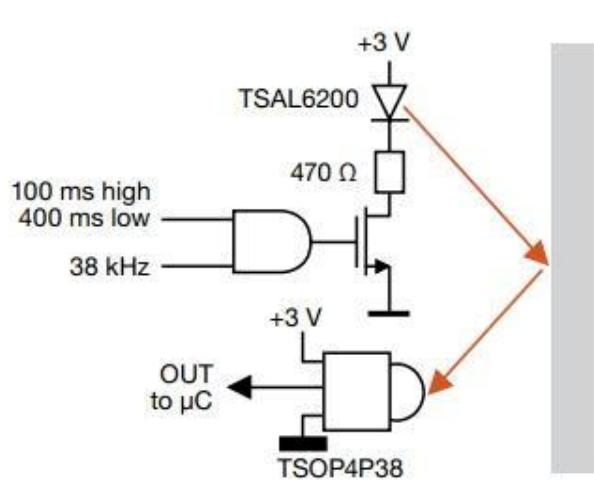


Per ovviare a problemi di interfacciamento alcune case hanno integrato nello stesso chip alcuni blocchi necessari. Tali componenti vengono usati nella comunicazione digitale.



Ref. PNA4602, HIM602, IS1U60, GP2D12_15





Grandezze fotometriche**Luminance; terms, conversion factors**

Unit	cd/m ² <u>Lumen/sr</u> m ²	cd/ft ² <u>Lumen/sr</u> ft ²	cd/in ² <u>Lumen/sr</u> in ²	asb Apostilb	sb Stilb	L Lambert	fL Foot-lambert
cd/m ²	1	9.29*10 ⁻²	6.454*10 ⁻⁴	π	10 ⁻⁴	$\pi*10^{-4}$	0.2919
cd/ft ²	10.764	1	6.94*10 ⁻³	33.82	1.076*10 ⁻³	3.382*10 ⁻³	π
cd/in ²	1550	144	1	4869	0.155	0.4869	452.4
asb	1/ π	2.957*10 ⁻²	2.054*10 ⁻⁴	1	10 ⁻⁴ / π	10 ⁻⁴	0.0929
sb	10 ⁴	929	6.452	$\pi*10^4$	1	π	2919
L	10 ⁴ / π	2.957*10 ²	2.054	10 ⁴	1/ π	1	929
fL	3.426	1/ π	2.211*10 ⁻³	10.764	3.426*10 ⁻⁴	1.0764*10 ⁻³	1

Illuminance; terms, conversion factors

Unit	Lux, lx (Lumen/m ²)	lm/cm ² Lumen/cm ²	fc Footcandle
Lux, lx	1	10 ⁻⁴	0.0929
lm/cm ²	10 ⁴	1	929
Footcandle, fc	10.764	10.764*10 ⁻⁴	1

1) **Flusso luminoso:** Φ indica la quantità di energia luminosa emessa nell'unità di tempo da una sorgente. Per energia luminosa si intende, per convenzione, quella emessa nell'intervallo da 380 e 780 nm. Per le lampade, la normativa CIE, prevede che la misurazione del flusso luminoso emesso venga effettuata dopo 100 ore di funzionamento.

L'unità di misura del flusso luminoso è il lumen (simbolo lm)

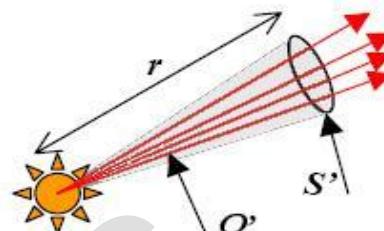
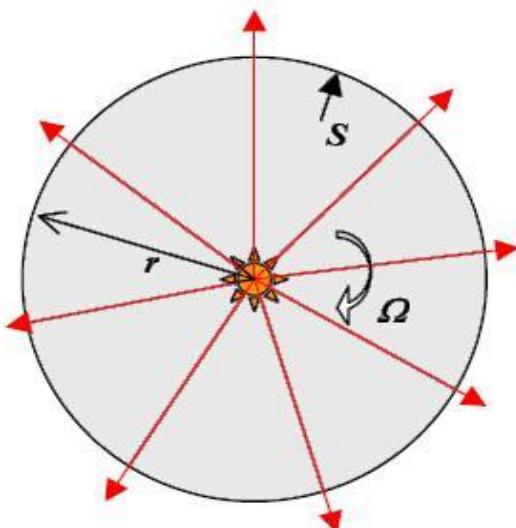
2) **Efficienza luminosa** è il rapporto tra il flusso luminoso emesso e la potenza assorbita per produrlo; l'unità di misura è il lumen su watt (lm/W)

3) **Intensità luminosa:** I_L : indica la quantità di flusso luminoso emessa da una sorgente all'interno dell'angolo solido in una data direzione. Per una sorgente puntiforme, l'intensità luminosa nella generica direzione è:

$$I_L = \frac{\Phi_L}{4p}$$

Una sorgente luminosa puntiforme emette radiazione della stessa intensità, in tutte le direzioni quindi il suo flusso luminoso si propaga uniformemente come generato dal centro di una sfera. Le sorgenti luminose artificiali, non emettono luce in modo uniforme, in tutte le direzioni dello spazio, il sistema pratico per visualizzare la distribuzione della luce emessa da una sorgente nello spazio consiste nel rappresentare le intensità luminose, come vettori applicati nel medesimo punto, come raggi uscenti dal centro di una sfera. L'unità di misura è la candela (cd , 1cd = 1 lm/sr)

L'angolo solido Siano date due sorgenti, una che emette il flusso radiante uniformemente in tutte le direzioni, l'altra che lo emette entro un certo cono intorno a una determinata direzione. L'angolo entro cui sono emessi i raggi è chiamato angolo solido Ω : nel caso della sfera, l'angolo copre tutte le direzioni, nel caso del cono è l'angolo al vertice del cono.



Che cosa significa e come si calcola l'angolo solido:

- Per capire che cosa è l'angolo solido Ω , immaginiamo la superficie che intercetta il flusso a una distanza d dalla sorgente: è chiaro che, man mano che ci si allontana, la superficie aumenta mentre il flusso è sempre lo stesso. Cerchiamo quindi di separare nell'espressione della superficie la parte che dipende da d da quella che non dipende.

Caso della *sfera*:

- l'area S_1 della sfera di raggio d_1 vale

$$S_1 = 4\pi d_1^2 \quad (1)$$

- l'area S_2 della sfera di raggio d_2 vale

$$S_2 = 4\pi d_2^2 \quad (2)$$

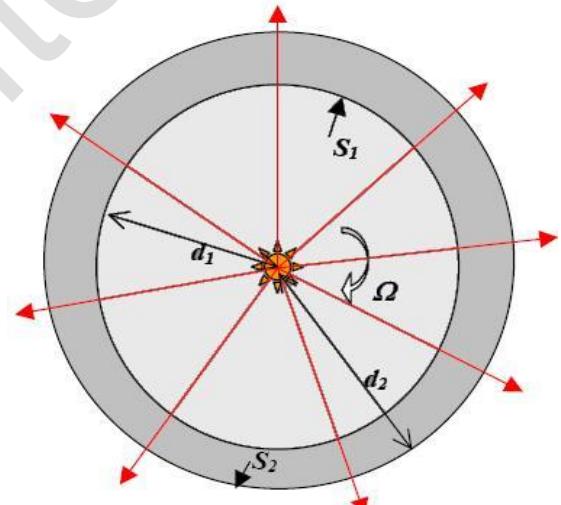
- possiamo quindi dire che, al variare di d , il fattore 4π che compare nella formula della superficie S non cambia, mentre tutta la variazione è dovuta al termine d^2

- il fattore 4π è l'*angolo solido* Ω della sfera

$$\Omega_{sfera} = 4\pi \quad (3)$$

- l'area S della sfera è pari a

$$S_{sfera} = \Omega_{sfera} \cdot d^2 \quad (4)$$



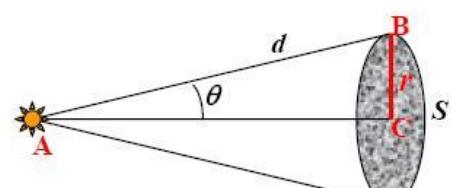
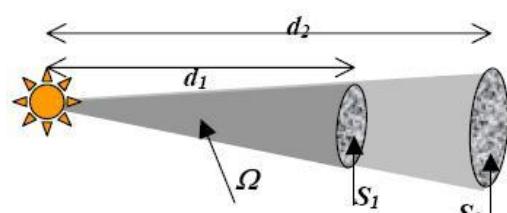
Caso del *cono*:

il calcolo vale solo per angoli di apertura del cono piccoli, perché in tal caso si può considerare che l'area della base del cono approssimi bene l'area intercettata dall'apertura del cono sulla sfera alla distanza d

- alla distanza d dalla sorgente la base del cono è un cerchio di raggio r e quindi la sua area vale

$$S = \pi \cdot r^2 \quad (5)$$

- per calcolare r costruiamo il triangolo rettangolo ABC avente per base BC il raggio e il vertice A nella sorgente; l'angolo al vertice θ è pari alla semiapertura del cono e l'ipotenusa alla distanza d ; r vale quindi:



$$r = d \operatorname{sen} \theta \quad (6)$$

- sostituendo nella (5) si ottiene:

$$S_{cono} = \pi \operatorname{sen}^2 \theta \cdot d^2$$

- possiamo quindi dire che, al variare di d , il fattore $\pi \operatorname{sen}^2 \theta$ che compare nella formula della superficie S non cambia, mentre tutta la variazione è dovuta al termine d^2

- il fattore $\pi \operatorname{sen}^2 \theta$ è l'*angolo solido* Ω del cono

$$\Omega_{cono} = \pi \operatorname{sen}^2 \theta \quad (7)$$

- l'area S della base del cono è pari a

$$S_{cono} = \Omega_{cono} \cdot d^2 \quad (8)$$

Confrontando l'equazione (8) del caso del cono con la (4) della sfera, si vede che sono identiche, basta usare di volta in volta il corretto valore dell'angolo solido Ω , per cui:

$$S = \Omega \cdot d^2 \quad (9)$$

Poiché il flusso Φ che attraversa la superficie S_1 è uguale a quello che attraversa la superficie S_2 , non dipende dalla distanza d ma solo dall'angolo solido Ω

L'unità di misura dell'angolo solido è lo *steradiante* (simbolo sr): si ha 1 sr quando l'angolo al vertice del cono è circa 1/12,56 dell'intero angolo solido che è racchiuso dalla sfera. ($4\pi = 12,56$)

4) Illuminamento E è il rapporto tra il flusso luminoso ricevuto da una superficie e l'area stessa. In altre parole indica la quantità di luce che colpisce una unità di superficie.

