

I TRASDUTTORI

Un trasduttore (o sensore) è un dispositivo in grado di rilevare una grandezza fisica di tipo qualsiasi (termico, luminoso, magnetico, meccanico, chimico, ecc.) e di trasformarla in una grandezza di altro tipo, generalmente elettrica (tensione o corrente) al fine di poterla :

- misurare
- confrontare con una grandezza della stessa natura
- elaborare (amplificare, traslare, digitalizzare) (**condizionamento del segnale**)
- acquisire tramite un sistema di elaborazioni dati e/o trasportare a distanza tramite un sistema di comunicazione dati per poter essere memorizzata e / o visualizzata .
- usare in un sistema di controllo

Segnali Standard di un trasduttore

segnale in corrente da 0 a 20 [mA]
segnale in corrente da 4 a 20 [mA]
segnale in tensione da 0 a 5 [V]
segnale in tensione da 0 a 10 [V]

I trasduttori possono essere classificati in molti modi.

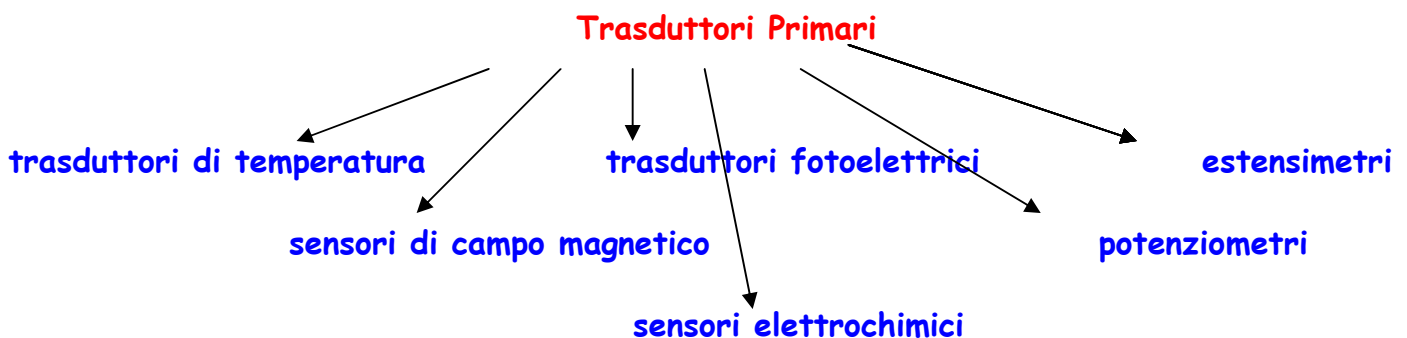
1. Possiamo distinguerli in 2 tipi:

- **attivi** (producono direttamente tensione o corrente)
- **passivi** (hanno bisogno dall'alimentazione per funzionare)

2. I trasduttori vengono anche classificati in

- **“primari”** o **“fondamentali”**
(trasduttori di temperatura, di luminosità, di posizione, di campo magnetico,ecc...)
- **“secondari”** (trasduttori di forza, di accelerazione, di pressione, ecc...)
che dipendono dai primari e che quindi vengono definiti “variazioni dei primari”.

Nei trasduttori primari la grandezza di ingresso viene trasformata direttamente nella grandezza di uscita .
Nei secondari, viceversa, la grandezza di uscita si ottiene dalla grandezza di ingresso in modo indiretto.
Ovvero la grandezza di ingresso viene convertita in una grandezza intermedia e quest'ultima viene convertita nella grandezza di uscita.



Trasduttori Secondari

- sensori di forza, accelerazione e pressione (basati sugli estensimetri).
- la maggior parte dei sensori di posizione (basati sui sensori fotoelettrici e sui sensori di campo magnetico).
- sensori di velocità, basati sui sensori di posizione.

3. I trasduttori possono poi essere suddivisi in **analogici e digitali**.

- Gli **analogici** sono trasduttori che danno in uscita un segnale che ,**entro un dato intervallo**, varia **con continuità**.

La dinamo tachimetrica per esempio, con cui si ottiene una tensione di uscita in corrente continua proporzionale alla velocità dell' **albero motore** ,è **analogica**: è in grado di dare una misura variabile con continuità per cui potrebbe dare una qualsiasi misura nel suo campo di funzionamento.

- I **digitali** invece sono dei trasduttori che danno in uscita un segnale che varia in modo discontinuo e ciascuno differisce dal precedente di una **quantità costante**.

A differenza degli analogici l' uscita può assumere solo valori **discreti**, ciascuno dei quali è un multiplo intero di una unità di base **q** .

L'uscita non potrà cioè variare con continuità, ma solo di quantità che sono multiple di **q**.

Un esempio di trasduttore digitale è l' **encoder ottico incrementale**, che si basa sul conteggio di impulsi.

Apparentemente un trasduttore analogico sembrerebbe avere una risoluzione migliore di un trasduttore digitale; ciò non è assolutamente vero in quanto possono aversi trasduttori digitali in cui l'unità di base **q** ha un valore infinitesimo e trasduttori analogici che riescono a rilevare due ingressi come diversi tra di loro solo se la loro differenza " Δ_i " supera un dato limite che può essere anche di molto superiore all'unità di base **q** del trasduttore digitale.

4. Trasduttori assoluti e trasduttori incrementali

- I trasduttori **assoluti** generano un segnale che è legato in modo univoco alla grandezza fisica misurata.

Una dinamo tachimetrica è un esempio di trasduttore assoluto in quanto ad una data rotazione corrisponde sempre un valore definito di tensione di uscita.

- I trasduttori **incrementali**, viceversa, generano un segnale che non è legato in modo univoco alla grandezza misurata. Un encoder è un tipico esempio di trasduttore **incrementale**: la misura di una rotazione viene effettuata tramite il conteggio degli impulsi generati da un fotodiode , illuminato o no da un raggio di luce , emesso da un diodo led e passante attraverso un disco con un opportuno numero di fori.

Pertanto ad identiche posizioni del dispositivo di intercettazione rispetto al blocco emettitore-ricevitore possono corrispondere, in tempi diversi, segnali diversi, cioè un diverso numero degli impulsi contati, dovuti all'aver fissato delle origini differenti.

5. I trasduttori possono anche essere così suddivisi :

- In funzione delle proprietà fisiche che sono alla base del loro funzionamento.

- In funzione del loro impiego.

6. Trasduttori autogeneranti, modulanti, modificatori

- Un trasduttore a **autogeneratore** non richiede alcuna sorgente di energia esterna in quanto sfruttano principi fisici differenti, quali l'effetto termoelettrico, l'effetto fotovoltaico, l'effetto piezoelettrico, ecc.
- I trasduttori **modulanti** richiedono invece una sorgente di energia esterna in quanto essi non producono un segnale direttamente utilizzabile.
- I trasduttori **modificatori** sono quei trasduttori in cui la grandezza fisica in ingresso è diversa dalla grandezza fisica in uscita; tuttavia sia in ingresso che in uscita si ha la stessa forma di energia.

A questa categoria appartengono molti trasduttori meccanici quali i trasduttori che utilizzano degli elementi elastici per la misura di forze: applicando una forza all'estremo di una molla si ha una deformazione ad essa proporzionale.

Si ha quindi una grandezza di entrata (forza) differente da quella di uscita (spostamento), ma sia in ingresso che in uscita si è sempre in presenza di **energia meccanica**.

