

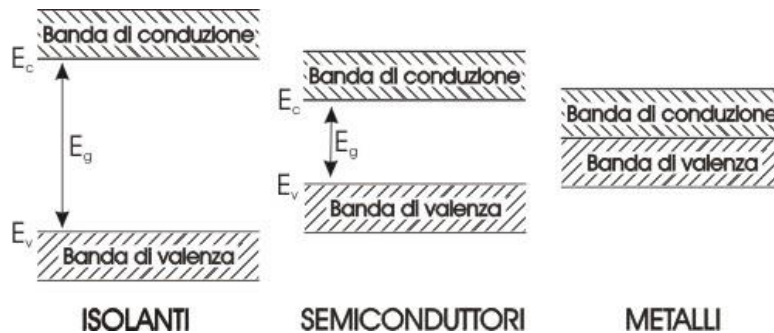
INCONTRI DI FISICA: COSTANTE DI PLANCK- *esperienza di laboratorio*

INTRODUZIONE AL DIODO

Rosario Lenci – INFN LNF

FISICA DELLO STATO SOLIDO e bande di energia

I corpi solidi di origine minerale, (metalli, semiconduttori e isolanti) sono costituiti da atomi aggregati in una struttura cristallina di forma geometrica regolare e ripetitiva. Gli elettroni più esterni di ogni atomo chiamati elettroni di valenza si influenzano vicendevolmente, stabilendo un legame detto covalente che tiene uniti gli atomi. La fisica dello stato solido, descrive la materia secondo una struttura elettronica a bande di energia possedute dagli elettroni; in condizioni di quiete, si trovano in una banda di livelli chiamata di VALENZA, se sono eccitati invece si trovano in una banda di livelli chiamata di CONDUZIONE. Tra le due, esiste una banda detta di INTERDIZIONE o PROIBITA che costituisce un insieme di stati energetici che non possono essere assunti da un elettrone. Lo schema sotto illustra quanto descritto sopra; supponendo uno stato iniziale con Temperatura $T=0\text{ K}$ e materiale chimicamente puro.



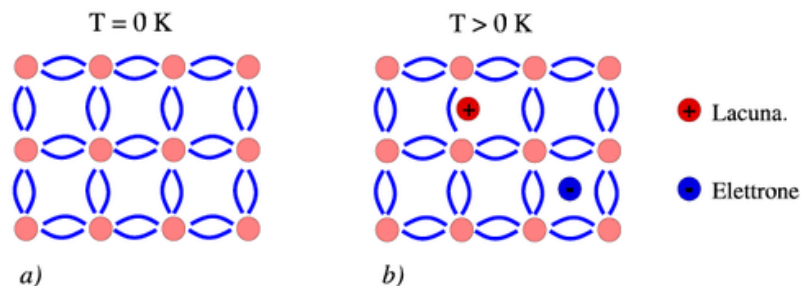
supponiamo uno stato iniziale con Temperatura $T=0\text{ K}$ e materiale chimicamente puro.

- isolanti* > gli elettroni sono tutti addensati nella banda di valenza; la banda di conduzione è vuota, e la banda proibita ha un'ampiezza di molti eVolt (1 eVolt è l'energia corrispondente al lavoro che un elettrone compie per spostarsi tra due punti aventi tra loro una ddp di 1 volt). Nessun valore di campo elettrico applicato esternamente riesce a fornire un'energia tale che permetta agli elettroni di saltare la banda proibita e portarsi in banda di conduzione. Sono quindi cattivi conduttori di elettricità (vetro, vuoto);
- semiconduttori* > materiali con comportamento molto simile agli isolanti con la differenza che la banda proibita è molto più sottile; gli elettroni sono addensati in banda di valenza, ma già a Temperatura ambiente alcuni acquistano una energia sufficiente per saltare la banda proibita e portarsi in banda di conduzione ; l'applicazione di un campo elettrico quindi permette la circolazione di corrente. Sostanzialmente hanno una conducibilità intermedia tra i due e dipendente in modo diretto dalla Temperatura .
- conduttori* > non esiste la banda proibita; gli elettroni sono addensati in banda di valenza e in banda di conduzione. In taluni elementi addirittura le due bande sono sovrapposte. E' sufficiente un piccolo campo elettrico per condurre elettricità. Sono buoni conduttori di corrente (metalli) .

I SEMICONDUTTORI

Esempi di semiconduttore sono Germanio e Silicio. Entrambi presentano atomi tetravalenti, ossia composti da 4 elettroni di valenza.

