

SEMICONDUCTORI : 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 quali **transistor**, **diodi** e diodi ad emissione luminosa (**LED**).

Il semiconduttore più usato è il **Silicio**, elemento del **IV° gruppo**. Ha complessivamente **14** elettroni, disposti su diversi **orbitali** ("gusci elettronici"). Nel **guscio più esterno** vi sono **4 elettroni**, detti di **valenza**.

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 .

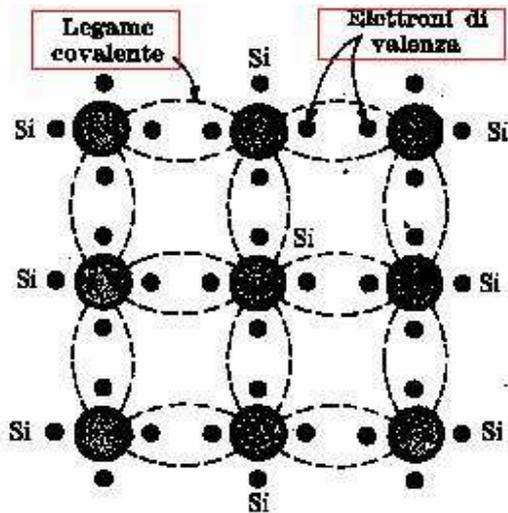


Fig. 1 - Struttura cristallina del silicio , rappresentata schematicamente in due dimensioni .

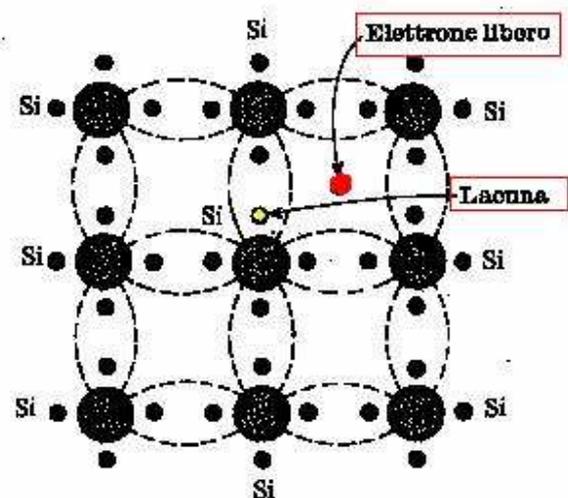


Fig. 2 - Cristallo di silicio nel quale un legame covalente è stato spezzato .

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 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.

Le proprietà dei semiconduttori diventano interessanti se vengono opportunamente **drogati**.

Con il termine **drogaggio**, si intende l'aggiunta al semiconduttore di piccole percentuali di impurità, cioè di **atomi** di altri elementi, allo scopo di modificare le **proprietà elettriche** del materiale.

Gli elementi droganti sono solo del III° o del V° gruppo.

Il drogaggio può essere di tipo **n**: l'atomo drogante è del V° gruppo, per cui ha un **elettrone in più** di quelli che servono per completare 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 è del III° gruppo, per cui ha un elettrone **in meno** di quelli che servono per completare i legami del reticolo cristallino e tale mancanza di un elettrone, indicata con il nome di **lacuna**, si comporta **come** una **particella carica** positivamente e si può spostare all'interno del semiconduttore.

Riferendosi al **silicio**, 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**.

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**]

Il numero di atomi di silicio in un centimetro cubo di materiale è dell'ordine di **10²².**

Un buon drogaggio consiste nell'immissione nel Silicio di **1 atomo di sostanza drogante ogni **10⁸** atomi di Silicio** (cioè **10¹⁴ [at/cm³]** di sostanza drogante)

Giunzione p-n (DIODO)

Una **giunzione p-n** è un cristallo **semiconduttore** drogato, composto da due zone, una ad eccedenza di **elettroni** (**Silicio di tipo **n****) ed una ad eccedenza di **lacune** (**Silicio di tipo **p****).

Il termine **giunzione** fa riferimento alla regione in cui si incontrano i due tipi di drogaggio (P e N).

Può essere pensata come la **regione di confine tra le 2 zone di tipo P e di tipo N** ed è **priva** di portatori liberi, infatti è detta anche **regione di svuotamento** ed ha le proprietà di un isolante.

Requisito essenziale è che sia sottile, circa **1 [micrometro]**.

Ai due lati della giunzione vi è una **differenza di potenziale** costante, chiamata **tensione di soglia**, che vale circa **0,6 [V]**, nel Silicio.

La giunzione p-n possiede alcune interessanti proprietà che vengono sfruttate nell'elettronica moderna.

Le giunzioni p-n sono comunemente usate come **diodi: interruttori elettronici che permettono un flusso di **corrente** (convenzionale) in una direzione (da P a N), ma non in quella opposta.**

In realtà sono elettroni che si spostano, sotto l'azione di un campo elettrico esterno, da N a P.