Si possono elencare una serie di caratteristiche che possono interessare un trasduttore:

- [Range di Ingresso](#)
- [Transcaratteristica monotonica](#)
- [Linearità](#)
- [Sensibilità](#)
- [Errore di non linearità](#)
- [Tempo di risposta](#)
- [Offset di uscita](#)
- [Ripetitività](#)
- [Risoluzione](#)
- [Precisione](#)
- [Isteresi](#)
- [Condizioni di impiego](#)
- [Sovraccarico](#)
- [Affidabilità](#)
- [Vita di un trasduttore](#)

Range

E' l'intervallo di valori in cui il trasduttore lavora secondo i parametri stabiliti. Appena esce dal range il trasduttore non funziona più, e ritorna a lavorare appena rientra nell'intervallo.

Il range di ingresso (o campo di ingresso) definisce i limiti entro cui può variare l'ingresso; mentre il range di uscita (o campo di uscita) definisce i limiti entro cui può variare l'uscita.

[Transcaratteristica monotonica](#)

Il grafico corrispondente alla relazione tra OUT e IN del trasduttore non deve presentare variazioni nell'andamento della pendenza (curva crescente o decrescente), almeno nel range di funzionamento

[Linearità](#)

E' una qualità altamente apprezzabile : la sensibilità del trasduttore è costante (quindi precisa per tutta la scala) e con due soli punti si può individuare completamente la sua transcaratteristica. Inoltre, ovviamente diventa immediata la ricostruzione del valore di ingresso partendo dal valore in uscita.

La maggior parte dei trasduttori è progettata per presentare una transcaratteristica lineare, ove questo non è possibile è necessario prevedere opportuni circuiti di linearizzazione.

Sensibilità

La sensibilità S del trasduttore è il rapporto fra la variazione della grandezza d'uscita e quella dell'ingresso che l'ha determinata.

Lo strumento risulterà essere molto sensibile quando a parità di grandezza di ingresso la grandezza di uscita è molto elevata.

$$S = \Delta_o / \Delta_i$$

Errore di non linearità

Di solito, l'errore che il costruttore fornisce è l'errore di non linearità ed è espresso come spostamento massimo della retta ideale.

$$\text{Errore linearità \%} = (e_{\max} / X_{\text{oFS}}) \cdot 100$$

X_{oFS} = Valore max d'uscita di Fondo Scala

Tempo di risposta

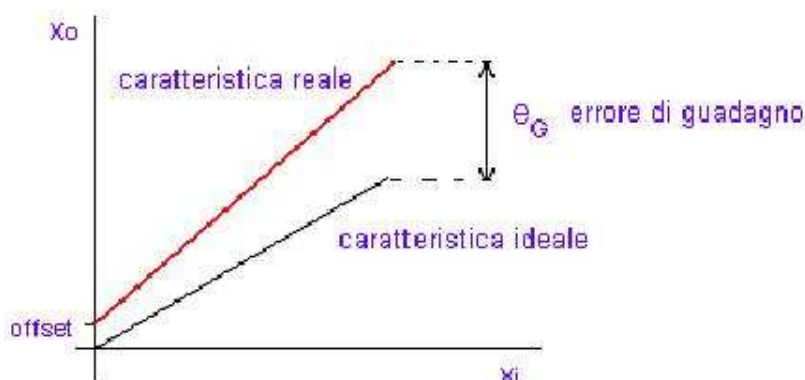
Rappresenta il tempo necessario all'uscita per passare dal 10 al 90 % del valore su cui l'uscita si stabilizza (in genere è misurato su una variazione a gradino , di ampiezza opportuna , dell ' ingresso).

I migliori trasduttori hanno un tempo di risposta molto basso.

Errore di offset in uscita

L'offset indica la bontà del trasduttore che risulterà essere migliore quanto minore sarà il valore assunto da tale parametro. Esso viene verificato azzerando gli ingressi e visualizzando il valore presente in uscita.

ERRORE DI OFFSET E DI GUADAGNO



Ripetitività

Un altro parametro importante, anche se la sua definizione precisa varia da costruttore a costruttore, è la ripetibilità, vale a dire la costanza nel tempo delle caratteristiche del trasduttore (la sua resistenza all'invecchiamento).

Risoluzione

La risoluzione R indica il limite inferiore alle variazioni rilevabili in ingresso.

$$R = 1 / \Delta I_{\min}$$

dove ΔI_{\min} è la variazione minima di ingresso rilevabile.
Esprime anche la variazione minima di uscita rispetto al fondoscala.

Un buon trasduttore presenta una BASSA risoluzione (cioè può apprezzare segnali di piccolo valore, riferiti alla portata del dispositivo).

Precisione

La classe di precisione di un trasduttore è definita come il rapporto, moltiplicato per cento, tra il massimo errore assoluto che si ha nel campo di misura e il massimo valore misurabile.

Isteresi

Alcuni trasduttori presentano una caratteristica diversa a seconda che l'ingresso passi dal valore minimo al massimo o viceversa

Condizioni di impiego

Vengono definite le caratteristiche limite di impiego entro cui il trasduttore funziona correttamente.

Sovraccarico

E' il valore massimo del segnale di ingresso, oltre il campo di misura, che può essere applicato senza che il trasduttore si danneggi.

Affidabilità

E' legata alla variazione dei parametri del trasduttore con l'uso.

Vita di un trasduttore

E' il tempo espresso in ore, o più spesso in numero di cicli, numero di giri, ecc., oltre il quale non è più garantito il corretto funzionamento del trasduttore.

SEMICONDUTTORI : ELETTRONI E LACUNE

I **semiconduttori** sono materiali che hanno una [resistività](#) intermedia tra i [conduttori](#) e gli [isolanti](#). I semiconduttori sono alla base di tutti i principali dispositivi elettronici e microelettronici quali i [transistor](#), i [diodi](#) e i diodi ad emissione luminosa ([LED](#)).

Le proprietà dei semiconduttori diventano interessanti se vengono opportunamente [drogati](#) con impurità. Le loro caratteristiche quali resistenza, mobilità, concentrazione dei [portatori di carica](#) sono importanti per determinare il campo di utilizzo. I **semiconduttori drogati** sono quei semiconduttori ai quali vengono aggiunte impurità tramite il processo di [drogaggio](#).

Con il termine **drogaggio**, nell'ambito dei [semiconduttori](#), si intende l'aggiunta al semiconduttore di piccole percentuali di [atomi](#) non facenti parte del semiconduttore stesso allo scopo di modificare le **proprietà elettriche** del materiale.

Il drogaggio può essere di tipo n : l'atomo drogante ha un [elettrone in più](#) di quelli che servono per soddisfare i [legami](#) del [reticolo cristallino](#) e tale elettrone acquista libertà di movimento all'interno del semiconduttore.

Il drogaggio può essere di tipo p : l'atomo drogante ha un elettrone **in meno** di quelli che servono per soddisfare i legami del reticolo cristallino e tale mancanza di elettrone, indicata con il nome di [lacuna](#), si comporta come una [particella carica](#) positivamente e si può spostare all'interno del semiconduttore. Le quantità di elementi droganti utilizzate per effettuare il drogaggio sono, in termini percentuali, bassissime: si parla per l'appunto di impurità elettroniche in quanto tali impurità sono in grado di modificare le proprietà elettriche del semiconduttore ma non le proprietà [chimiche](#) dello stesso.