L'Illuminamento di un lux è il flusso luminoso intercettato da una superficie di 1 m^2 posta a distanza di 1m in direzione perpendicolare da una sorgente che emette con l'intensità di 1 candela. L'unità di misura è lux (lx) = 1 lm/m^2

$$E = \frac{\Delta \Phi_L}{\Delta S}$$

5) Radianza o densità di flusso emesso è una grandezza che riguarda sorgenti non puntiformi e rappresenta il flusso emesso da un metro quadrato di superficie.

L'unità di misura è lux (lx) = 1 lm/m^2

L'effetto luminoso di una superficie emittente nei confronti di un sensore che ne riceve la luce è molto diverso a seconda che il flusso luminoso emesso dalla superficie si propaghi tutto verso il sensore oppure si propaghi in varie direzioni.

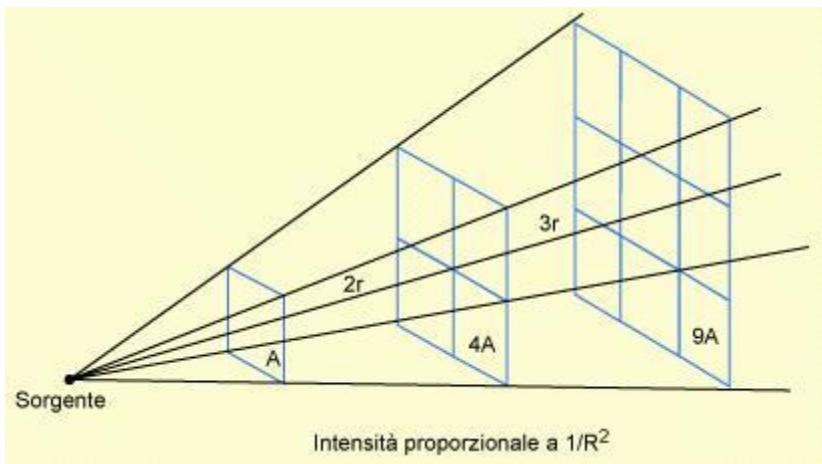
6) Luminanza L è il rapporto tra l'intensità luminosa I_L emessa dalla sorgente e ricevuta dal sensore e l'estensione della superficie emittente. (cd/m^2)

$$L = \frac{I_L}{S}$$

Legge dell'inverso del quadrato della distanza

Al variare della distanza d fra sorgente e superficie illuminata, a parità di angolo solido Ω di emissione la superficie illuminata cresce proporzionalmente al quadrato di d (equazione 9), sia che si tratti di una sorgente che emette isotropamente, sia che si tratti di una sorgente che emette entro un cono ristretto. Ne segue che gli irraggiamenti L_1 ed L_2 su due superfici a distanze d_1 e d_2 stanno fra di loro nella relazione:

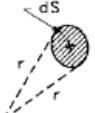
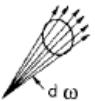
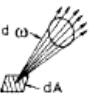
$$L_1 : L_2 = d_2^2 : d_1^2 \quad (10)$$



I.T.S. appunti T.P.S.
I.T.S. Montebelluna

Application Notes

Commonly Used Terms

TERM	DEFINITION	NOMENCLATURE	DESCRIPTION	EQUATION	UNITS
 Flux, Φ	Rate of flow of energy (Q) to, from or through a surface	Φ_e - (Radiometric)	Radiant Flux (Radiant Power)	$\frac{d\Phi_e}{dt}$	W, Watts
		Φ_v - (Photometric)	Luminous Intensity	$\frac{d\Phi_v}{dt}$	lm, lumens
 Incidence, E (Note 1)	Flux per unit area falling perpendicularly upon a surface	E_e - (Radiometric)	Radiant Incidence (Irradiance)	$\frac{d\Phi_e}{dA}$	W/cm ²
		E_v - (Photometric)	Luminous Incidence (Note 2)	$\frac{d\Phi_v}{dA}$	lx, lux (lm/m ²)
 Exitance, M	Flux per unit area from an emitting surface	M_e - (Radiometric)	Radiant Exitance (Emittance)	$\frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m ²
		M_v - (Radiometric)	Luminous Exitance	$\frac{d\Phi_v}{dA}$	lm/m ²
 Solid Angle, ω	A solid angle with its apex at the center of a sphere of radius, r , defines a spherical surface area, S , such that $\omega = S/r^2$			$d\omega = \frac{dS}{r^2}$	sr, Steradians
 Intensity, I	Flux per unit solid angle radiating from a point source	I_e - (Radiometric)	Radiant Intensity	$\frac{d\Phi_e}{d\omega}$	W/sr
		I_v - (Photometric)	Luminous Intensity	$\frac{d\Phi_v}{d\omega}$	cd, candelas (lm/sr)
 Sterance, L	Flux per unit solid angle per unit area of emitting surface at angle θ with respect to the surface normal	L_e - (Radiometric)	Radiant Sterance (Radiance)	$\frac{d\Phi_e}{dA \cos \theta}$ $\frac{d^2\Phi_e}{d\omega dA \cos \theta}$	W/(sr m ²)
		L_v - (Photometric)	Luminous Sterance (Luminance) (Note 3)	$\frac{d\Phi_v}{dA \cos \theta}$ $\frac{d^2\Phi_v}{d\omega dA \cos \theta}$	cd/m ²

Notes:

- For historical continuity, PerkinElmer uses the symbol "H" in the data sheets of this catalog.
- Other units for luminous intensity are:

Phot, ph	lm/cm^2
Footcandle, fc	lm/ft^2 (1 fc = 10.76 lux)

- Other units for luminous sterance are:

Lambert, L	$1/\pi cd/cm^2$
Foot lambert, fL	$1/\pi cd/ft^2$
Apostilb, asb	$1/\pi cd/m^2$
Stilb, sb	cd/cm^2

Dispositivi elettroottici

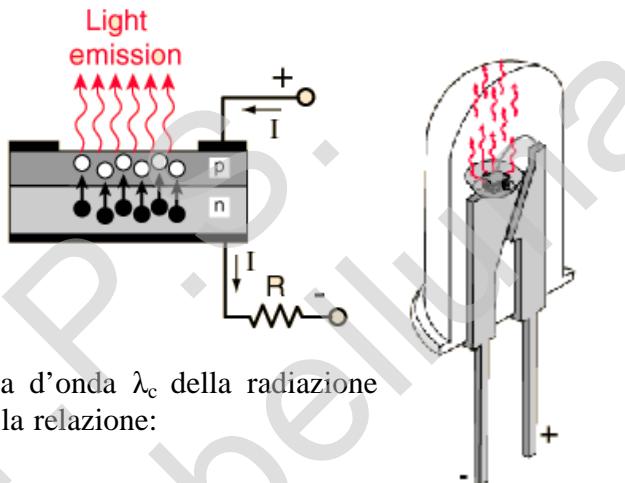
Sono dispositivi che convertono l'energia elettrica in energia luminosa.

Sono dispositivi emettitori:

- Diodi LED
- Diodi Laser
- Dispositivi LCD

L'assorbimento di un fotone da parte di un semiconduttore produce il passaggio di un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione. Questo fenomeno è reversibile, ed il passaggio di un elettrone dalla banda di conduzione a quella di valenza produce l'emissione di un fotone. Questo passaggio corrisponde alla ricombinazione di una coppia elettrone libero – lacuna, ed avviene quando un LED viene polarizzato direttamente. Quanto più è elevata la corrente tanto maggiori sono le ricombinazioni e quindi l'intensità della radiazione emessa. La lunghezza d'onda λ_c della radiazione emessa dipende dal salto energetico necessario, secondo la relazione:

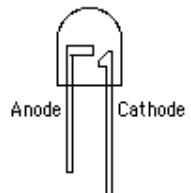
$$I_c = \frac{h \cdot c}{W_0}$$



Materiali

	λ (nm)
Fosfuro di Gallio GaP	550
Fosfuro Arsenuiro di Gallio GaAsP	640
Arsenuiro di Gallio Alluminio AlGaAa	680
Fosfuro di Gallio con Ossigeno GaP	700
Arsenuro di Gallio GaAs	880-920
Carburo di Silicio SiC	>550

colore	V_F (10mA)	V_R
Verde	2	3
Arancio	1,8	3
Rosso	1,5	3
Rosso	1,5	3
Infrarosso	1,1	3
Blu	3,5	1



I principali parametri sono:

I_F , corrente di polarizzazione diretta massima continua

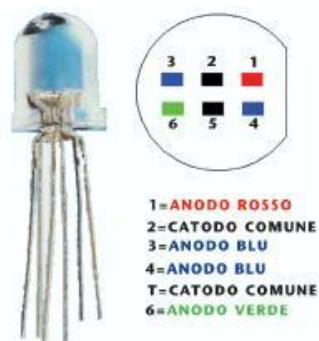
I_{FPK} , corrente di polarizzazione diretta di picco

V_R , tensione inversa massima

V_F tensione diretta

P_D , potenza dissipata massima

La radiazione emessa può essere valutata per mezzo del diagramma polare angolare di emissione e del diagramma di emissione spettrale.



Ref. QED233, LED55B, LD271

Wavelength (nm)	Color	Forward Voltage	LED Material
385	Ultraviolet	3.8	GaN, InGaN, or SiC
395	Ultraviolet	3.8	GaN, InGaN, or SiC
405	Violet	3.8	GaN, InGaN, or SiC
430	Blue	3.8	GaN, InGaN, or SiC
450	Blue	3.8	GaN, InGaN, or SiC
470	Blue	3.8	GaN, InGaN, or SiC
490	Blue-Green	3.6	GaN, InGaN, or SiC
505	Blue-Green	3.6	GaN, InGaN, or SiC
525	Green	3.6	GaN, InGaN, or SiC
555	Green	2.2	GaP
565	Green-Yellow	2.2	GaP
570	Yellow-Green	2.2	GaP
585	Yellow	2.2	InGaAlP or GaP
590	Yellow	2.2	InGaAlP or GaP
592	Amber-Yellow	2.2	InGaAlP or GaP
600	Yellow	2.2	InGaAlP or GaP
612	Orange	2.0	InGaAlP or GaP
625	Red-Orange	2.0	InGaAlP or GaP
630	Red	2.0	InGaAlP or GaP
645	Red	2.0	InGaAlP or GaP
660	Red	1.9	AlGaAs
670	Infrared	1.8	AlGaAs
680	Infrared	1.8	AlGaAs
700	Infrared	1.8	AlGaAs
<hr/>			
In = Indium	Ga = Gallium	Al = Aluminum	As = Arsenic
P = Phosphide	Si = Silicon	C = Carbide	N = Nitride

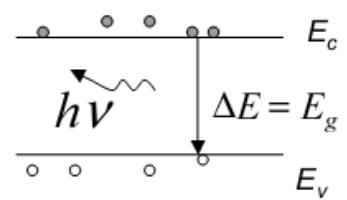
Un LED consiste comunque in una giunzione p-n. Per capire come possa emettere luce, bisogna notare che in meccanica quantistica una variazione di energia è associata a un "quanto" di radiazione o "fotone" secondo la relazione

$$h\nu = E_f - E_i = \Delta E \rightarrow \begin{cases} \Delta E < 0 \text{ Emissione} \\ \Delta E > 0 \text{ Assorbimento} \end{cases}$$

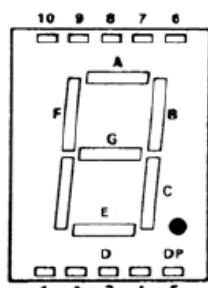
dove $h=6.63E-34 \text{ J} \cdot \text{s} = 4.14 \text{ E-15 eV} \cdot \text{s}$ è la costante di Planck e ν è la frequenza della radiazione elettromagnetica emessa o assorbita nel salto energetico.