Questo risultato è ottenuto incrementando o riducendo l'estensione della regione di svuotamento grazie agli effetti della **polarizzazione inversa** e della **polarizzazione diretta**, dove il termine **polarizzazione** indica l'applicazione di una tensione elettrica alla giunzione P-N .

Polarizzazione diretta

Si ha polarizzazione diretta quando la parte di *tipo P* è connessa al terminale *positivo* del generatore di tensione, mentre la *parte di tipo N* è connessa al terminale *negativo*.

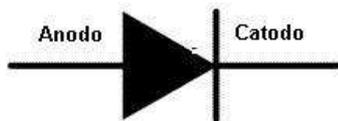
Questo rende possibile una corrente elettrica. Un elettrone viaggia dal terminale negativo a quello positivo della batteria, passando attraverso la regione di tipo N. Si fa strada verso la giunzione P-N, quindi la attraversa e prosegue nella regione di tipo P.

Una volta all'interno della regione di tipo P, l'elettrone salta da una lacuna disponibile all'altra, facendosi strada verso il terminale positivo dell'alimentazione.

Polarizzazione inversa

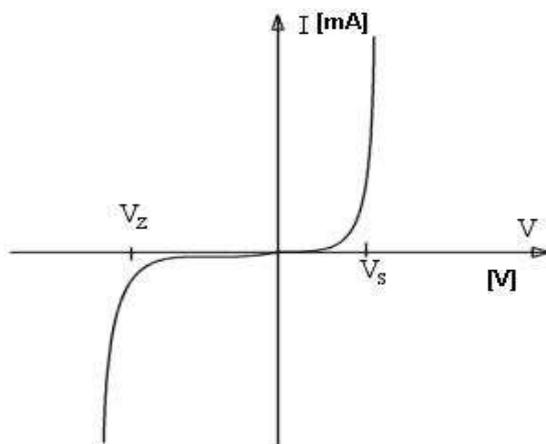
La polarizzazione inversa si ottiene collegando la regione di *tipo P* al terminale *negativo* dell'alimentazione e la regione di *tipo N* al terminale *positivo*.

Questo aumenta la barriera di potenziale sulla giunzione e per questa ragione non passerà corrente attraverso la giunzione (o ne passerà molto poca).



Il simbolo circuitale del *diodo* esprime chiaramente questa funzione: il triangolo indica la direzione che permette il flusso di corrente elettrica considerato convenzionalmente positivo, cioè dal polo positivo(anodo) a quello negativo(catodo), mentre la sbarra ne indica il blocco.

Caratteristica tensione -corrente del diodo reale.



Come si vede dalla curva tensione-corrente , a piccole variazioni della tensione ai capi del dispositivo **oltre** la tensione di soglia (V_s), corrispondono grandi variazioni della corrente elettrica di lavoro (**cio'** esprime un aspetto della non-linearità dei diodi)

Questo significa che il diodo permette di mantenere la tensione ai suoi capi approssimativamente costante al variare della corrente che lo attraversa.

E' necessario **limitare**, con un resistore di valore opportuno, la corrente condotta da un diodo affinché non superi mai la massima corrente prevista per quello specifico *diodo*, oltre la quale può verificarsi la rottura fisica del dispositivo.

I diodi a giunzione p-n reali , quando polarizzati inversamente, invece di impedire completamente il passaggio di corrente presentano una **piccolissima corrente inversa** , in genere dell'ordine del **miliardesimo** di Ampere, che rimane costante con l'aumentare della tensione inversa fino ad un certo valore detto **tensione di Zener** V_z , (come si può notare nel 3° quadrante della caratteristica del diodo reale), che può andare da alcuni volt ad alcune decine di **Volt** .

Per valori di tensione inversa **superiori a V_z** (**cioè più negativi**), la corrente inversa aumenta molto rapidamente: tale regime di funzionamento, detto **regime di valanga** o di **breakdown**, non è dannoso per il componente finché la potenza dissipata rimane nei limiti tollerati : i **diodi Zener** per esempio sono progettati espressamente per funzionare in regime di valanga.

Tuttavia, vista la caratteristica molto ripida, il funzionamento in valanga nei normali diodi è molto pericoloso e porta in genere alla rottura del componente.

La tensione di lavoro dei diodi non è sempre pari a circa **0,6 V** a temperatura ambiente, come nella maggior parte dei diodi a giunzione p-n, ma può variare da **0,2 V** (**diodo Schottky** o vecchi diodi al germanio), a **1,5 V** (diodi LED ad arseniuro di gallio) , a **3 V** (**diodi LED azzurri**) .

Diodo LED



Questi diodi emettono luce visibile se polarizzati direttamente : di solito vengono usati per segnalazione su pannelli di controllo e come spie luminose, oppure come trasmettitori per telecomandi e fibre ottiche.

Di recente sono stati sviluppati modelli ad **alta luminosità** adatti per **illuminotecnica**, e già oggi esistono in commercio numerosi apparecchi di illuminazione che utilizzano i LED come sorgenti in alternativa alle tradizionali lampade ad incandescenza e alle lampade fluorescenti, con grossi vantaggi in termini di risparmio energetico e durata.