L'entità del drogaggio si misura in atomi a [centimetro cubo](#), [**atomi/cm³**]

Riferendosi al [silicio](#), il semiconduttore più utilizzato che è composto da **atomi tetraivalenti**, il drogaggio di tipo n può essere effettuato mediante atomi di [fosforo](#) o [arsenico](#), mentre il drogaggio di tipo p è generalmente effettuato mediante atomi di [boro](#).

I drogaggi più bassi che si possono ottenere, al limite del silicio intrinseco, sono dell'ordine di 10^{13} atomi/cm³. I drogaggi più elevati, al limite del silicio degenere, sono dell'ordine di 10^{20} atomi/cm³.

Si noti che, come precedentemente esposto, i numeri in gioco sono molto lontani dal **numero di atomi di silicio in un centimetro cubo di materiale, che è dell'ordine di 10^{22}** .

In altre parole si può dire che un buon drogaggio consiste nell'immissione nel Silicio di **1 atomo di sostanza drogante ogni 10^8 atomi di Silicio**.

Le tecniche di drogaggio comunemente utilizzate sono la [diffusione termica](#) e l'[impiantazione ionica](#).

Piccole percentuali di atomi diversi aumentano le proprietà di conduzione del semiconduttore: per quanto detto sui legami dei semiconduttori tipo **Silicio e Germanio**, sappiamo che questi hanno legami tetraivalenti cioè ogni atomo è legato ad altri quattro atomi dello stesso tipo nel [reticolo cristallino](#), ciò è dovuto all'esistenza di quattro elettroni di valenza degli atomi del semiconduttore.

Aggiungendo **atomi pentavalenti**, cioè che hanno cinque elettroni di valenza, ([fosforo](#), [arsenico](#), [antimonio](#)) si ha un aumento di elettroni liberi, non impegnati nei legami covalenti e che possono diventare elettroni di conduzione: questo tipo di drogaggio viene chiamato **drogaggio di tipo n**.

Se invece aggiungiamo **atomi trivalenti** al semiconduttore, cioè atomi che hanno tre elettroni di valenza nei livelli energetici più esterni ([boro](#), [gallio](#), [indio](#)), questi creano delle cosiddette **trappole** per gli elettroni, cioè creano legami che non sono stabili entro il conduttore e attraggono gli elettroni liberi in modo da stabilizzarsi. A tutti gli effetti, l'assenza di elettroni all'interno del reticolo cristallino di un semiconduttore può essere considerata come una presenza di una carica positiva detta lacuna che viaggia entro il conduttore esattamente come l'elettrone (ovviamente tenendo conto della carica). Questo tipo di drogaggio viene chiamato **drogaggio di tipo p**.

La propagazione della corrente elettrica varia a seconda del materiale in quanto la **conducibilità è proporzionale alla concentrazione n degli elettroni liberi**.

- Per un **buon conduttore**, n è molto grande (10^{28} elettroni / m^3)
- Per un **isolante**, n è molto piccolo (10^7 elettroni / m^3)
- Per un **semiconduttore**, n è un numero, compreso tra questi due estremi.

Gli elettroni di valenza nei semiconduttori non sono liberi di muoversi come nei metalli, ma sono vincolati tra due ioni adiacenti.

Il silicio è il principale semiconduttore impiegato nei dispositivi elettronici. Il reticolo cristallino di questo materiale è costituito da una successione tridimensionale regolare di celle, aventi la forma di un **tetraedro** con un atomo ad ogni vertice. Questa struttura è mostrata schematicamente in due dimensioni nelle figure 1 e 2 .

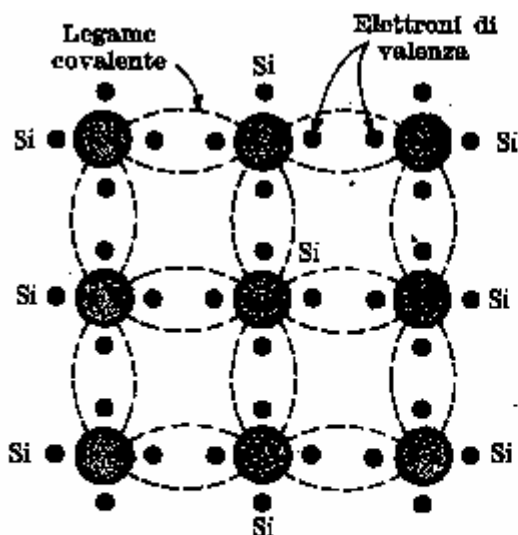


Fig. 1 - Struttura cristallina del silicio , rappresentata schematicamente in due dimensioni .

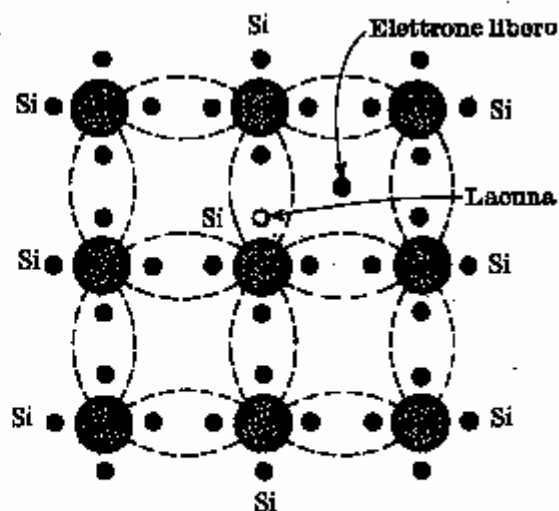


Fig. 2 - Cristallo di silicio nel quale un legame covalente è stato spezzato .

Il silicio ha complessivamente **14** elettroni, disposti su diversi orbitali.

Ogni atomo nel cristallo di silicio fornisce **quattro elettroni di valenza** e quindi l'atomo è tetravalente. Il nucleo dell'atomo di silicio fornisce una carica positiva + 4, misurata assumendo come unità di riferimento la carica dell'elettrone. Le forze di legame tra atomi adiacenti derivano dal fatto che ogni elettrone di valenza dell'atomo di silicio è in comune con uno degli atomi "primi vicini".

Questo doppietto elettronico, o **legame covalente**, è rappresentato nelle figure 1 e 2 con le due linee tratteggiate che congiungono ogni atomo con ciascuno degli atomi adiacenti. Il fatto che gli elettroni di valenza servano a vincolare un atomo agli altri, fa sì che **gli elettroni di valenza siano rigidamente legati al nucleo**.

Quindi, nonostante gli elettroni di valenza disponibili siano numerosi, la **conducibilità del cristallo è bassa**.

A temperature estremamente basse (**prossime a 0 °K**) ci si avvicina alla struttura ideale di figura 1 e il cristallo si comporta da **isolante** poiché non vi sono portatori di cariche elettriche liberi.

A temperatura ambiente, invece, **alcuni legami covalenti si spezzano a causa dell'energia termica fornita al cristallo**, e la conduzione diventa possibile. La situazione è rappresentata in figura 2.

Qui un elettrone, che per la maggior parte del tempo ha partecipato a un legame covalente, si è allontanato dal suo posto, e quindi è libero di muoversi a caso entro il cristallo.

L'energia E_G necessaria a spezzare un legame covalente è circa 0,72 eV per il germanio e 1,1 eV per il silicio a temperatura ambiente.

La mancanza di un elettrone in un legame covalente rappresentato in figura 2 da un cerchietto, e questo legame incompleto è chiamato **lacuna**.

L'importanza della lacuna risiede nel fatto che essa si comporta come un portatore di carica, proprio come un elettrone libero.