Quando un elettrone "cade" dalla banda di conduzione alla banda di valenza per ricombinarsi con una lacuna, esso cede una energia pari a E_g che implica l'emissione di un fotone.

In alcuni semiconduttori come l'Arseniuro di Gallio (GaAs) l'energia di gap può essere regolata per mezzo del drogaggio, per esempio con fosforo, in modo che il fotone emesso cada nel visibile. Drogando di tipo n o p il materiale si può avere un eccesso di elettroni o lacune da utilizzare per l'emissione di fotoni. Facendo una giunzione p-n con tale materiale e polarizzando in maniera diretta il diodo, si può fare in modo che i fotoni emessi non vengano riassorbiti (cioè che i fotoni emessi non siano riutilizzati per salti da valenza a conduzione) e quindi si può avere emissione di luce. Tunando opportunamente il gap si può anche scegliere il colore della luce emessa.



$$h\nu = E_g \approx 2eV \quad (\nu \text{ nel visibile})$$

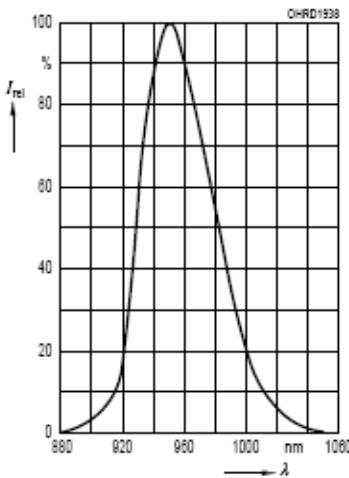


Pin FND507 / 567

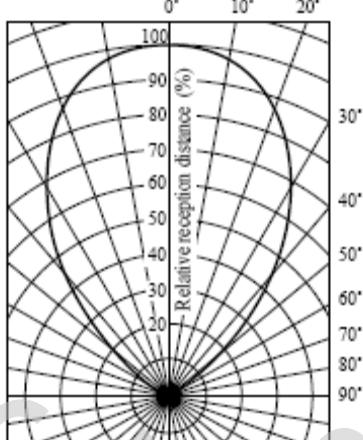
- 1 Segment E
- 2 Segment D
- 3 Common Anode
- 4 Segment C
- 5 Decimal Point
- 6 Segment B
- 7 Segment A
- 8 Common Anode
- 9 Segment F
- 10 Segment G

Relative spectral emission

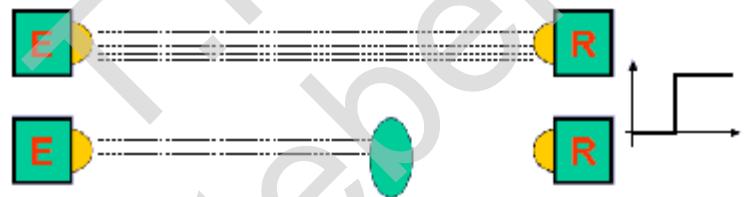
$$I_{\text{rel}} = f(\lambda)$$



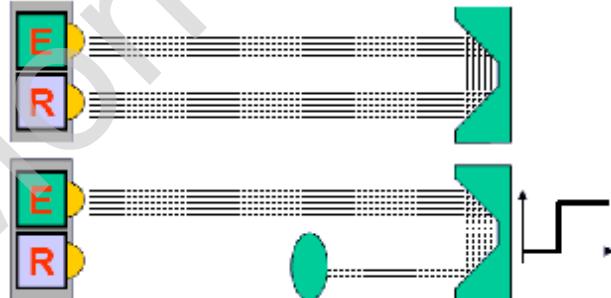
Directivity characteristics



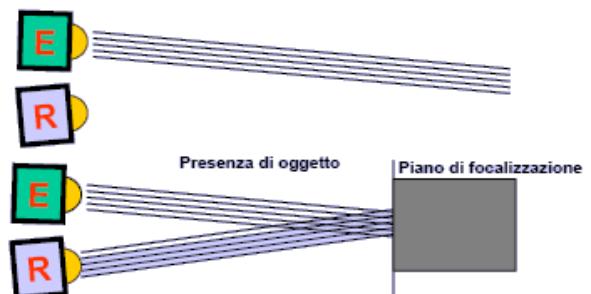
Sistemi fotoelettrici ad intercettazione percorso rettilineo



percorso ottico con elementi di rinvio



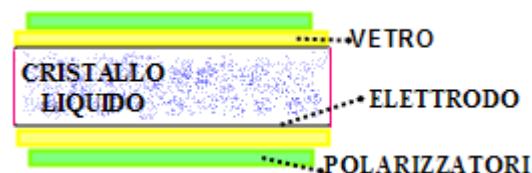
Sensori a riflessione (definiti anche "a tasteggiio")



LCD Liquid Crystal Display

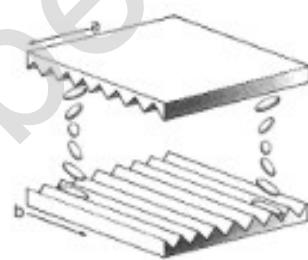
Gli LCD contrariamente ai LED, non emettono luce, ma agiscono sulla luce che li investe per formare immagini. Usano agenti chimici speciali detti cristalli liquidi, attraverso i quali la quantità di luce trasmessa può essere controllata. Lo schermo è diviso in elementi di immagine (pixel)

Il pannello display è composto da due vetri sigillati che contengono a sandwich il cristallo liquido; all'interno dei vetri ci sono degli elettrodi trasparenti (zinco/indio), all'esterno due strati di polarizzatore e sul vetro posteriore il riflettore o la sorgente luminosa. Il tutto ha uno spessore complessivo di pochi millimetri, mentre lo spessore dello strato di cristallo liquido è di qualche decina di μm .



Sono materiali (*Azoxyanisol Butylbenzolo*) che in certe condizioni di temperatura possono presentare proprietà caratteristiche dei liquidi, in altre dei solidi: sono materiali che si trovano nella fase mesomorfa, o mesofase. In questa fase le loro molecole possiedono una grande libertà di movimento, come avviene nei liquidi, mentre in altre circostanze possono disporre con un certo ordine come avviene nei materiali solidi cristallini. La condizione di mesofase può verificarsi solo dentro un ben determinato campo di temperature (-10°C +80°C).

Importante è anche il cosiddetto effetto di ancoraggio delle molecole dei cristalli liquidi a pareti di vetro opportunamente trattate, le quali entrando in contatto con delle molecole liquido-cristalline riescono ad indurre una orientazione preferenziale delle stesse in direzione parallela alla lastra stessa. Se le due superfici hanno scanalature disposte su assi perpendicolari tra loro, le molecole subiscono una torsione di 90° per allinearsi con entrambi gli assi.



Le molecole di cristallo liquido hanno poi la proprietà di "guidare" la luce che segue così il loro percorso. Quindi, se esse subiscono una torsione di 90°, lo stesso accadrà alla luce penetrata tra i due vetri che in questo modo oltrepasserà anche la seconda lastra polarizzatrice.

Se invece viene applicato un campo elettrico agli elettrodi che rivestono internamente i due vetri, allora le molecole di cristallo liquido ne sentono l'effetto e cambiano la loro disposizione fisica che diventa disordinata. In questo modo la luce non può più seguire l'orientamento di prima dei cristalli e non oltrepassa la seconda lastra.