A $T=0\text{ K}$ abbiamo sostanzialmente gli atomi immobili, quindi una condizione di totale equilibrio (fig. a)



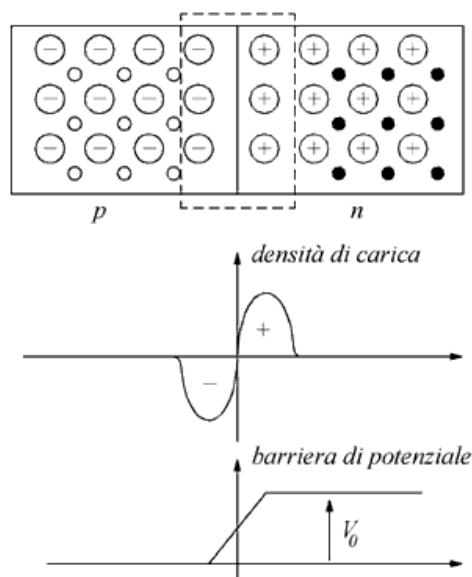
Appena la T inizia ad aumentare alcuni elettroni di valenza ‘saltano’ divenendo liberi e lasciano al loro posto una ‘lacuna’ che verrà immediatamente riempita dall’elettrone dell’atomo adiacente.

A temperatura ambiente quindi una barretta di semiconduttore è sottoposta ad una agitazione termica che produce continue rotture di legami covalenti, dando luogo a coppie lacune-elettroni e ricombinazioni elettroni-lacune tra atomi adiacenti. Questo processo continuo di debolissime correnti definite ‘intrinseche’ (dipendenti dalla Temperatura) sono considerate zero in quanto il numero degli elettroni liberi è uguale a quello dalle lacune.

DROGGAGGIO DEL SEMICONDUTTORE – GIUNZIONE PN

L'operazione di drogaggio, consiste nell’iniettare elementi trivalenti (detti anche accettori), ossia con tre elettroni di valenza e quindi di tipo P (come Alluminio, Boro, Gallio ecc.), oppure elementi pentavalenti (detti anche donatori), ossia con 5 elettroni di valenza, quindi di tipo N (come Antimonio, Arsenico ecc.) in una barretta di semiconduttore GE o SI.

Prendiamo due pezzi di SI uno drogato tipo N (che contiene un numero notevole di elettroni liberi,) e uno drogato tipo P (contenente quindi un numero notevole di lacune libere) e mettiamoli a contatto, creando una giunzione; in realtà si realizza il tutto su una unica barretta, drogando da un lato N e da un lato P. Continuiamo ad immaginare però le due barrette che si mettono a contatto: vediamo cosa accade.



La concentrazione di cariche di segno opposto sui due lati, fa sì che le lacune libere (definite cariche maggioritarie) della zona P si riversano nella zona N neutralizzando elettroni liberi, viceversa, gli elettroni liberi (definiti anche essi cariche maggioritarie) della zona N, si diffondono nella zona P neutralizzando lacune. Questa ricombinazione iniziale elettrone- lacuna, dà luogo a quella che si definisce Corrente di Diffusione spontanea (dovuta appunto alle cariche maggioritarie). Dopo questa prima fase di diffusione quindi, accade che a ridosso della giunzione si viene a creare questa situazione:

- Sul lato P gli atomi che cedono lacune assumono una carica prevalentemente negativa.
- Sul lato N gli atomi che cedono elettroni assumono una carica prevalentemente positiva.

Si formano quindi RISPETTIVAMENTE degli ioni P e N che formano una barriera di potenziale, ossia un campo elettrico che si oppone alla corrente di diffusione. Questo si spiega poiché le lacune provenienti dal lato P trovano ostacolo negli ioni positivi e viceversa gli elettroni provenienti dal lato N vengono ostacolati dagli ioni negativi. Più ioni si addensano - la barriera si allarga, e la corrente di diffusione decresce; il fenomeno si ferma una volta raggiunto il punto di equilibrio.

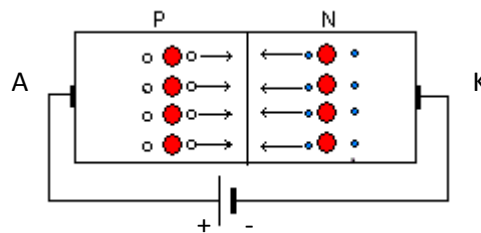
Il punto di giunzione quindi che si viene a creare con ioni positivi e ioni negativi viene chiamato zona di svuotamento (in inglese depletion layer) e non contiene né elettroni né cavità libere.