Il meccanismo secondo cui le lacune contribuiscono alla conducibilità è all'incirca il seguente: quando un doppietto elettronico è incompleto ed esiste una lacuna, è relativamente facile che un elettrone di valenza di un atomo adiacente lasci il suo legame covalente per neutralizzare la lacuna.

Un elettrone che si allontana dalla sua posizione per neutralizzare una lacuna, lascia una nuova lacuna nella posizione che esso occupava prima.

Quindi la lacuna si sposta effettivamente nella direzione opposta a quella dell'elettrone.

Questa lacuna, nella sua nuova posizione, può ora essere neutralizzata da un elettrone di un legame covalente, e di conseguenza essa si muove ancora in direzione contraria al moto dell'elettrone.

Quindi siamo in presenza di un fenomeno di conduzione che non implica elettroni liberi.

Il fenomeno illustrato schematicamente nella figura 3, dove un cerchietto con il punto all'interno rappresenta un legame completo, e un cerchietto vuoto rappresenta una lacuna.

La figura 3a mostra una fila di 10 ioni, tra i quali lo ione 6 ha un doppietto incompleto.

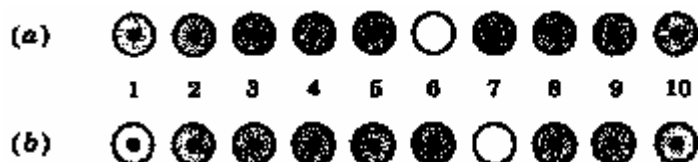


Fig. 3. Il processo mediante cui una lacuna contribuisce alla conducibilità.

Supponiamo ora che dallo ione 7 un elettrone vada a neutralizzare la lacuna nello ione 6, in modo che ne risulta la configurazione di figura 3b. Paragonando questa figura con la 3a, si può dire che la lacuna di (a) si è spostata da sinistra a destra in (b) (dallo ione 6 allo ione 7).

Questo esempio mostra che il moto di una lacuna in una direzione equivale effettivamente al trasporto di una carica negativa a uguale distanza in direzione opposta.

Per quanto riguarda il flusso di corrente, la lacuna si comporta effettivamente come una carica positiva di valore uguale alla carica dell'elettrone. Possiamo quindi considerare le lacune come entità fisiche il cui moto determina una corrente.

In un semiconduttore puro il numero di lacune è uguale al numero di elettroni liberi.

L'agitazione termica produce continuamente nuove coppie elettrone - lacuna, mentre come effetto della ricombinazione si neutralizzano altre coppie.

SEMICONDUTTORI COMPOSTI

L'evoluzione e le necessità di alcuni settori dell'elettronica hanno motivato la ricerca verso nuovi materiali semiconduttori che presentassero, per particolari esigenze, migliori caratteristiche del silicio e del germanio. Le ricerche si sono indirizzate nel campo dei semiconduttori composti che dal punto di vista chimico sono formati da leghe binarie del III° e V° gruppo, per es. **GaAs (Arseniuro di Gallio)**, **InP (Fosforo di Indio)** e del II° e VI° gruppo, per es. **CdS (Solfuro di Cadmio)** del sistema periodico.

Lo studio dei semiconduttori composti è stato inoltre esteso a leghe ternarie composte dalla miscela di due leghe binarie (GaAs, GaP=>GaAsP) e a leghe quaternarie (per es. GaInAsP).

La conducibilità del silicio aumenta all'incirca del 8 % per ogni grado di aumento della temperatura.

Questo notevole aumento della conducibilità con la temperatura pone un limite alla possibilità di impiegare dispositivi a semiconduttore in alcuni circuiti.

D'altro canto è proprio questa proprietà dei semiconduttori che, per alcune applicazioni, viene sfruttata vantaggiosamente. Un semiconduttore usato in questa maniera è chiamato **termistore**.

Un tale dispositivo trova una notevole applicazione in termometria, nella misura di potenza in alta frequenza, come relè termico, nei sistemi di controllo basati sulla variazione della temperatura.

Il silicio e il germanio **non** vengono impiegati come termistori, in quanto le loro proprietà dipendono in maniera eccessiva dalla presenza di **impurità**.

I termistori commerciali sono costituiti da miscele sinterizzate di ossidi come **NiO, Mn₂O₃ e Co₂O₃**.

Si deve far notare come la diminuzione esponenziale della resistività (l'inverso della conducibilità) di un semiconduttore sia in contrasto con l'aumento piccolo e quasi lineare della resistività che si riscontra in un metallo.

Un aumento di temperatura in un metallo provoca una maggiore agitazione termica degli ioni, e quindi una certa diminuzione del cammino libero medio degli elettroni. Il risultato è una diminuzione della mobilità, e quindi della conducibilità.

Per molti metalli la resistenza aumenta all'incirca dello 0,4% per ogni grado di aumento della temperatura. Bisogna notare che per un termistore NTC, nella formula che dà la resistenza in funzione della temperatura, il coefficiente α ("coefficiente di temperatura della resistenza"), è negativo, mentre per i metalli il coefficiente di temperatura è positivo e molto più piccolo.

DONATORI E ACCETTORI

Se nel silicio puro viene aggiunta una piccola quantità di impurità costituita da una sostanza pentavalente , si ottiene la situazione rappresentata in figura 4 . Gli atomi delle impurità sostituiscono nel reticolo cristallino alcuni atomi di silicio . Quattro dei cinque elettroni di valenza occupano altrettanti legami covalenti, e il quinto è nominalmente svincolato e può partecipare alla conduzione.

L'energia necessaria per separare dall'atomo questo quinto elettrone è dell'ordine di soli 0,01 [eV] per il germanio, e di 0,05 [eV] per il silicio.

I metalli pentavalenti impiegati in pratica come impurità sono l'antimonio Sb, il fosforo P e l'arsenico As. Essi producono un eccesso di cariche negative, e quindi sono chiamati donatori, o impurità di tipo n.

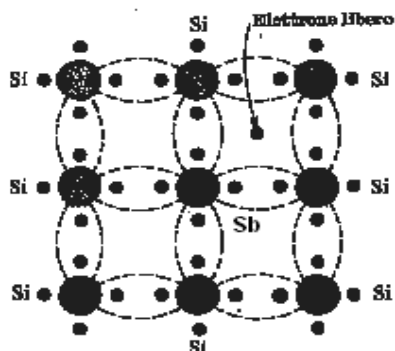


Fig. 4 . Reticolo cristallino nel quale un atomo di silicio è stato sostituito da un atomo di un'impurità pentavalente.

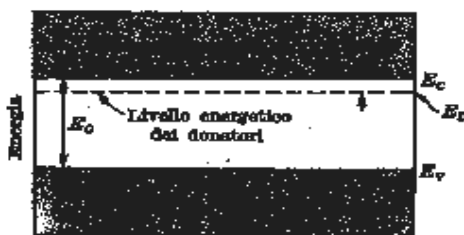


Fig. 5 . Schema delle bande di energia in un semiconduttore di tipo n.

Se a un semiconduttore intrinseco vengono sommate impurità trivalenti (boro B, gallio Ga, indio In), solo tre dei quattro legami covalenti vengono completati, e la carenza di un elettrone nel quarto costituisce una lacuna. La situazione è schematizzata in figura 7.