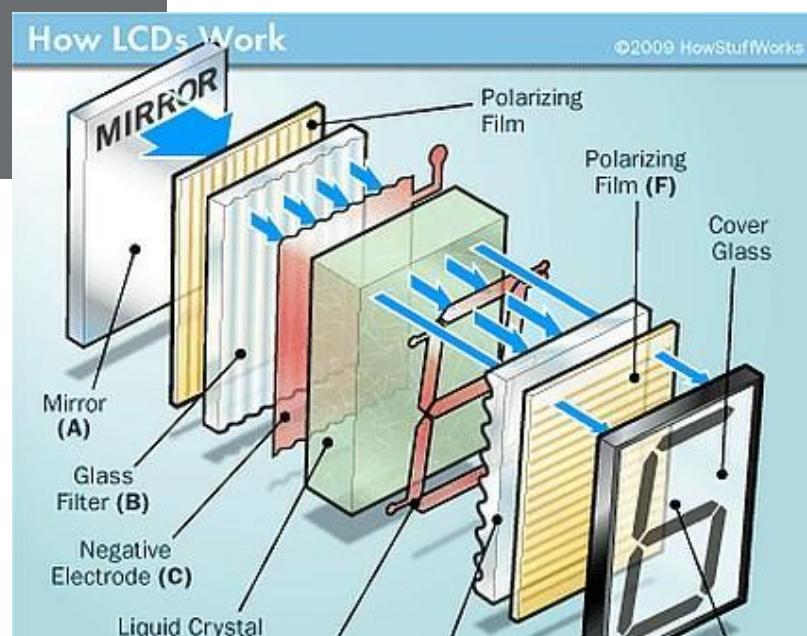
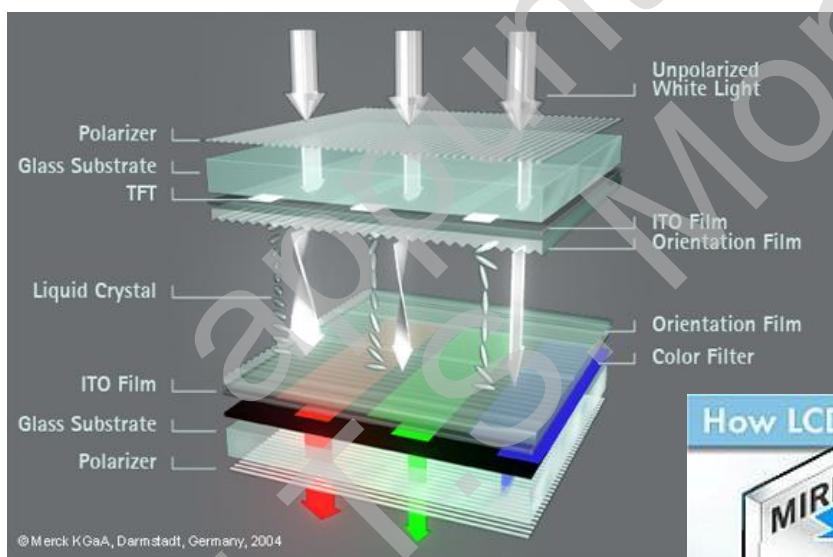
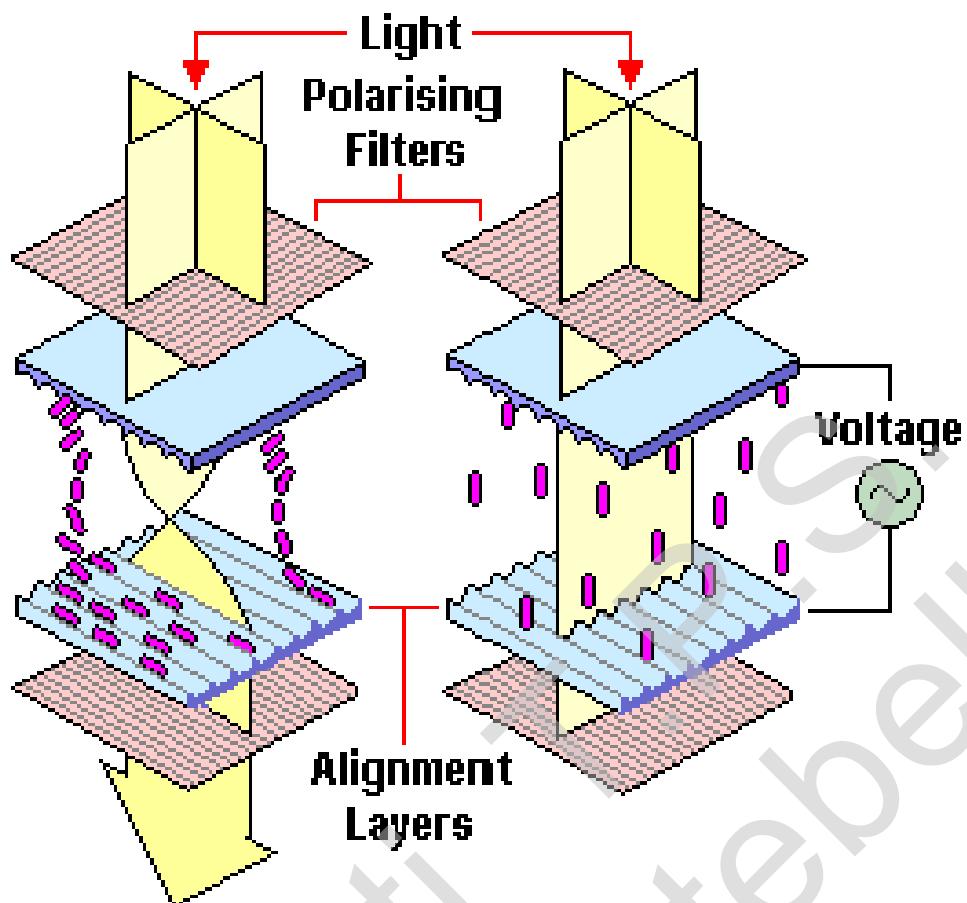
E' chiaro quindi come l'applicazione di un campo elettrico ai cristalli liquidi di una cella ci permette di utilizzarla come un otturatore per far passare o meno la luce.



L'impiego di una tensione continua può però provocare fenomeni di elettrolisi che possono portare alla distruzione degli elettrodi o di degradare il cristallo liquido, per cui si utilizza una tensione di pilotaggio alternata a bassa frequenza.

Rispetto ai Led presentano i seguenti vantaggi:

- bassissimo consumo
- durata illimitata
- visibilità in diverse condizioni di illuminazione
- maggiore economicità
- possono assumere qualsiasi forma e dimensione



Sensori piezoelettrici - Sistemi ad ultrasuoni

L'effetto piezoelettrico è stato scoperto da Pierre e Jacques Curie, che nel 1880 pubblicarono studi su questo fenomeno e sulla struttura e comportamento di cristalli di tormalina, quarzo, topazio, sale di Rochelle e altri materiali.



In questi materiali le molecole costituiscono dei dipoli elettrici, il cui orientamento può cambiare per effetto della forza applicata. In condizioni di quiete, tali dipoli elettrici sono disposti in maniera tale che le facce del cristallo hanno tutte lo stesso potenziale elettrico.

Se ad una piastrina di materiale piezoelettrico viene applicata una forza, sulle facce della piastrina compare una carica superficiale: è quindi rilevabile una differenza di potenziale che dipende dall'intensità della forza applicata. L'effetto della forza esterna sull'orientamento dei dipoli elettrici è di breve durata: l'effetto piezoelettrico è utilizzabile per rilevare *variazioni* di forza.

Questo effetto è **reversibile**: consente di trasformare potenza meccanica in potenza elettrica, e viceversa. Comportamento da attuatore.

Se si applica una differenza di potenziale al cristallo, si espande o si contrae lungo un asse determinato provocando una vibrazione anche violenta.

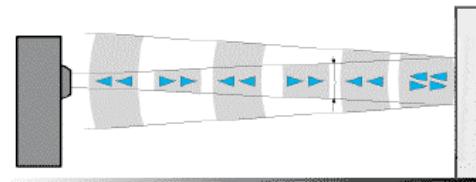
I materiali usati sono tipicamente i cristalli di quarzo (SiO_2) e cristalli sintetici ceramici.

Presentano un'elevata sensibilità e rispondono solo a **sollecitazioni dinamiche** in un campo di frequenze da **20Hz a 40KHz**; proprio questa caratteristica li rende adatti per il rilevamento di sollecitazioni ad alta frequenza, come ad esempio la pressione delle onde sonore (microfoni a cristallo) e la misura di vibrazioni in genere.

I dispositivi impiegati in campo elettronico vengono usati in circuiti oscillatori di elevata precisione (generatori di clock), sono costituiti da una sottile lamina di quarzo, di forma circolare o rettangolare, che presenta su due facce un sottile rivestimento metallico, al quale fanno capo i conduttori di collegamento con i due elettrodi esterni.

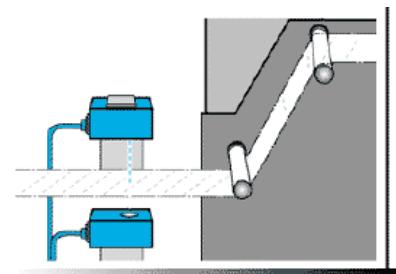
La lamina viene ricavata da un cristallo naturale o sintetico con un **taglio** che può assumere diverse angolature rispetto alla direzione degli assi cristallografici (ottico, meccanico, elettrico), e le dimensioni sono strettamente legate alla frequenza di risonanza.

I sistemi a ultrasuoni consentono misure di velocità, distanza, portata, livello, portata, basandosi sull'effetto Doppler, che consiste nella variazione di frequenza delle onde dovuta al moto relativo tra sorgente e ricevitore.



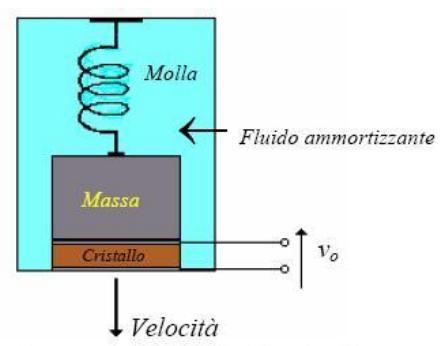
$$\Delta F = F \frac{V_{\text{relativa}}}{v_{\text{propagazione}}}$$

I modelli a riflessione consentono di eseguire delle misure valutando il **"tempo di volo"**, misurando il ritardo dell'onda riflessa.



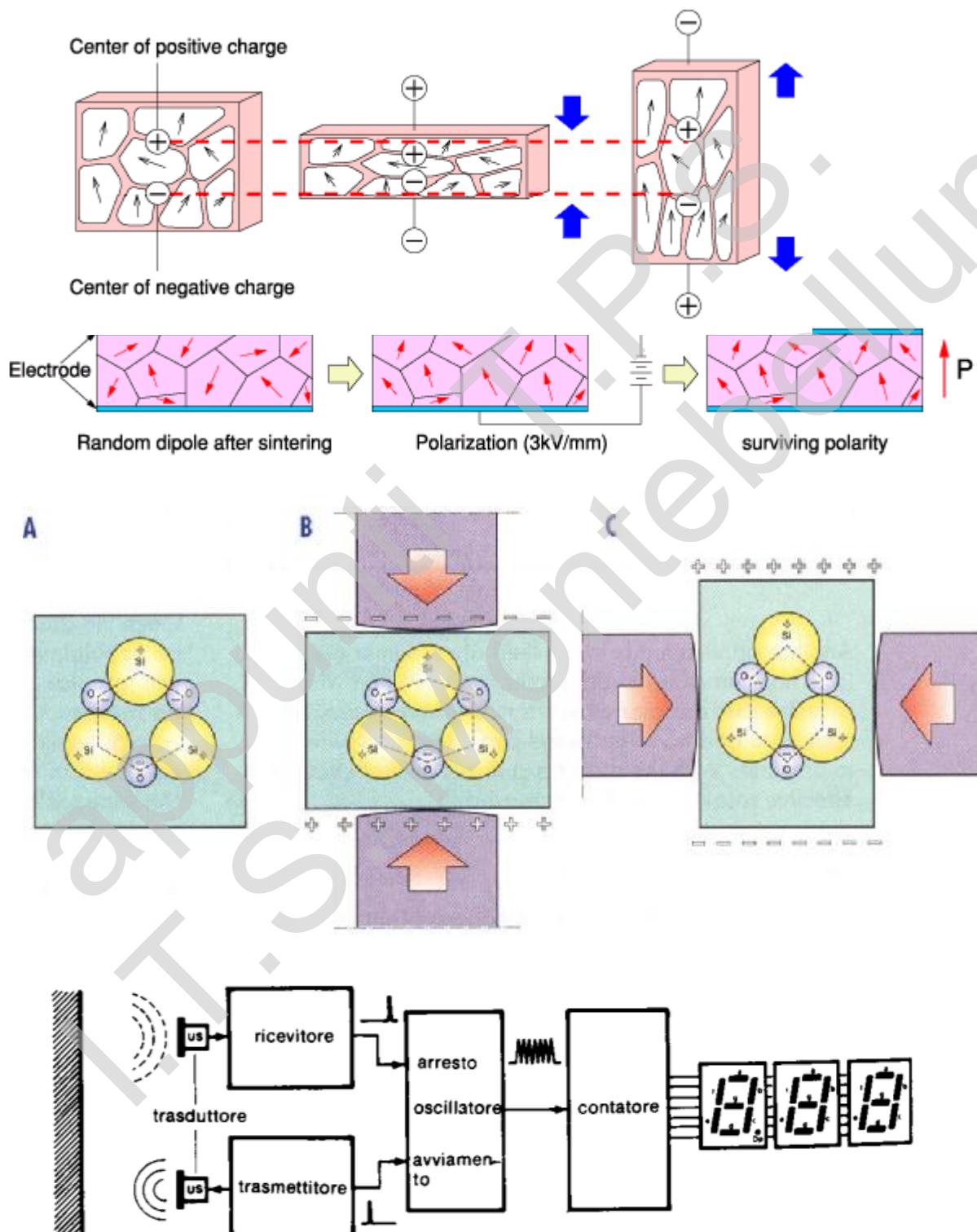
Applicazioni:

- Misura di distanze (velocità del suono è di 343,8 m/s a 20 °C, $v = 331,5 + 0,607t$ dove t è la temperatura in °C)
- Misura della velocità di un fluido all'interno di un condotto
- Allarmi, controllo accessi
- Sensori di parcheggio
- Medicina, diagnostica
- Riconoscimento di sostanze solide e liquide

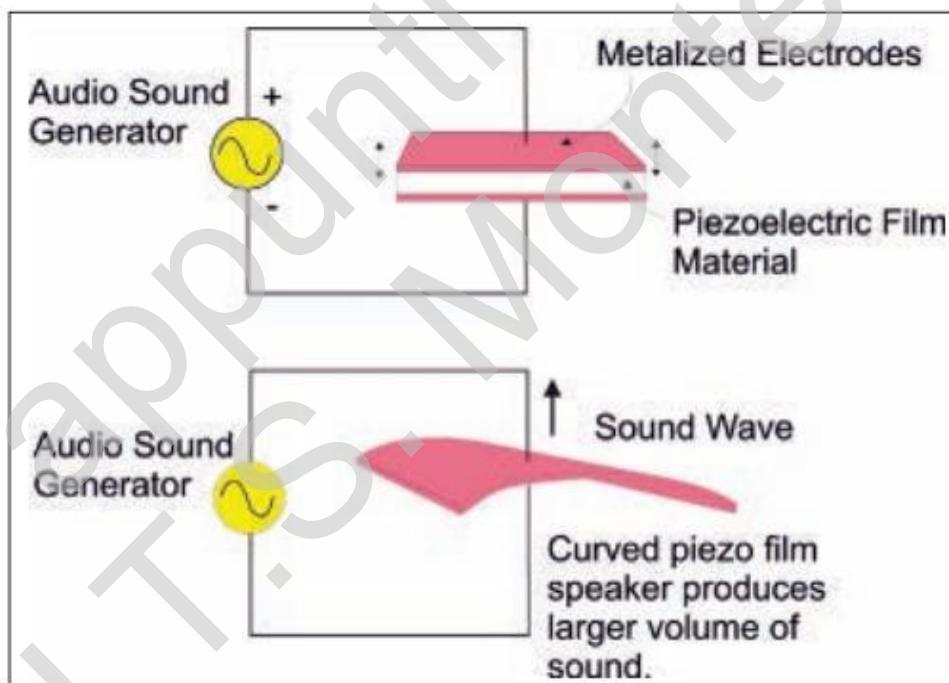
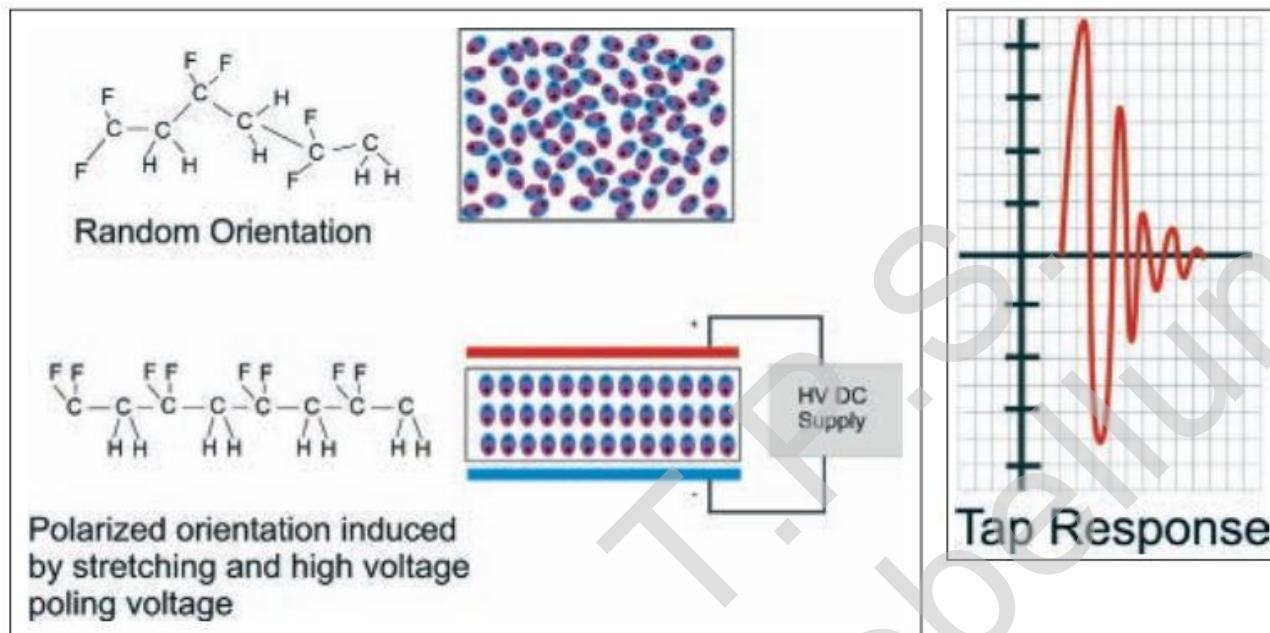


Nei modelli a trasmissione si misura l'intensità del segnale rilevato dal ricevitore affacciato al trasmittitore tra cui è posto il bersaglio.

Il fenomeno della piezoelettricità può essere usato per rilevare grandezze fisiche legate a forza e pressione; per esempio si può utilizzare un cristallo piezoelettrico per realizzare un accelerometro, cioè un sensore che fornisce un segnale di entità proporzionale all'accelerazione di un corpo in moto.



o stesso effetto si è osservato su film di polyvinylidene fluoride (PVDF) materiale termoplastico, in uno studio condotto da Kawai nel 1969. Con questo materiale opportunamente metallizzato si possono realizzare degli speaker piezoelettrici, altoparlanti poco voluminosi, che presentano una notevole larghezza di banda, elevata robustezza meccanica. Sono inoltre resistenti all'umidità e all'attacco di molti agenti chimici.



Sensori capacitivi – Trasduttori di umidità

Un condensatore a facce piane e parallele di superficie S poste tra loro a distanza d e che impiega un dielettrico avente costante dielettrica relativa ϵ_r , presenta tra le sue armature capacità C :

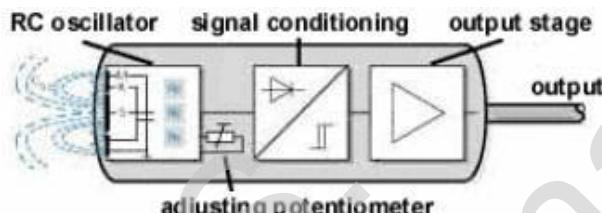
Si possono distinguere sensori capacitivi basati su:

- variazioni di costante dielettrica (es.: livello, densità)
- variazioni della geometria (es.: posizione)

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

Applicazioni tipiche:

- Sensori di prossimità
- Trasduttori di umidità



I sensori di umidità rilevano l'umidità relativa, definita come il rapporto tra l'umidità assoluta (quantità di vapore acqueo contenuto in un metro cubo d'aria) e l'umidità di condensazione (quantità di vapore acqueo contenuto in un metro cubo d'aria prima della condensa)

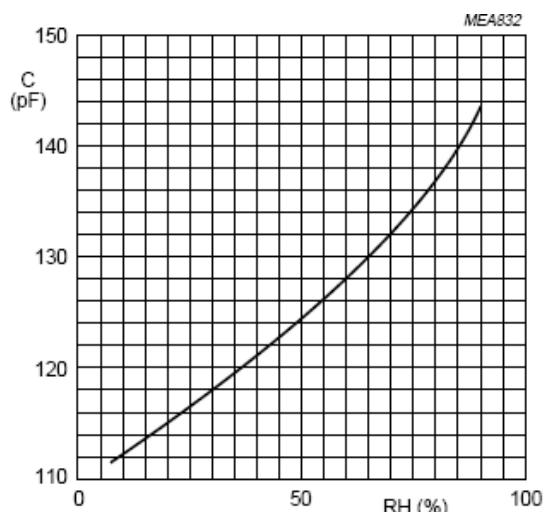
$$U\% = \frac{U_{ass}}{U_{sat}} 100$$

Sono costituiti da due armature metalliche separate da un materiale igroscopico. Si ottengono piccole variazioni di capacità con tempi di risposta lunghi. Ci sono anche trasduttori di umidità relativa a variazione di resistenza, costituiti da materiale igroscopici (cloruro di litio) nei quali piccole variazioni di umidità provocano grandi variazioni di resistenza.



