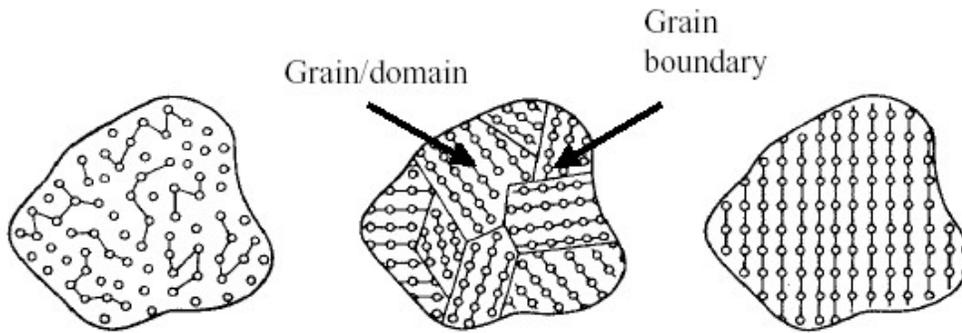


Struttura dei solidi

- Amorfa (es. vetri)
- Policristallina
- Monocristallina



Amorphous

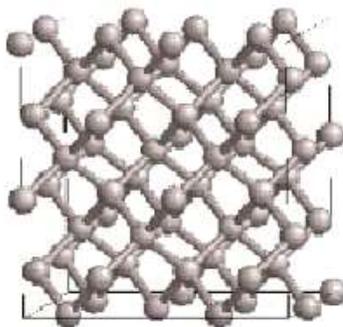
No recognizable long-range order

Polycrystalline

Completely ordered
In segments

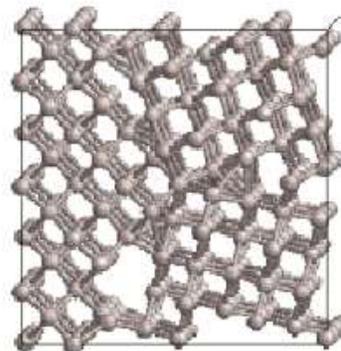
Crystal

Entire solid is made up of atoms in an orderly array



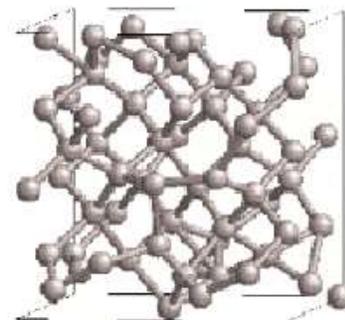
Single Crystal

All atoms arranged on a common lattice



Polycrystalline

Different lattice orientation for each grain



Amorphous

Atoms are disordered (no lattice)

Proprietà fisiche dei solidi

E' consuetudine raggruppare le proprietà dei solidi in uno schema che ha origine nella tradizione e giustificazione nelle finalità d'uso.

Meccaniche	Trasporto di materia	Chimiche di superficie	
elasticità durezza plasticità+viscosità tenacità+fragilità resistenza all' usura	diffusione conducibilità ionica	ossidazione corrosione catalisi	
Termiche	Elettriche	Magnetiche	Ottiche
calore specifico dilatazione termica conducibilità termica	costante dielettrica conducibilità	suscettività magnetica ciclo di isteresi	assorbimento riflessione luminescenza

Lo schema è utile ma insufficiente per varie ragioni. Da un lato in molti casi è arbitraria la separazione: per esempio la costante dielettrica ha a che fare sia con le proprietà elettriche che con quelle ottiche. Dall'altro canto esistono numerosi effetti incrociati, nel senso che alcuni coefficienti descrivono la risposta a un doppio stimolo, per esempio ad un campo elettrico e ad un campo magnetico (**effetto Hall**). Il quadro è dunque ricco e complesso. Descriviamo qui solo le proprietà principali.

Proprietà meccaniche

Le proprietà meccaniche riguardano il comportamento di un materiale sottoposto a uno sforzo esterno: descrivono il modo in cui un materiale si comporta quando lo si tira o lo si comprime, lo si piega o lo si torce, o quando gli si assesta un colpo netto. Dall'esperienza comune sappiamo che si hanno comportamenti di vario genere, riassunti nella tabella sottostante.

L'acciaio speciale può sopportare, prima di rompersi, uno sforzo 20 volte superiore a quello che può sopportare l'alluminio.