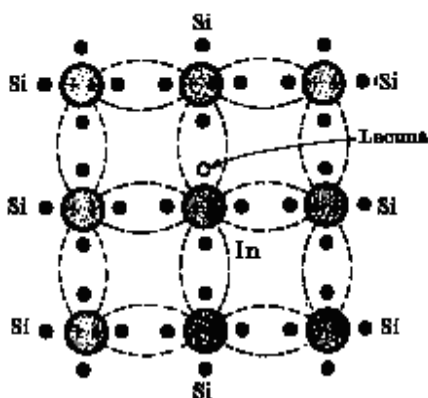


Fig. 7 . Reticolo cristallino nel quale un atomo di silicio è stato sostituito da un atomo di un'impurità trivalente.

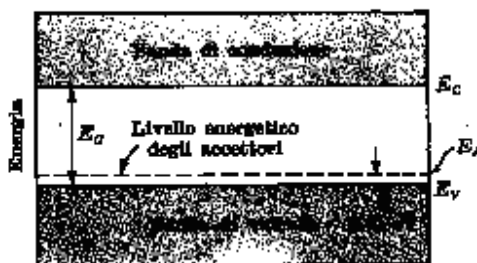


Fig. 8 . Schema delle bande d'energia in un semiconduttore di tipo p.

Le impurità danno luogo a cariche positive poiché esse creano delle lacune che possono "accettare" elettroni. Questi metalli di conseguenza sono chiamati accettori, o impurità di tipo p.

La quantità di impurità che bisogna aggiungere per avere un effetto apprezzabile sulla conducibilità è molto piccola. Per esempio, se viene aggiunta una quantità di impurità di tipo n pari a **una parte su 10^8** , la conducibilità del germanio a 30 °C è **moltiplicata per 12**.

Si arriva quindi all'importante risultato che il drogaggio di un semiconduttore intrinseco non solo aumenta la conducibilità, ma serve a produrre un semiconduttore nel quale le cariche sono o prevalentemente le lacune o prevalentemente gli elettroni.

In un semiconduttore di tipo **n**, gli elettroni sono portatori maggioritari e le lacune portatori minoritari.

In un materiale di tipo **p**, le lacune sono i portatori maggioritari, e gli elettroni i portatori minoritari.

In un materiale di tipo n la concentrazione degli elettroni liberi è all'incirca uguale alla densità degli atomi donatori.

Mobilità dei portatori. Difetti del reticolo cristallino.

Parlando della **resistività intrinseca** si è introdotta la grandezza mobilità **μ** .

Per mobilità (dimensioni in $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$) dei portatori si intende la velocità (cm/sec) che essi acquisiscono quando sono sottoposti ad un campo elettrico unitario (V/cm).

Questa grandezza ha un ruolo molto importante nella determinazione delle caratteristiche dei dispositivi elettronici, sia perché influenza la resistività del materiale, sia perché ad essa sono legati certi limiti di frequenza dei dispositivi nel senso che **mobilità maggiori dei portatori consentono applicazioni a frequenze sempre più elevate.**

Uno dei fattori che maggiormente influenzano questa grandezza è la **struttura cristallina**: più essa è perfetta, più risulterà facile alle cariche muoversi all'interno della struttura.

Si rende quindi necessario avere un complesso cristallino perfettamente costruito; questo è l'obiettivo dei processi di cristallizzazione dei materiali semiconduttori.

Nonostante il progredire di questi metodi, la struttura finale presenta sempre dei difetti. La presenza di un atomo **estraneo** in un punto del tetraedro, che normalmente dovrebbe essere non occupato da nessun atomo, è un difetto che viene chiamato **puntiforme**.

Immaginiamo invece una struttura, cristallina più complessa che per definirsi perfetta dovrebbe essere formata da tanti tetraedri regolarmente allineati sia in senso orizzontale che verticale tali da formare un cubo di più grandi dimensioni, ma che in realtà abbia una parte di questa struttura leggermente sfalsata rispetto all'altra parte del cubo: siamo in presenza di un **difetto di linea o dislocazione**.

Se invece queste due parti fossero inclinate l'una rispetto all'altra si deve parlare di difetto **planare**.

Un secondo fattore che influenza la mobilità è la temperatura.

Un aumento di questa è in parte assorbito dagli atomi della struttura trasformandosi in energia cinetica di vibrazione degli stessi.

Maggiore sarà l'estensione di queste vibrazioni tanto più saranno ostacolate le cariche nel loro movimento all'interno della struttura: il risultato è un coefficiente di temperatura positivo della resistenza.

SENSORI DI TEMPERATURA

1. Termoresistenze

Molti sensori di temperatura, come le termoresistenze, sono basati sul fatto che la conduttività di un materiale (conduttore o semiconduttore) dipende più o meno fortemente dalla temperatura.

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha T)$$

dove R_0 è la resistenza a zero °C e T è la temperatura in gradi centigradi. Infine " α " è un coefficiente positivo (misurato in °C⁻¹).

I termoresistori hanno ampio range di utilizzo (da - 200 a + 800 [°C]), hanno una buona linearità, sono precisi e stabili.

I metalli che si utilizzano sono **rame, nichel e platino**.

Il difetto principale è che " α " è piccolo per cui sono necessari circuiti amplificatori con forte amplificazione.

Inoltre per trasformare la variazione di resistenza in una variazione di tensione occorre farli attraversare da corrente e ciò comporta una variazione di resistenza per **effetto joule**, il che introduce un errore nella misura.

Un esempio di termoresistenza è la PT100 al platino che presenta 100 [Ω] a 0 [°C] e 375 [Ω] a 800 [°C]

2. Termistori NTC

Se invece di utilizzare dei metalli si utilizzano semiconduttori puri il sensore che si ottiene ha coefficiente di temperatura NEGATIVO e molto elevato.

Si ottiene cioè una maggiore sensibilità rispetto ai termoresistori.

I termistori NTC sono realizzati con miscele di semiconduttori composti (ossidi di Nichel e Manganese) e non con silicio o germanio.

La resistenza di questi ultimi materiali è infatti troppo sensibile alla presenza di impurità nel cristallo.

La caratteristica di un termistore NTC è del tipo:

$$R = R_0 e^{B(1/T - 1/T_0)}$$

Dove:

T è la temperatura ASSOLUTA,

T_0 è una temperatura assoluta di riferimento (298 K)

B è una costante.

La caratteristica dei termistori è pesantemente **non lineare**: si prestano perciò a lavorare bene solo dove la linearità non è importante (controlli di temperatura) o dove i range di lavoro sono ristretti (termometria clinica).

Possono anche venire utilizzati in alcuni trasduttori secondari come dei misuratori di flusso per fluidi.

3. Termistori PTC

Materiali semiconduttori fortemente drogati possono presentare comportamento simile a quello dei metalli: avere cioè un coefficiente di temperatura POSITIVO, col vantaggio rispetto a quello dei metalli di essere più molto grande. La maggiore sensibilità va a scapito tuttavia della minore linearità.

All'aumentare della temperatura aumenta la resistenza.

4. Sensori di temperatura a giunzione semiconduttrice

Se in una giunzione PN polarizzata direttamente la corrente è mantenuta costante, la diminuzione di tensione è lineare nella temperatura su un range molto ampio. In altre parole, in un diodo, fermi i presupposti precedenti, **la tensione diminuisce in maniera lineare all'aumentare della temperatura.**

Il difetto sta nella scarsa riproducibilità poiché non essendo espressamente progettato come trasduttore, ogni esemplare deve avere una taratura specifica.