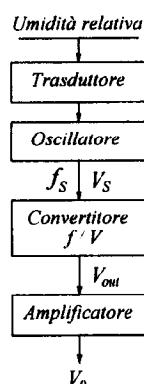
Rif. Umistor Philips 2322 691 90001, Honeywell HIH-3610, Humirel HS1100, Shinyei Kaisha C5-M3, Sensirion SHT11

PARAMETER	VALUE	UNIT
Humidity range (RH)	10 to 90	%
Capacitance at +25 °C; 43% RH; 100 kHz	$122 \pm 15\%$	pF
Sensitivity between 12 and 75% RH	0.4 ± 0.05	pF/%RH
Frequency	1 to 1000	kHz
Maximum AC or DC voltage	15	V
Storage humidity range (RH)	0 to 100	%
Ambient temperature range: operating storage	0 to +85 -25 to +85	°C
Drop test: height of free fall	1	m
Mass	≈ 1.3	g

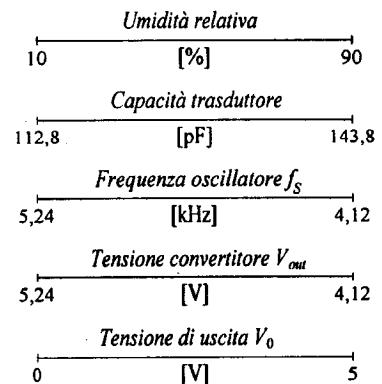


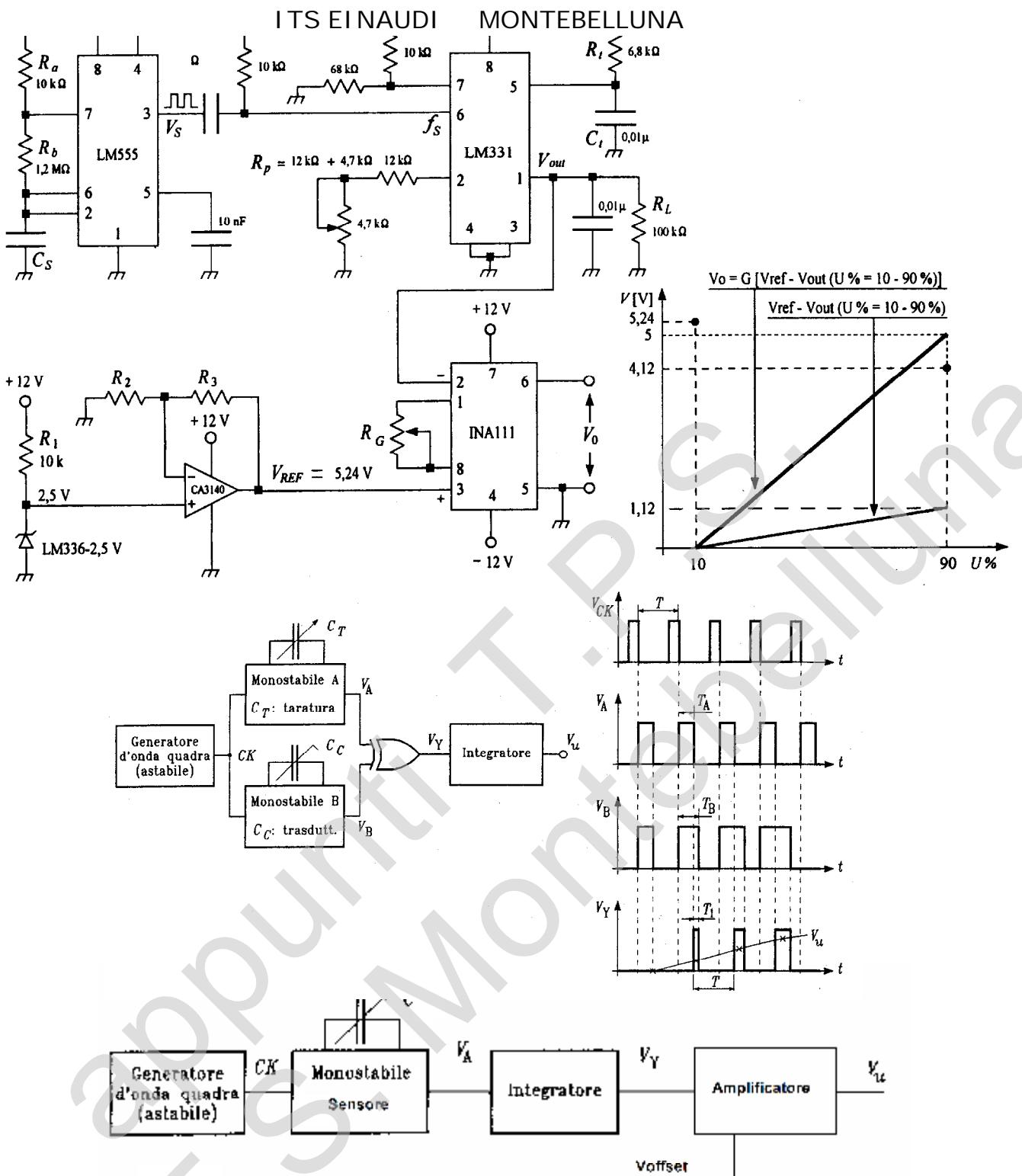
Il trasduttore può essere inserito in circuiti oscillatori nei quali la frequenza è proporzionale al valore della capacità.

Alcuni indicazioni sono riportate di seguito:



sensori e trasduttori

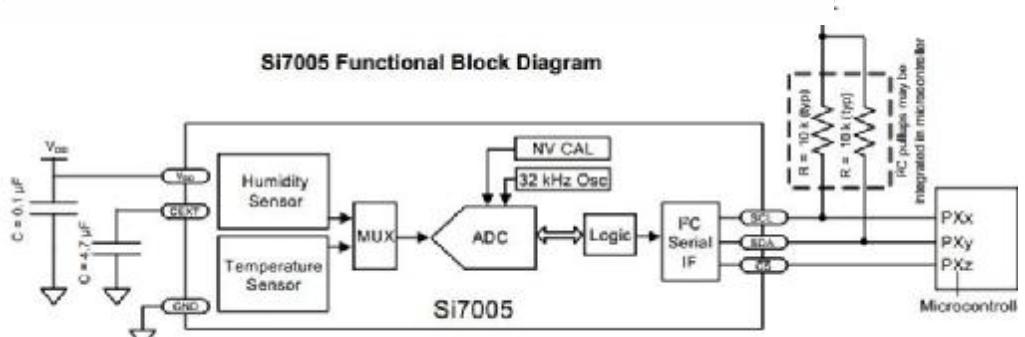




Sensore integrato di temperatura e umidità SHT11 (www.sensirion.com)

sensori e trasduttori

72



Dinamo tachimetriche

Sono sensori di velocità angolare che montati coassialmente all'albero di un motore, forniscono una tensione proporzionale alla velocità di rotazione.

Si tratta di dinamo con particolari caratteristiche elettromeccaniche, ossia con basso momento di inerzia ed elevata linearità, il cui circuito di eccitazione è costituito da un magnete permanente.

Il principio di funzionamento è basato sull'interazione tra una intensità di corrente che attraversa un conduttore e l'induzione magnetica.

La tensione di uscita è sostanzialmente continua ed il suo valor medio V_o è espresso dalla relazione

$$V_o = E - I_a R_a = K_D N - I_a R_a$$

dove $E = K_D N$ è la tensione a vuoto, K_D la costante tachimetrica, N la velocità angolare (giri/min), R_a la resistenza dell'avvolgimento ed I_a la corrente nell'avvolgimento.

Per un corretto uso, si deve fare in modo che la tensione di uscita non vari durante il funzionamento sotto carico (I_a deve rimanere entro i limiti fissati dal costruttore).

Quando la velocità di rotazione è costante, V_o non è esattamente continua, ma presenta un'ondulazione dovuta alla commutazione delle spazzole; questo inconveniente si elimina generalmente con un filtro passa basso.

Caratteristiche tecniche essenziali:

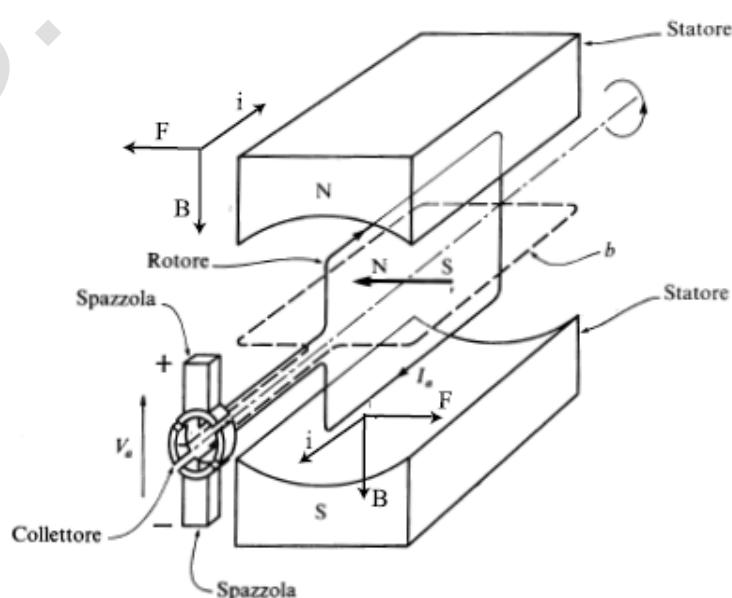
- linearità: 0.5÷1 %
- sensibilità: 5÷10V/1000 rpm
- ampiezza del ripple: 1÷2 %

Pregi:

- Sensore assoluto
- Costo contenuto
- Idoneo al funzionamento in ambienti ostili: all'interno di motori

Difetti:

- La tensione d'uscita presenta una certa ondulazione residua (ripple): dipende dal numero di lamelle del collettore
- Corrente assorbita in uscita piccola (per evitare smagnetizzazioni)
- Usura delle spazzole
- Misura solo la velocità



Microfono

Sono apparecchiature in grado di trasformare le onde sonore in segnali elettrici.

Il suono è costituito da una vibrazione dell'aria, che si propaga alla *velocità*

dove λ è la lunghezza d'onda e f è la frequenza.

$$v = \lambda f$$

Si definisce *intensità sonora* la quantità di energia acustica che attraversa una superficie di 1m^2 perpendicolare alla direzione di propagazione, e si misura in W/m^2 . $I = \frac{P^2}{\rho v}$

con P = pressione (Pascal),

ρ = densità (per l'aria a $25^\circ\text{C} = 1,18\text{Kg/m}^3$)

v = velocità di propagazione

Spesso viene espressa in dB:

dove I_{ref} è l'intensità sonora di riferimento che rappresenta il minimo livello percepibile da un orecchio umano e corrisponde all'intensità di 10^{-12}W/m^2 .

$$I_L = 10 \log \frac{I}{I_{\text{ref}}}$$

In acustica è spesso utilizzato il livello di potenza sonora:
in cui W_{ref} è la potenza sonora di riferimento (10^{-12}W)

$$P_{WL} = 10 \log \frac{W}{W_{\text{ref}}}$$

L'elemento sensibile di un microfono è una membrana che vibra sotto l'azione dell'onda acustica.

I parametri principali sono:

sensibilità: rapporto tra il la tensione del segnale elettrico e la pressione sonora necessaria per ottenerla, utilizzando un'onda alla frequenza di 1 KHz (mV/Pa oppure dB)

direzionalità: la sua sensibilità non è uguale in tutte le direzioni, viene espresso tramite diagrammi polari

risposta in frequenza: rappresenta l'andamento della sensibilità al variare della frequenza

impedenza: il circuito equivalente corrisponde ad un generatore di tensione caratterizzato da una impedenza che produce una caduta di tensione interna quando viene collegato al circuito.