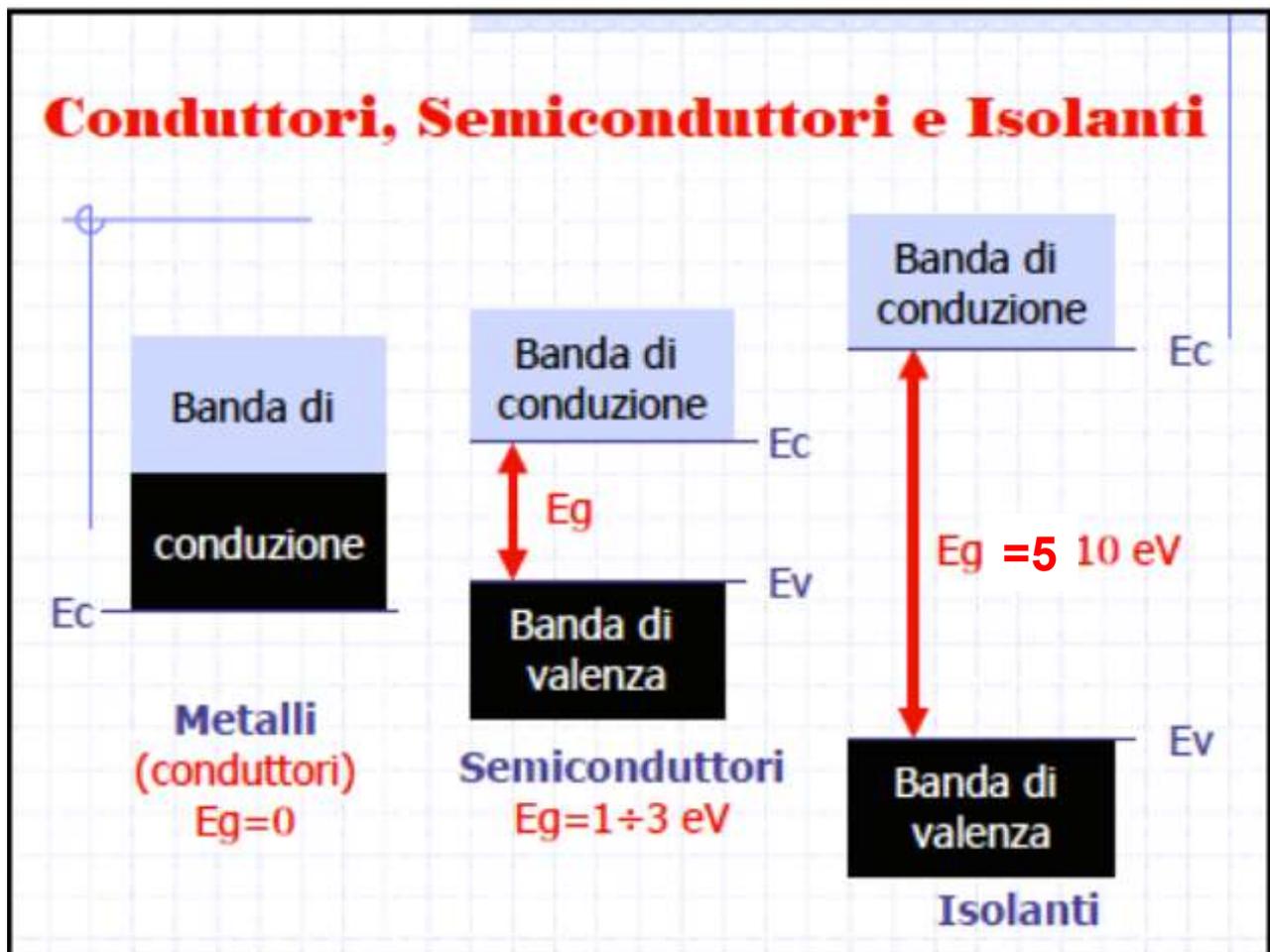
RIGIDEZZA
DUTTILITA'

a. Se lasciamo cadere su un pavimento duro una pallina di gomma o di acciaio osserviamo un rimbalzo: all'impatto la pallina modifica la sua forma, ma la riprende nel rimbalzo.	elasticità
b. Una pallina di piombo invece si schiaccia leggermente intorno al punto di impatto e non rimbalza.	plasticità
c. Un oggetto di vetro o di ceramica comune cadendo va in frantumi.	fragilità
d. Una lima di ferro può lavorare per lungo tempo del ferro dolce, ma si logora se è impiegata sull'acciaio.	usura
e. Una punta di rame scalfisce il legno ma non l'acciaio.	durezza
f. Una sbarra sottoposta a un numero molto elevato di vibrazioni, anche di piccola ampiezza, a un certo punto si può rompere.	fatica