5. Sensori di Temperatura Integrati .

Es : AD590

Esistono sul mercato dei dispositivi integrati che comprendono oltre al sensore a semiconduttore, degli appositi circuiti per amplificare il segnale fornito dal sensore e per linearizzarlo.

Il più noto è l'AD 590 della Analog Devices, il quale si comporta come un generatore di corrente ad alta impedenza.

Tale dispositivo va alimentato con una tensione fra 4 e 30 [V] e produce ai suoi poli una corrente che dipende linearmente dalla temperatura:

$$I = KT \quad \text{con } T \text{ in gradi Kelvin} \quad (\text{Transcaratteristica lineare})$$

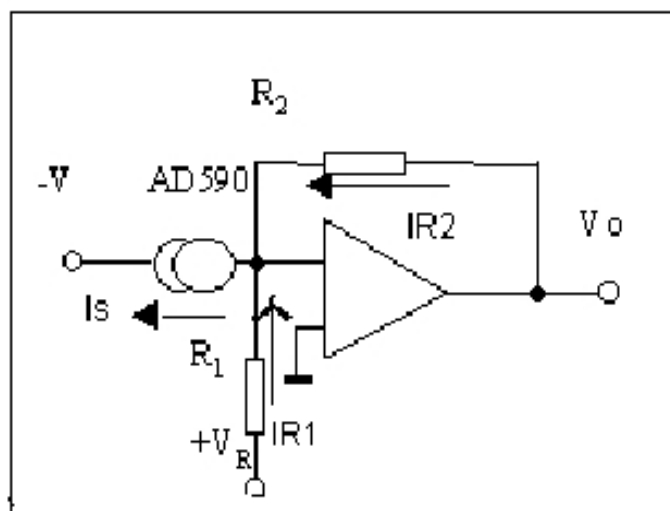
$$K = 1 \quad [\mu A / ^\circ K] \quad (\text{SENSIBILITA'})$$

Quindi la corrente in mA coincide numericamente, entro i limiti di errore, con la temperatura in Kelvin.

Il funzionamento in corrente presenta il vantaggio di rendere il sistema di misura insensibile alle cadute di tensione e permette quindi di tenere il sensore **lontano** dall'apparato di misura . Il segnale di uscita è inoltre indipendente da eventuali variazioni della tensione di alimentazione (pila parzialmente scarica oppure alimentazione disturbata) .

Il contenitore metallico di tipo TO52 consente una elevata velocità di risposta (costante di tempo termica bassa: la costante di tempo termica è la costante di tempo dell'esponenziale che esprime l'andamento dell'uscita nel tempo quando la temperatura subisce una variazione a gradino).

Un circuito ad operazionale che utilizza un AD590 è quello di figura:



A zero gradi centigradi (273 K) il componente fornisce $I_s = 273 [\mu A]$

Se R_1 è percorsa da una corrente $I_{R1} = I_s$, allora I_{R2} è nulla ed il circuito fornisce $V_0 = 0$.

Ad una temperatura qualsiasi : $I_{R2} = I_s - I_{R1}$ e

$$V_0 = R_2 (I_s - V_R / R_1)$$

Allora : $\Delta V_0 / \Delta T = R_2 (I_s - V_R / R_1) / \Delta T = R_2 K$

Volendo avere, ad esempio 10 [V] a 100 [°C] occorre che sia:

$$\Delta V_0 / \Delta T = 10/100 = 0.1 [\text{Volt}/^\circ\text{C}] \quad \text{Segue :} \quad R_2 = 0.1 / 10^{-6} = 100 [\text{K} \Omega]$$

La tensione V_R deve essere rigorosamente stabilizzata.

TRASDUTTORI FOTOELETRTRICI

Trasformano le variazioni di intensità luminosa in grandezza elettrica e possono essere distinti in tre grandi gruppi :

1. Dispositivi fotoemissivi

Sono basati sull' **effetto fotoelettrico** propriamente detto : i quanti di luce colpiscono un catodo costituito da un **metallo a basso lavoro di estrazione** causando la **ionizzazione** di una certa percentuale degli atomi del metallo stesso.

Gli elettroni liberati danno luogo ad una corrente proporzionale all'intensità luminosa incidente.

A questo gruppo appartengono le **cellule fotoelettriche** (usate in passato per la lettura delle colonne sonore nei cinema) e i **fotomoltiplicatori** usati in dispositivi specialistici come ad esempio per misure fotometriche in astronomia o per rivelare radiazioni nucleari.

2. Celle Fotovoltaiche

Il loro funzionamento è basato sul fatto che **esponendo alla luce una giunzione PN (polarizzata inversamente) con gli estremi chiusi su un carico resistivo, in essa circola una corrente inversa, tanto più grande quanto più intensa è la luce incidente .**

Le cellule fotovoltaiche basate su tale fenomeno raramente vengono usate come trasduttori, sono però utilizzate per la conversione diretta di energia solare in energia elettrica tramite **batterie solari** che arrivano a un rendimento di conversione di oltre il 10% (**batterie al silicio**)

3. Elementi fotoconduttori

Per lo stesso principio delle celle fotovoltaiche (illuminamento Giunzione PN), **la conduttività di un materiale aumenta al crescere dell'intensità luminosa (in altre parole la resistenza diminuisce al crescere dell'intensità luminosa) .**

Ciò avviene perché i fotoni incidenti cedono la propria energia ad alcuni elettroni riuscendo a liberarli dai legami covalenti .

Questo fatto è usato nei fotosensori di più larga applicazione :

• Fotoresistenze

Sono dispositivi in cui l'informazione luminosa è tradotta in una variazione di resistenza.

Sono costituite da materiale semiconduttore (**CdS**).

Pregi : Sono robuste, economiche e hanno un'elevata sensibilità : la loro resistenza varia da oltre un **1 [MΩ]** in oscurità a poche decine di **Ω** a **1000 [lux]**.

Difetti: ha una **limitatissima banda passante (tempi di risposta molto lenti)** infatti una fotoresistenza può impiegare tempi nell'ordine del **secondo** per ritornare al valore di oscurità e ciò preclude applicazioni "veloci".

Il rapporto resistenza/Illuminamento appare lineare in scala log-log. Quindi :

$$\text{Log}(R) = - a\text{Log}(L) + \text{Log}(k) \quad (a \text{ costante positiva, e } k \text{ resistenza a } 1 \text{ lux})$$

- **Fotodiodi**

Il loro funzionamento è basato sul fatto che esponendo alla luce una giunzione PN polarizzata inversamente, alla corrente inversa I_0 tipica del diodo si somma una corrente $I_L > 0$ che varia in maniera lineare con il flusso luminoso.

Per tensioni inverse nell'ordine del volt la corrente nella giunzione è $I = - (I_L + I_0)$.

I fotodiodi sono quindi diodi in cui la zona di giunzione è resa accessibile alla radiazione luminosa.

Pregi : sono piuttosto sensibili anche se i bassi valori di corrente richiedono opportuni circuiti di condizionamento e sono abbastanza veloci (possono essere utilizzati nei sistemi di trasmissione in fibra ottica).