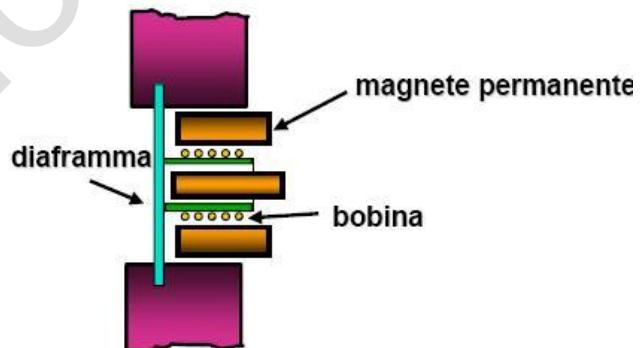
distorsione di non linearità: dipende dal fatto che il segnale elettrico fornito non è sempre proporzionale alla pressione sonora esercitata dall'onda sonora.

In base alle tecniche di costruzione possono essere suddivisi in:

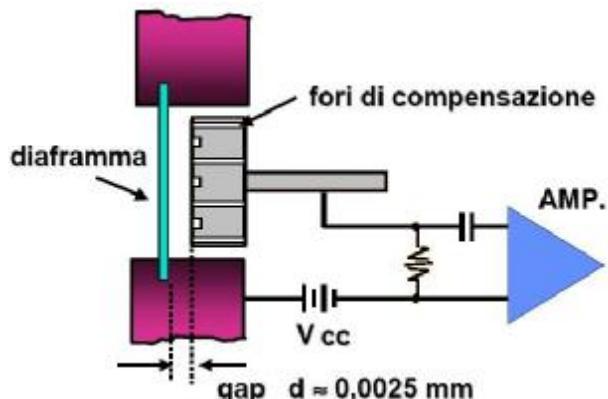
1. Elettrodinamici
2. Capacitivi
3. Piezoelettrici

1) la membrana vibrando muove una bobina all'interno di un magnete. Col suo movimento, la bobina taglia le linee di forza del campo magnetico ed ai suoi terminali nasce una f.e.m.

Risposta tipica 50Hz – 15KHz, sensibilità -70dB



2) sfruttano la capacità di un condensatore che ha un'armatura mobile, costituita dalla membrana che vibra per effetto dell'onda sonora.



Trasduttori di gas

Principi di funzionamento:

- le variazioni di resistenza subite da alcuni materiali (nickel, platino, ossido di stagno) quando sono riscaldati in presenza di sostanze gassose (sens. di O₂ o sonda λ)
- le variazioni di resistenza subite da materiali semiconduttori debolmente drogati quando assorbono gas

Il trasduttore di gas a semiconduttore è formato da una cella metallica all'interno del quale, su un supporto ceramico, vi è un filamento in grado di riscaldare un materiale sensibile (SnO₂) ancorato a due elettrodi. La resistenza riscaldante ha lo scopo di mantenere elevata la temperatura del dispositivo al fine di stabilizzare il fenomeno sul quale si basa il suo funzionamento.

A temperatura ambiente, il passaggio di corrente fra i due elettrodi è praticamente inesistente, poiché la resistività del materiale è molto elevata: alimentando la resistenza riscaldante, la temperatura del sensore viene portata a regime, che possono risultare anche molto elevati (400°C). A questa temperatura, la resistività si stabilizza su valori di qualche KΩ, in assenza di contaminanti. Ciò avviene in seguito ad una reazione elettrochimica sulla superficie del sensore, tra l'ossigeno atmosferico e i granuli di biossido di stagno sinterizzato che formano il rivestimento sensibile. In presenza di piccolissime quantità di catalizzatore (Palladio), sulla superficie dei granuli si forma una strato di molecole di ossigeno ionizzate negativamente (O₂⁻).

Tra questo strato ed il biossido di stagno esiste un continuo scambio di elettroni che influenza la conducibilità elettrica fra granulo e granulo. In presenza di gas riducenti, parte delle molecole di ossigeno superficiali reagiscono col gas, liberando elettroni che abbassano la resistività tra i granuli. Il valore di resistività è inversamente proporzionale alla concentrazione del gas: collegando al sensore un opportuno circuito elettronico, è possibile ottenere un valore di tensione che possiamo utilizzare nei circuiti di misura.

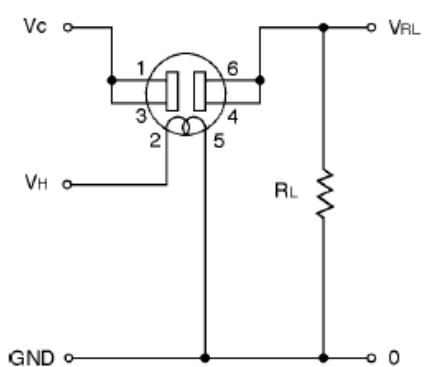
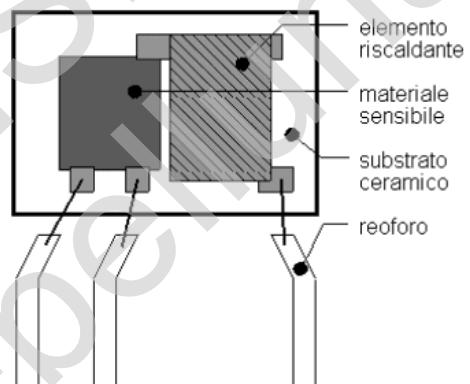
La risposta del sensore può essere influenzata dalle variazioni dell'umidità e della temperatura ambientali. Queste variazioni devono essere compensate elettronicamente, in modo da avere segnalazioni attendibili.

Per quanto riguarda la selettività si può affermare che essa è tutt'altro che elevata poiché il sensore a ossido semiconduttore reagisce in modo molto simile in presenza di qualsiasi gas riduttivo. Infine bisogna sottolineare che rispetto ad altri sensori questi non permettono grande precisione di misura soprattutto a causa delle forti influenze dei parametri atmosferici quali pressione, umidità e temperatura. Per questi motivi questi sensori non vengono utilizzati nel campo dell'analisi quantitativa mentre hanno molto successo per realizzare allarmi contro fughe di gas.

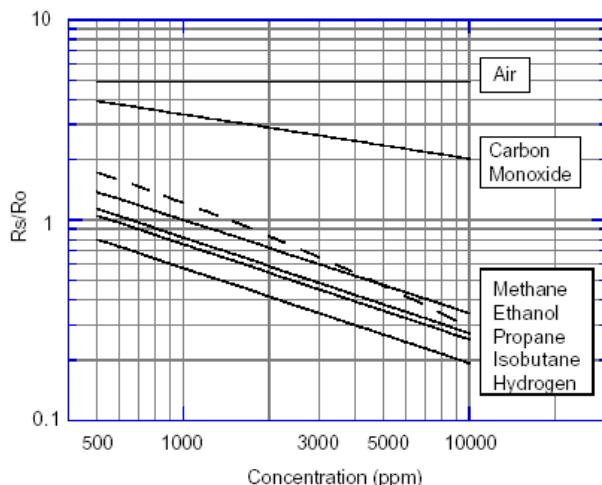
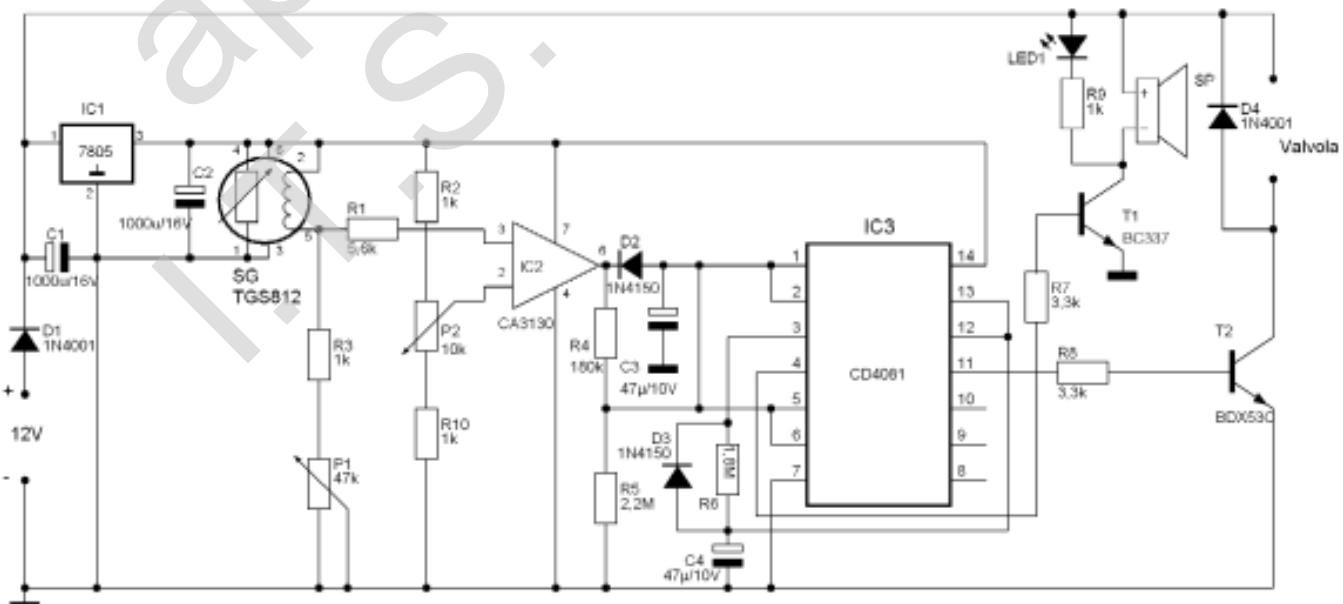
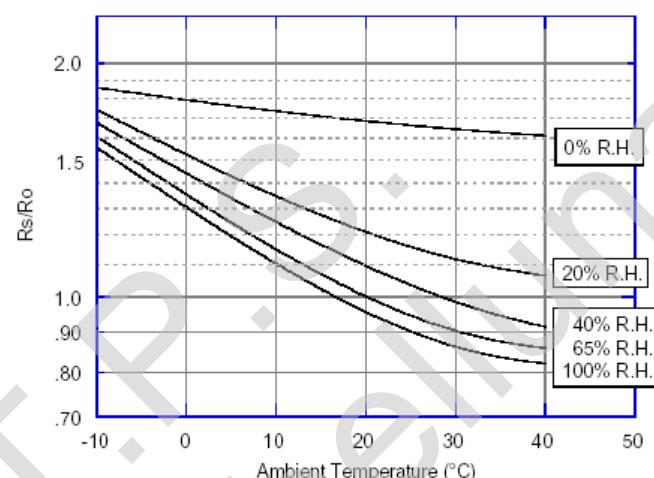
Punti di forza Semplicità di funzionamento Ridotte dimensioni Bassi costi di produzione.