Colore	Tensione diretta
Infrarosso	1,3 V
Rosso	1,8 V
Giallo	1,9 V
Arancio	2,0 V
Verde	2,0 V
Azzurro	3 V

La loro tensione di polarizzazione diretta varia a seconda della **lunghezza d'onda** della luce che emettono, ed emettono tanta più luce quanta più corrente li attraversa: in genere è necessaria una corrente minima di **4 mA** (corrente di soglia) perché possano emettere luce in quantità percettibile. La corrente varia in funzione del tipo di diodo led impiegato.

I diodi LED "normali" richiedono di media **15 mA** per emettere una buona luminosità.

Nel caso di **LED HL** (alta luminosità) la corrente sale fino a valori di circa **20-25 mA**.

LED di nuova concezione, ad altissima luminosità , possono assorbire fino ad **1 ampere** di corrente, per questi, è previsto l'accoppiamento meccanico con un dissipatore di calore.

Diodo Laser

Come i diodi LED; anche i diodi laser emettono luce tramite la ricombinazione di elettroni e lacune nella zona di barriera del diodo : la differenza fondamentale è che questa emissione è stimolata dalla luce stessa, e che la luce emessa è **coerente**.

Questo viene ottenuto con una struttura del diodo a sandwich con tre zone drogate in modo diverso (n - p - p+) che presentano anche un diverso indice di rifrazione ottico: in pratica, le zone di confine n-p e p-p+ si comportano come due **specchi** che riflettono la luce emessa nel diodo e la confinano al suo interno.

In questo modo i **fotoni** in viaggio nel diodo stimolano gli elettroni e le lacune negli atomi di semiconduttore a ricombinarsi emettendo un altro fotone con la **stessa lunghezza d'onda** e la stessa **fase** di quello incidente, cioè stimolano una **emissione coerente**.

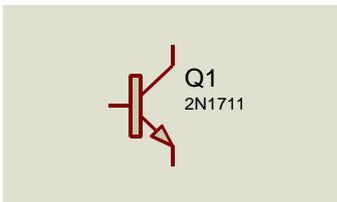
Normalmente i diodi laser sono realizzati in arseniuro di gallio o in [arseniuro di gallio](#) e [alluminio](#), per ottenere una differenza di indici di rifrazione fra le tre zone che sia il più possibile alta.

L'emissione laser si instaura polarizzando il diodo e portandolo in conduzione diretta, e solo quando si oltrepassa una **corrente di soglia** variabile, a seconda dei modelli, dai **20 ai 30 mA**.

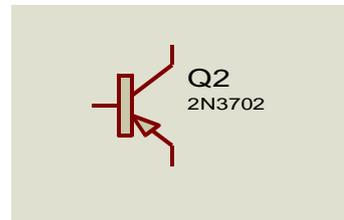
Fotodiode

Lo scopo dei fotodiode è di rivelare la radiazione luminosa (visibile o infrarossa) che colpisce il corpo del diode stesso. La struttura interna di un [fotodiode](#) è progettata per reagire alla luce generando una coppia di portatori (un elettrone e una lacuna) che contribuiscono al passaggio di **corrente** attraverso il diode. Si usano in **polarizzazione inversa**: in questa condizione, la corrente che attraversa il diode è dovuta (quasi) esclusivamente alla luce incidente, ed è proporzionale all'intensità luminosa.

Transistor a giunzione bipolare : BJT



npn



pnp

Un **transistor a giunzione bipolare** (in inglese *bipolar junction transistor* o BJT) è un tipo di [transistor](#), cioè un componente elettronico **attivo** che funziona come **amplificatore** (in Elettronica Analogica) o **interruttore** (in Elettronica Logica).

Il BJT è formato da diversi strati, drogati in modo diverso, che formano un transistor NPN o PNP.

Le tre zone sono chiamate **base**, quella centrale, **collettore** ed **emettitore** quelle laterali, indifferentemente dal tipo di drogaggio.

A seconda della [polarizzazione](#), il transistor (al di là della configurazione), ha tre regioni di funzionamento :

1. **Regione attiva**
2. **Regione di interdizione (OFF)**
3. **Regione di saturazione (ON)**

Il transistor viene spesso utilizzato come **interruttore** (switching transistor) adatto per attivare o disattivare circuiti, trasduttori, ecc..

In tutte queste applicazioni il funzionamento è legato a due particolari stati del BJT : **quello di saturazione (ON)**, in cui è quasi come un **corto circuito (resistenza zero)** e **quello di interdizione (OFF)**, in cui è quasi come un **circuito aperto (resistenza infinita)**

Notevole importanza assume il tempo impiegato dal dispositivo per il passaggio da uno stato all'altro.

Nel caso **ideale** il transistor passa dallo stato OFF a quello ON e viceversa **istantaneamente**.