- **Fototransistor.**

Rappresentano un'evoluzione dei fotodiodi. Sono essenzialmente dei transistor a giunzione (BJT) polarizzati normalmente, ma con il circuito di base aperto la cui giunzione **BC (base-collettore) è esposta alla luce.**

In tale giunzione, polarizzata inversamente, si genera una corrente inversa analogamente a quanto avviene nei fotodiodi. La sensibilità è molto elevata, la risposta in frequenza è buona e il rumore è minore di quello presentato da un fotodiode. L'alta sensibilità consente al fototransistor di comandare direttamente dispositivi logici. Sono spesso utilizzati nei sensori di posizione (encoder)

Trasduttori Estensimetrici

Sono basati sul fatto che un conduttore ohmico di lunghezza L e sezione S , dove la resistenza è espressa dalla

$$\text{2° Legge di Ohm : } R = \rho l / S$$

(dove ρ è la resistività del materiale in $[\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$), sottoposto a trazione, L aumenta e S diminuisce ed entrambe le variazioni fisiche contribuiscono ad aumentare la resistenza. L'opposto si verifica se il conduttore viene compresso. Nei limiti delle deformazioni elastiche, come espresse dalla legge di Hooke, le deformazioni sono proporzionali alle forze che li determinano.

Gli estensimetri a semiconduttore hanno sensibilità maggiori, ma costi più elevati.

Un difetto molto grave degli estensimetri soprattutto a semiconduttore è che la loro resistenza varia anche con la temperatura sia perché varia la resistività sia perché la stessa variazione di temperatura provoca deformazioni per dilatazione.

Per compensare le variazioni causate da temperatura è bene usarli in coppie montati a ponte, facendo in modo che uno solo sia soggetto a sollecitazione o che magari si deformino, ma in senso opposto.

- **Celle di carico.**

Sono tipicamente dei **trasduttori di forza**. In pratica sono costituiti da ponti estensimetrici montati in strutture di metallo con caratteristiche di elasticità note e calibrate. La deformazione elastica, misurata dagli estensimetri, permette di risalire alla forza che l'ha determinata. Le celle di carico differiscono per forma, campo di forze misurato e sensibilità. Ogni singolo esemplare è accompagnato da un certificato di taratura (fondo scala, sovraccarico ammissibile, alimentazione, sensib. Nominale, Err.non.linear., err.offset, etc.).

- **Sensori di pressione.**

Sono basati sul principio del **barometro aneroide** : una camera sottovuoto è chiusa da una membrana flessibile. La membrana si flette a seconda della pressione che agisce sul lato esterno. La deformazione è rilevata dai dispositivi fissati sulla sua superficie. Nei modelli integrati la membrana è costituita da una piastrina di silicio su

cui sono incastonate una o più celle estensimetriche a semiconduttore con disposizione solitamente a ponte. Esistono anche sensori di pressione differenziali in cui la membrana separa due camere sottoposte a pressioni diverse, quindi il segnale in uscita è proporzionale in valore e in segno alla differenza fra le due pressioni.

Trasduttori di posizione

• Potenzimetri

Sono i trasduttori di posizione più semplici. I potenziometri utilizzati come sensori di posizione sono a variazione lineare. Esistono potenziometri ottimizzati per applicazioni ad elevata precisione e con attrito ridotto : solitamente hanno un campo di rotazione di 360° senza fine corsa. Oltre ai modelli rotativi esistono anche potenziometri in cui il movimento del cursore è rettilineo.

• Trasformatori differenziali

Servono a rilevare piccoli spostamenti di solito non rettilinei.

Contengono un nucleo mobile centrato rispetto ad un avvolgimento principale e due avvolgimenti secondari aventi uguali tensioni indotte, ma in controfase in maniera da avere una tensione in uscita nulla.

Quando il nucleo si sposta da parte di uno dei secondari la tensione indotta in esso prevale e l'uscita non è più nulla. L'ampiezza dell'uscita rende un'informazione sull'entità dello spostamento, mentre la fase ci indica il verso dello spostamento.

• Encoder incrementale (sensore di posizione opto – elettronico)

E' un dispositivo che serve a rilevare gli spostamenti angolari (rotazioni) di un asse.

Nella sua forma più semplice è costituito da un disco calettato sull'asse di rotazione su cui è praticata una ghiera di **N fori equispaziati** (in realtà possono essere delle zone trasparenti fotoincise).

Una barriera fotoelettrica di solito costituita da una coppia **LED / fototransistor** rileva la presenza o meno dei fori nella ghiera (eventualmente la circuiteria del fototransistor può incorporare un trigger di schmitt per eliminare incertezze di commutazione).

Se il disco ruota, in uscita al fotosensore si ha un treno di impulsi.

Contando gli impulsi si è in grado di determinare l'angolo di cui il disco si è spostato.

La risoluzione angolare è evidentemente data da $360^\circ / N$.

In questa forma l'encoder non è in grado di rilevare il verso della rotazione e il suo uso è limitato a misurare velocità di rotazione ottenuta contando gli impulsi su una base di tempo data.

Se **f** è la frequenza del segnale generato, **N** il numero dei fori, "**n**" la velocità di rotazione espressa in **giri/s** si ha :

$$n = f / N \text{ [giri / sec]}$$

(se **N è 60 la frequenza coincide con i giri al minuto**).

I vantaggi rispetto alla dinamo tachimetrica è che non si usura (stabile nel tempo) e non deve essere tarata e può essere utilizzato per elaborazioni di tipo digitale.

• Encoder incrementale a due (o tre) fasi

Per poter risalire anche al verso di rotazione si deve utilizzare un encoder con due ghiere concentriche di settori trasparenti. Le due ghiere hanno lo stesso numero di settori, ma i settori sono sfasati di un angolo corrispondente a mezzo settore rispetto ai settori dell'altra.

Ad ognuna delle ghiere corrisponde un uscita con un treno di impulsi definito FaseA e FaseB

(in alcuni modelli c'è un ulteriore FaseC utile perché la sua frequenza è in rapporto 1:1 con la velocità di rotazione **n** in **giri/s**).

Se l'encoder ruota in senso orario viene rilevato il segnale di FaseA in anticipo di 90° sul segnale in FaseB, viceversa sarà il segnale FaseB ad essere in anticipo di 90° sul segnale di FaseA.

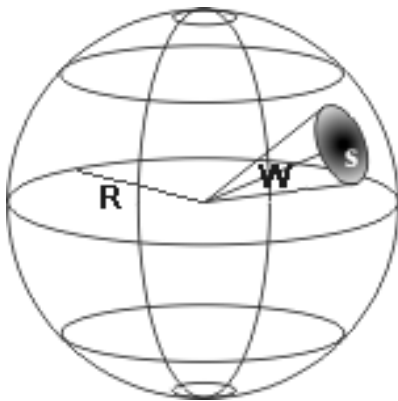
FOTOMETRIA

Intensità luminosa

L'**intensità luminosa** è una grandezza fotometrica e [fisica](#) la cui [unità di misura](#) nel [Sistema Internazionale](#) è la [candela](#). L'intensità luminosa viene quantificata come candele in una data direzione, di una sorgente che emette **radiazione monocromatica di frequenza pari a 540 [THz] e lunghezza d'onda pari a $\lambda = 3 \cdot 10^8 / 5,4 \cdot 10^{14} = 0,55$ [μm] (colore verde)** e con una intensità radiante in detta direzione di **1 / 683 watt** per [steradiante](#).

Lo **steradiante** (simbolo **sr**; nome derivante dal [Greco](#) *stereos*, solido) è l'[unità di misura](#) del [Sistema Internazionale](#) per l'[angolo solido](#), il corrispondente tridimensionale del [radiante](#).

