

# La fisica dei semiconduttori

Ricerca ed organizzazione appunti:

*Prof. ing. Angelo Bisceglia*

Proprietà dei semiconduttori  
Proprietà dei semiconduttori - Conducibilità  
Proprietà dei semiconduttori - Elettroni e lacune  
La struttura a bande  
La struttura a bande - Eccitazione termica  
La struttura a bande - Il processo di ricombinazione

### Proprietà dei semiconduttori

Le proprietà che caratterizzano i semiconduttori sono le seguenti:

sono sostanze non metalliche la cui resistività può variare da un millesimo a un milione di  $\Omega$  per centimetro, a temperature sufficientemente basse sono comunque buoni isolanti; la conducibilità elettrica dei materiali puri cresce rapidamente con la temperatura;  
le proprietà elettriche sono molto sensibili al contenuto di impurezze caratteristiche;  
sono buoni fotoconduttori.

3

A causa della estrema sensibilità delle proprietà fisiche dei semiconduttori a impurezze, temperatura, radiazione, ecc., questa classe di materiali può essere sfruttata nella costruzione di molti tipi di dispositivi: diodi, transistor, circuiti integrati, fotorivelatori, laser, celle solari, sensori di temperatura, pressione, campo magnetico e sostanze contaminanti e altro ancora.

Lo sviluppo di tali dispositivi ha portato alla realizzazione di calcolatori elettronici e di microprocessori sempre più potenti e veloci.

Solo pochi anni fa non sarebbe stato realizzabile un calcolatore potente come quello che state usando.

4

### Proprietà dei semiconduttori - Conducibilità

Nei semiconduttori la conducibilità elettrica  $\sigma$  può variare da  $10^3 \div 10^{-6} (\text{W cm})^{-1}$ .

Questo è un valore intermedio, inferiore a quello dei metalli, ma molto superiore alla conducibilità degli isolanti.

La caratteristica più significativa della conducibilità dei semiconduttori tuttavia non è il valore di  $\sigma$ , ma la sua forte dipendenza dalla temperatura e dal contenuto di impurezze particolari.

Mentre nei metalli  $\sigma$  aumenta gradualmente al diminuire di  $T$ , nei semiconduttori  $\sigma$  diminuisce di molti ordini di grandezza tra la temperatura ambiente e alcuni gradi Kelvin.

5

### Proprietà dei semiconduttori - Elettroni e lacune

La conducibilità elettrica ha un andamento complesso e dipende fortemente dalla purezza del cristallo e dalla temperatura; essa è dovuta alla presenza di due tipi di portatori, elettroni e lacune.

Indicando con  $e$  la carica elettrica fondamentale (positiva per definizione), la carica elettrica dei portatori, è uguale a  $-e$  per gli elettroni e ad  $e$  per le lacune.

La  $\sigma$  di un semiconduttore è data quindi dalla somma delle conducibilità delle lacune e degli elettroni.

Dette  $n$  la concentrazione degli elettroni e  $p$  la concentrazione delle lacune, si ha:

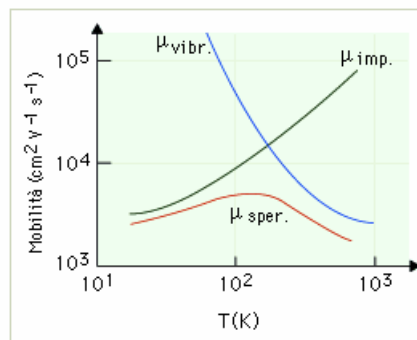
$$\sigma = \sigma_e + \sigma_h = e (n \mu_e + p \mu_h)$$

dove  $\mu_e$  e  $\mu_h$  sono le mobilità degli elettroni e delle lacune e rappresentano il tratto percorso in un secondo sotto l'azione di un campo elettrico di un Volt per metro.

6

La mobilità è limitata principalmente dalla diffusione (urti) dei portatori da parte di impurezze cariche e da parte delle oscillazioni degli ioni del reticolo cristallino. La mobilità dipende dalla temperatura: alle alte temperature prevale l'effetto delle oscillazioni degli ioni, la cui ampiezza cresce al crescere di  $T$ ; alle basse temperature prevale l'effetto delle impurezze perché l'ampiezza delle oscillazioni è modesta.

7



Dipendenza della mobilità dalla temperatura in un semiconduttore composto di arseniuro di gallio e alluminio. In basso la curva sperimentale, al di sopra i contributi separati delle impurezze e vibrazioni.