Punti deboli Ridotta stabilità Difficoltà di riproducibilità
Scarsa selettività e sensitività per alcuni scopi

Rif. NAP11, Figaro TGS813, Elkart 11/2500 – 11/2515 ,TGS4160



Esempio per TGS 813

CARATTERISTICA DI TRASFERIMENTO**AL VARIARE DEI TIPI DI GAS:** R_s = resistenza istantanea del sensore R_0 = resistenza del sensore in presenza di una concentrazione di metano di 1000ppm**Punti di forza** Semplicità di funzionamento Ridotte dimensioni Bassi costi di produzione.**Punti deboli** Ridotta stabilità Difficoltà di riproducibilità Scarsa selettività e sensitività per alcuni scopi**CARATTERISTICA DI TRASFERIMENTO****AL VARIARE DELLA TEMPERATURA E DELL'UMIDITÀ:** R_s = resistenza del sensore in presenza di una concentrazione di metano di 1000ppm R_0 = resistenza istantanea del sensore in presenza di una concentrazione di metano di 1000ppm

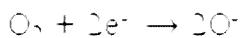
Principi di funzionamento dei sensori di Gas a semiconduttore

Tali sensori sono costituiti all'interno da un tubicino in materiale ceramico (Al_2O_3) intorno al quale è depositato un **film sottile di Biossido di Stagno (SnO_2)**.

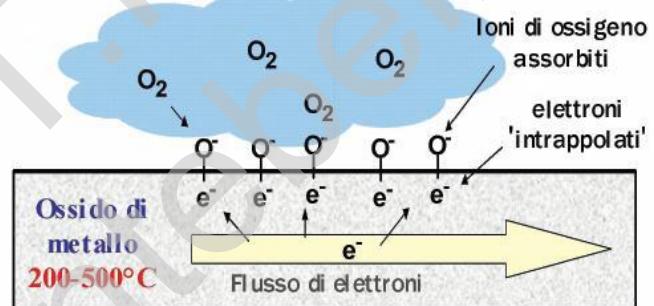
Il Biossido di Stagno è un semiconduttore, più precisamente un semiconduttore di tipo N: ovvero tale materiale viene **drogato** (vengono cioè aggiunti elementi chimici alla sua struttura) in maniera tale che vi sia al suo interno un eccesso di elettroni liberi che sono i responsabili della conduzione di corrente elettrica.

Fin qui nulla di nuovo: è lo stesso sistema che si utilizza per i normali semiconduttori a cui siamo abituati: diodi, leds, transistors ecc. Sappiamo bene qual è la prerogativa dei semiconduttori: a seconda del materiale con cui vengono drogati e della loro struttura possono essere "pilotati" per poter condurre/non condurre la corrente soltanto in particolari casi.

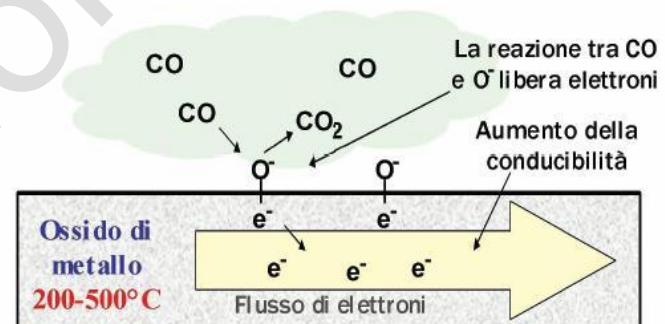
Questo film sottile di biossido di stagno inoltre è poroso, il che vuol dire che presenta dei *microfori* all'interno dei quali può facilmente penetrare l'ossigeno ambientale. In condizioni normali l'ossigeno viene assorbito da questo film sottile, sottraendo elettroni alla struttura secondo la reazione:



Come abbiamo detto il Biossido di Stagno ha un eccesso di elettroni; l'ossigeno entrando all'interno del semiconduttore, sottrae questi elettroni (e^-) con la conseguenza di far **diminuire la conducibilità** del materiale (o in altre parole: **ne fa aumentare la resistenza elettrica**).



Mettiamo adesso il caso che nell'ambiente si trovino dei vapori di alcool (faccio l'esempio con l'alcool ma la trattazione può essere adattata anche ad altre sostanze chimiche). Le molecole di alcool saranno assorbite sulla superficie e l'alcool subirà un **processo di ossidazione**.



Precisazione per i non-chimici:

Una sostanza si ossida quando perde elettroni.
Una sostanza si riduce quando acquista elettroni.

Di conseguenza una sostanza viene chiamata **ossidante** quando causa la perdita di elettroni (quindi di per sé si riduce: ovvero acquista elettroni ma togliendoli ad un'altra sostanza). Una sostanza viene chiamata riducente quando causa l'acquisto di elettroni (e quindi di per sé si ossida).

E' prassi comune dire difatti che una sostanza si ossida quando si trova a contatto con l'ossigeno (con l'aria) ed è corretto: difatti l'ossigeno è appunto ossidante in quanto tende a togliere elettroni dalle altre sostanze.

I vapori di alcool subiranno il seguente processo:



In realtà questa non è precisamente la reazione che avviene ma ne è soltanto il “prodotto finale” e rappresenta una semplificazione. La sequenza reale dovrebbe essere la seguente: L’alcool etilico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) viene ossidato dall’ossigeno molecolare (O_2 e non dall’ossigeno caricato negativamente che di per sé non è ossidante in quanto è già ridotto) rilasciando due protoni (H^+) i quali reagiscono con l’ossigeno carico negativamente (O^-) formando appunto acqua e liberando gli elettroni in eccesso (e^-).

In pratica l’alcool ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) reagisce ossidandosi ad acido acetico (CH_3COOH) ed acqua (H_2O) e (cosa importante) **liberando elettroni**.

Gli elettroni liberati ora aumentano la conducibilità del materiale, di conseguenza la resistenza elettrica diminuisce causando un aumento di V_{out} nel nostro partitore di tensione.

L’alcool in effetti non si ossida direttamente ad acido acetico ma passa per uno stato intermedio in cui si forma Acetaldeide, ma tale reazione è talmente rapida che in pratica l’acetaldeide non ha vita.

Nella nostra applicazione andremo quindi a determinare una diminuzione di resistenza del sensore che ci indica che nell’ambiente circostante è appunto presente alcool (o la sostanza per la quale il sensore è stato costruito).

Abbiamo fatto l’esempio dell’alcool etilico ma in realtà il meccanismo è lo stesso per tutti i tipi di gas/vapori: avviene sempre una reazione di ossido-riduzione, ovvero c’è sempre una sostanza che si ossida liberando elettroni e aumentando la conducibilità del sensore. La sensibilità all’uno o all’altro tipo di gas, nei diversi sensori, viene ottenuta cambiando l’elemento di drogaggio del semiconduttore.

C’è un’altra cosa importante da aggiungere: tali sensori hanno sempre all’interno un **elemento riscaldante** (costituito da una lega di Nickel-Cromo). Questo è necessario per vari motivi. La sensibilità è infatti in funzione della temperatura: maggiore è la temperatura maggiore è la capacità del sistema di “captare” molecole di gas nell’ambiente circostante. Le reazioni che si sviluppano sulla superficie del sensore sono endotermiche, ovvero assorbono calore dall’ambiente circostante, e un aumento di temperatura favorisce il verificarsi delle reazioni chimiche, aumentando di conseguenza la sensibilità, così come l’adsorbimento di ossigeno.

Questi sensori hanno una sensibilità molto elevata: possiamo infatti notare come in presenza di piccole quantità di gas nell’ambiente, la tensione in uscita dal partitore aumenta in maniera repentina. Hanno però numerosi svantaggi tra cui la durata (non hanno una vita molto lunga e necessitano di essere sostituiti dopo alcuni anni di funzionamento) e la risposta non lineare. Il loro basso costo e la loro semplicità di uso però ne hanno di molto diffuso l’utilizzo.

Come è possibile vedere dai data sheet la sensibilità di tali sensori viene espressa in funzione della concentrazione di alcool, come R_s/R_0 dove R_s è la resistenza “attuale” del sensore (cioè a varie concentrazioni di vapore) e R_0 è il valore di resistenza ad una concentrazione nota di alcool (200ppm per l’MQ-3 e 300ppm per il TGS822).

Inoltre il valore di R_0 (valore di R_s ad una concentrazione nota di alcool) non è “fisso” ma oscilla tra $1\text{M}\Omega$ e $8\text{M}\Omega$ per l’ MQ-3 (0,4mg/l di alcool, corrispondente a circa 200ppm) e tra $1\text{K}\Omega$ e $10\text{K}\Omega$ per il TGS822 (300ppm).

La sensibilità di tali sensori è ovviamente in funzione anche dell’umidità ambiente oltre che della temperatura, per cui potete capire come sia molto difficile ottenere un sistema di misura preciso con tali sensori, considerando anche il fatto che l’andamento della conducibilità in funzione della concentrazione di gas è logaritmico.

Elenco di sensori disponibile della FIGARO

<http://www.figarosensor.com>**Combustible Gases**

LP-Gas/Propane (500-10000ppm)	TGS813	TGS2610*
Natural gas/Methane (500-10000ppm)	TGS842	TGS2611*
General combustible gas (500-10000ppm)	TGS813	TGS2610*
Hydrogen (50-1000ppm)	TGS821	

Toxic Gases

Carbon monoxide (50-1000ppm)	TGS2442*
Ammonia (30-300ppm)	TGS826
Hydrogen sulfide (5-100ppm)	TGS825

Organic Solvents

Alcohol, toluene, xylene (50-5000ppm)	TGS822	TGS2620*
Other volatile organic vapors	TGS822	TGS2620*

CFCs (HCFCs and HFCs)

R-22, R-113 (100-3000ppm)	TGS830
R-21-R-22 (100-3000ppm)	TGS831
R-134a,R-22 (100-3000ppm)	TGS832

Indoor Pollutants

Carbon dioxide	TGS4160	TGS4161*
Air contaminants (<10ppm)	TGS800	TGS2600*

Automobile Ventilation

Gasoline exhaust	TGS2104*
Gasoline and diesel exhaust	TGS2201*

Cooking Vapors

Volatile vapors from food (alcohol)	TGS880
Water vapors from food	TGS883T

Oxygen

0-100% - 5-year life, 12 sec. to 90% response	KE-25
0-100% - 10-year life, 60 sec. to 90% response	KE-50