Si è così realizzato un diodo: il lato sinistro P si identifica come Anodo (+) ed il lato destro N si identifica come CATODO (-).

Vediamo ora cosa succede se applichiamo un campo elettrico esterno.

Giunzione PN polarizzata direttamente

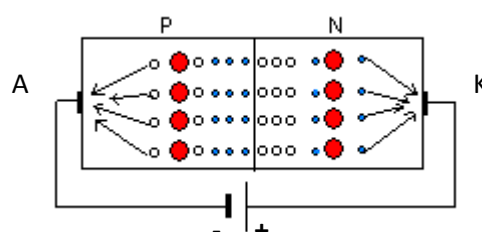
Connettiamo una batteria con il positivo sull' Anodo(A) ed il negativo sul Catodo (K);



gli elettroni che escono dal negativo della batteria, entrando nel lato N spingono gli elettroni della barretta verso la giunzione, e contemporaneamente le lacune che fuoriescono dal lato P spingono le lacune verso la giunzione; questo consegue il restringimento della depletion layer; fino a che il valore del campo elettrico è tale da annullarla completamente: in tal caso avremo una circolazione di corrente nel semiconduttore dipendente dal valore di tensione del campo elettrico applicato; abbiamo così realizzato una giunzione polarizzata direttamente.

Giunzione PN polarizzata inversamente

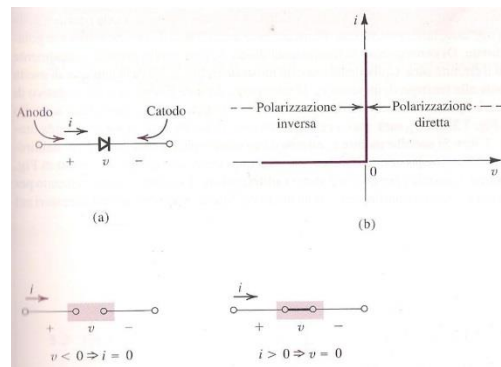
Se invertiamo la batteria, con il polo positivo (anodo) collegato alla zona N e il polo negativo (catodo) alla zona P si ottiene una polarizzazione inversa.



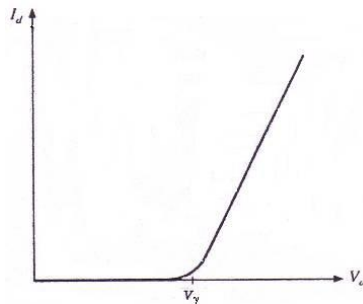
La polarizzazione inversa produce migrazione di elettroni verso l'anodo nella zona N e verso la giunzione nella zona P, e conseguente allargamento della zona di depletion layer ; risulta ancora più difficile per un elettrone poter passare dalla zona N alla zona P. Non abbiamo in sintesi passaggio di corrente.

CARATTERISTICA DI UN DIODO

Il diodo ideale dovrebbe comportarsi come un interruttore. Polarizzato direttamente, dovrebbe cortocircuitarsi permettendo così lo scorrimento di corrente massima:



in realtà non è così: come abbiamo visto c'è una barriera di potenziale da 'annullare' ..per cui la caratteristica reale del diodo è la seguente:



V_f è il valore di tensione del nostro diodo per farlo cominciare a lavorare a regime (o come si dice in gergo: per accenderlo bene) ovvero la tensione per cui, annullata la barriera di potenziale, inizia a scorrere una corrente ottimale per il suo funzionamento. Viene anche indicata nei datasheet come V_f , che sta per Voltage forward = tensione di polarizzazione diretta, con relativa corrente di circolazione (di solito per valori che vanno da 10-25mA)

Tipicamente questa V_f vale circa 0.2V per i diodi al germanio e 0.6 per i diodi al silicio.

Nei LED questa V_f risulta più alta e dipende dall'elemento di drogaggio (e quindi dal suo colore); esempio :

- i led rossi si accendono a regime con una $V_f=1.8V$,
- led gialli $V_f=1.9V$
- led verdi $V_f=2V$
- led blu $V_f=3.5V$

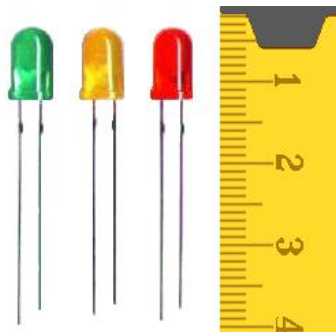
O per dirla in altri termini, V_f è la caduta di tensione che si stabilisce ai capi del diodo quando cominciamo a farlo lavorare nelle sue condizioni ottimali.