Lo steradiante è definito come l'**angolo solido sotteso, al centro di una sfera di raggio r , da una porzione della superficie della sfera avente area r^2**



Poiché l'area dell'intera sfera equivale a $4\pi r^2$, ne segue che l'angolo solido sotteso da tutta la sfera è pari a 4π [sr]

Angolo solido W sotteso in una sfera di raggio R

L'**intensità luminosa** può anche essere considerata come il numero di fotoni che attraversa una sezione unitaria di un campione (che può essere anche il vuoto) nell'unità di tempo

Candela

La **candela** (simbolo **cd**) è l'[unità di misura](#) dell'[intensità luminosa](#), definita come segue:

Una candela è pari all'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente emettente una [radiazione](#) monocromatica di [frequenza](#) pari a $540 \cdot 10^{12}$ [hertz](#) e di [intensità radiante](#) in quella direzione di 1/683 di [watt](#) per [steradiante](#).

Illuminamento

L'**illuminamento** è una grandezza (detta fotometrica) risultato del rapporto tra il [flusso luminoso](#) (misurato in [lumen](#)) emesso da una [sorgente](#) e l'unità di superficie dell'oggetto illuminato - è quindi riferita all'oggetto illuminato e non alla sorgente. Si misura in **lux**.

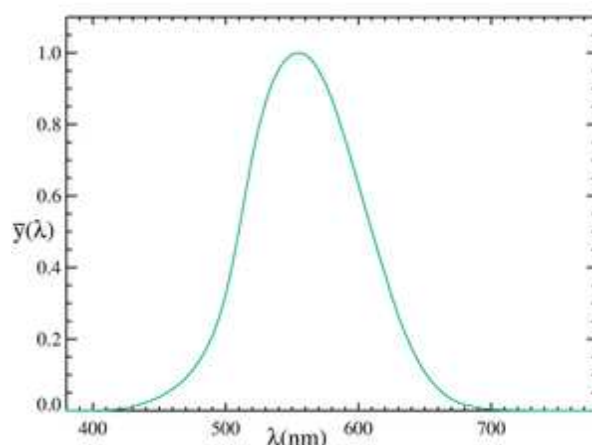
Flusso luminoso

In [fotometria](#) si definisce la grandezza **flusso luminoso** come il **prodotto tra la potenza emessa da una sorgente luminosa puntiforme e il coefficiente di visibilità $y(\lambda)$** , dove λ è la [lunghezza d'onda](#).

Il flusso luminoso si misura in [lumen](#).

Il coefficiente di visibilità è stato ottenuto statisticamente come il valore atteso o medio tra un certo numero di soggetti testati. Esso varia, come detto, con la lunghezza d'onda tra la zona del violetto e quella del rosso ed è **massimo in corrispondenza della luce giallo-verde**.

La curva di visibilità possiede un andamento a campana ristretta.



Sensibilità dell'occhio umano al variare della lunghezza d'onda (colore). L'asse orizzontale è in [nm]

Se la sorgente luminosa, considerata puntiforme, emette 1 watt di potenza, il flusso corrispondente alla lunghezza d'onda di visibilità massima (555 nanometri) è pari a 683 lumen, in quanto vale l'azione del coefficiente di visibilità. Per le altre lunghezze d'onda vale il peso della curva $y(\lambda)$.

Dal flusso luminoso derivano le altre grandezze fotometriche come l'[illuminamento](#), la [radianza](#) e l'[intensità luminosa](#).

La quantità di energia può essere considerata secondo due fattori; il fattore di luce monocromatico o eterocromatico. il primo rileva un solo colore mentre il secondo rileva un insieme di più radiazioni con diverso valore di intensità.

Lumen

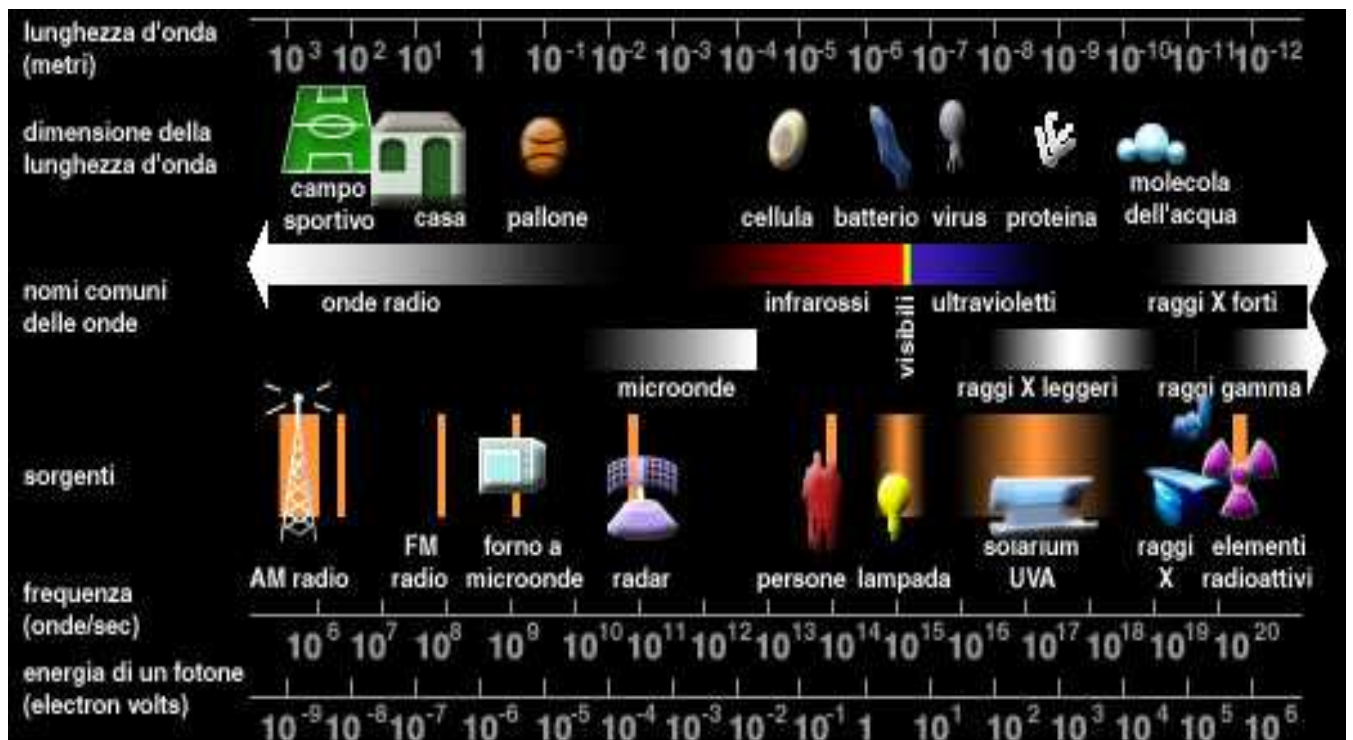
Il **lumen**, in sigla **lm**, è l'unità di misura del [flusso luminoso](#).

Equivale al flusso luminoso rilevabile in un [angolo solido](#) di 1 [steradiante](#) emesso da una sorgente [isotropica](#) con [intensità luminosa](#) di 1 [candela](#).

Ne discende che la stessa sorgente [isotropica](#) con [intensità luminosa](#) di 1 [candela](#) emette un flusso luminoso totale di **4π lumen**.

Lux

Il **lux** (simbolo **lx**) è l'[unità di misura](#) per l'[illuminamento](#) del [Sistema Internazionale](#). Un lux è pari a un [lumen](#) fratto un [metro](#) quadrato.



http://www.lightingacademy.org/encyclopedia/htm/ita/luce/luce_08.htm