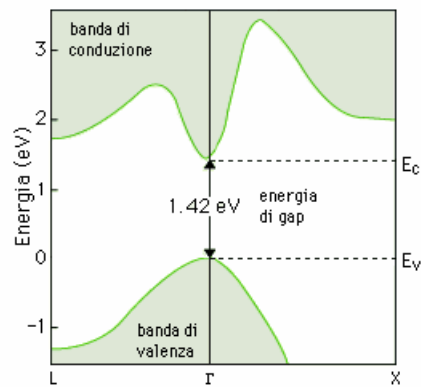
8

### La struttura a bande

Le proprietà elettriche dei semiconduttori si interpretano partendo dalla struttura a bande.

Tale struttura non differisce qualitativamente da quella di un isolante, ossia esiste una banda di valenza (con energia minore o uguale a  $E_V$ ), che può ospitare gli  $N$  elettroni di valenza, ed esiste, separata da un'energia  $E_G$  detta energia di gap, una banda di conduzione (con energia minore o uguale a  $E_C$ ).

9



Struttura delle bande nel GaAs. L'ascissa indica la direzione della velocità degli elettroni nel cristallo ed è proporzionale alla loro quantità di moto. Il punto  $\Gamma$  corrisponde a velocità nulla.

10

La differenza sta nel fatto che, nei semiconduttori,  $E_G = E_C - E_V$  è inferiore a  $E_G$  negli isolanti; ciò ha una profonda influenza sulla distribuzione degli elettroni fra le due bande per  $T$  diverso da 0 K e quindi anche sulla conducibilità elettrica di questi materiali.

11

Cristallo	$E_G$ (eV)
Diamante	5.5
CdS	2.42
GaP	2.2
GaAs	1.4
Si	1.12
Ge	0.67
PbS	0.37
InSb	0.16
HgTe	0.15

Gap di energia per alcuni semiconduttori.

12

### **La scoperta dei semiconduttori**

Faraday (1834) e Hittorf (1851) avevano osservato che certi materiali, debolmente conduttori, hanno una conducibilità più elevata alle alte temperature. Intorno al 1930 Gudden mostrò che la conducibilità cresce come  $\exp(a/T)$ , con  $a$  dell'ordine di qualche decimo di eV, e che  $s$  (la conducibilità) è sensibile al contenuto di certe impurezze (fatto già osservato nel 1908 da Badäcker).

Tuttavia nei primi anni trenta la situazione era ancora così confusa che uno dei maggiori fisici di allora, W.Pauli, scriveva: "I semiconduttori sono un pasticcio (filthy mess), chi può affermare che esistono veramente?"

In quegli stessi anni Alan Wilson stava fornendo il quadro concettuale delle proprietà elettroniche dei semiconduttori.

13

### **La struttura a bande - Eccitazione termica**

Allo zero assoluto ( $T = 0$  K) in un semiconduttore puro gli elettroni occupano completamente la banda di valenza e la banda di conduzione è completamente vuota.

Il materiale si comporta come un isolante.

A  $T > 0$  K l'agitazione termica fa sì che alcuni elettroni passino dalla banda di valenza alla banda di conduzione, lasciando un ugual numero di lacune nella banda di valenza.

14

Possiamo immaginare che le oscillazioni degli ioni del reticolo siano così grandi che, ogni tanto, gli elettroni ricevono un colpo abbastanza forte da farli saltare alla banda di conduzione.

Allora l'elettrone è libero di muoversi.

La concentrazione  $n$  di elettroni nella banda di conduzione e la concentrazione  $p$  di lacune in banda di valenza crescono rapidamente all'aumentare della temperatura e dipendono dal gap di energia  $E_G$  :

$$n(T) = p(T) \sim \exp [ -E_G / (2 k_B T) ]$$

con  $k_B = 0.9 \cdot 10^{-4}$  eV per grado la costante di Boltzmann.

15

In un semiconduttore puro dunque la conducibilità elettrica è dovuta sia al moto degli elettroni nella banda di conduzione sia al moto delle lacune nella banda di valenza.

I simboli  $n$  e  $p$  significano che gli elettroni hanno carica negativa mentre le lacune si comportano come portatori di carica positiva.

16



### La struttura a bande - Il processo di ricombinazione

Quando un elettrone incontra una lacuna si ha la ricombinazione: poiché la lacuna rappresenta la mancanza di un elettrone nella banda di valenza, l'elettrone va a riempire questa "mancanza" e la coppia sparisce. Nello stesso tempo l'agitazione termica eccita altri elettroni dalla banda di valenza alla banda di conduzione, cioè si creano nuove coppie.

All'equilibrio termico i due processi, eccitazione e ricombinazione, si bilanciano esattamente e si ha la concentrazione di equilibrio:

$$n(T) = p(T) \sim \exp \left[ -E_G / (2 k_B T) \right]$$