Cosa si è capito da tutto questo e cosa andremo a fare:

Il diodo è un componente elettronico a due terminali, NON lineare (in quanto cambia i suoi parametri al variare della tensione e della corrente, al contrario di come si comporta ad es una resistenza), unidirezionale, ossia, conduce solo se polarizzato direttamente.

Esistono diverse tipologie di diodi per i più svariati utilizzi nei circuiti elettronici: rivelatori di onde radio, rivelatori di radiazioni, circuiti di sintonia, circuiti raddrizzatori, display luminosi ecc.

Quello che andremo a fare ora, è una esperienza di laboratorio con i diodi LED per arrivare al calcolo della costante di Planck.



Anche il LED funziona esattamente come descritto sopra, con l'unica differenza è che una volta stabilita la conduzione tramite opportuno campo elettrico esterno, il LED emette radiazione (visibile e non).

Come accennato sopra, il tipo di radiazione dipende dalla sostanza drogante: esempio zinco selenio permettono luce blu, diamante luce ultravioletta, alluminio gallio arsenico luce rossa e infrarossa...ecc..

Diodi di radiazione differente, hanno V_f lievemente differenti; la V_f è rilevabile dal datasheet di riferimento.

Nella nostra esperienza di oggi avremo a che fare con semplici LED con luce visibile, in cui la corrente che circola si attesta attorno ai 20-25 mA: a titolo di cronaca, aumentare la corrente di pilotaggio non consegue variazioni significative di luminosità. Oltretutto, spostandosi verso quelli che si chiamano i 'maximum ratings' del LED (valori di massima operatività, consultabili sempre sul datasheet di appartenenza) si riduce la loro vita lavorativa, o alla peggio, si possono distruggere.

Quello che andremo a fare quindi sarà tracciare la curva Tensione-Corrente nel seguente modo:

- 1 – impostare step di tensione partendo da 0 V e leggere la corrente relativa in mA;
- 2 – raccolte un numero congruo di coppie di valori, inserirle su un piano di assi cartesiani X (Volt) e Y (mA) e tracciare la curva;
- 3 – prendere due punti vicini sulla parte alta della curva ove si presuppone il grafico abbia andamento lineare, simile ad una retta;
- 4 – tirare giù l'intercetta con l'asse X; il punto di incrocio sarà il nostro V_{th} (Voltage Threshold, tensione di soglia), ossia il valore di tensione per cui inizia lo scorrimento di corrente, con relativa emissione di fotone.

Si assume il fatto che al valore V_{th} trovato, corrisponda fornire 1 quanto di Energia ad un elettrone, che ritornando nel suo stato originario restituisce sotto forma di emissione di 1 fotone, quindi 1 quanto di luce nello spettro visibile.

Questa è l'energia posseduta dall'elettrone:

$$E = e * V_{th}$$

ove e = carica elementare dell' elettrone = $1.602 * 10^{-19}$ Coulomb
 V_{th} = valore di tensione ricavato dall'intercetta (Volt)

Questa è l'energia posseduta dal fotone emesso:

$$E = h * f$$

ove h = costante di Planck = $6.626 * 10^{-34}$ J*s
 f = frequenza di emissione (Hertz)

Per cui avremo:

$$e * V_{th} = h * f$$

e da cui possiamo estrapolare il valore della costante di Planck a verifica della formula.

E' interessante notare che il valore V_{th} si può individuare-oltre che in modo grafico- anche ricorrendo alla geometria analitica con l'equazione della retta passante per un punto che vale:

$$(y - y_p) = m * (x - x_p)$$

- y, x > coppia di valori di uno dei punti (noti)scelti a piacimento;
- y_p > valore di ordinata del punto da cercare, nel nostro caso = 0 (trovandosi sull'asse X)
- x_p > incognita
- m > coefficiente di angolazione, noto, in quanto:
 $m = dy/dx = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)$ ove x_1, y_1 e x_2, y_2 sono le due coppie dei punti.

Risolvendo l'equivalenza sopra avremo che :

$$x_p = x_2 - (y_2/m)$$

ove x_p corrisponde al valore V_{th} .

Un altro interessante metodo è tracciare un triangolo con l'intercetta, e introdurre il calcolo trigonometrico, partendo dalla formula

$$tg_{\alpha} = \text{sen}_{\alpha} / \text{cos}_{\alpha}$$

fino ad arrivare all'individuazione del punto V_{th} sull'asse delle ascisse .