Proprietà elettriche

■ *I materiali vengono classificati in:*

- ◆ **isolanti** o **dielettrici** (quarzo o SiO_2 , ceramiche, materiali polimerici)
- ◆ **conduttori** (metalli)
- ◆ **semiconduttori**
 - **elementari:** silicio (Si), germanio (Ge)
 - **composti:** arseniuro di gallio (GaAs), fosforo di indio (InP), carburo di silicio (SiC), tellururo di cadmio (CdTe)

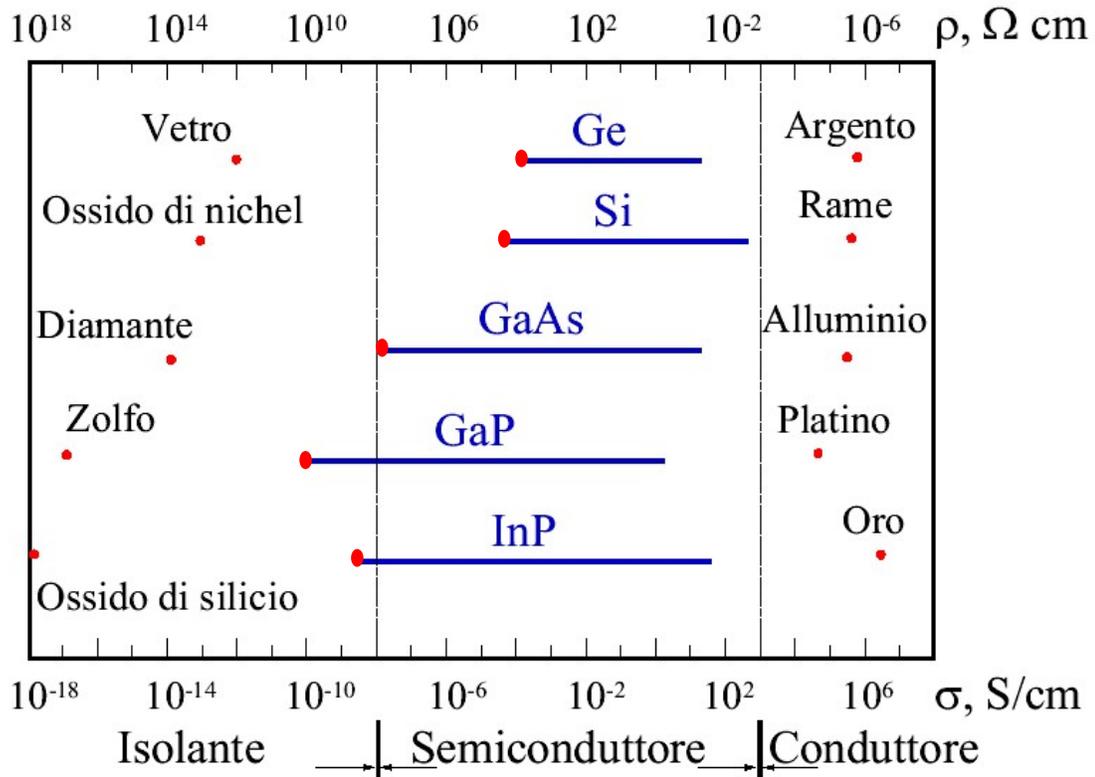


■ *I parametri che li caratterizzano sono:*

conducibilità elettrica σ [S/cm]

resistività elettrica $\rho = 1/\sigma$ [Ω cm]

Esempi di materiali



- **Le barrette blu indicano la variazione di conducibilità / resistività con il drogaggio**
- Uno dei maggiori motivi per cui i semiconduttori sono utili nell'elettronica è che le loro **proprietà elettroniche possono essere fortemente modificate in modo altamente controllato aggiungendo piccole quantità di impurità, chiamate droganti**, le quali sono classificabili in due tipi: quelle che forniscono un **eccesso di elettroni** alla banda di conduzione (semiconduttore **tipo n**), e quelle che forniscono un **eccesso di lacune** alla banda di valenza (semiconduttore **tipo p**).

Proprietà elettriche: modello

- È possibile studiare le proprietà elettriche sulla base di un **modello semiclassico**:

$$F_{ext} = \hbar \frac{dk}{dt} = \frac{dp}{dt}$$

Equazione quasi-classica
(ricavata la lezione scorsa)

Elettroni si spostano di moto unif accelerato a tratti (tra gli urti), anche se in media si muovono a velocità costante = VELOCITA' di DRIFT

La deriva è lenta, anche se l'elettrone si muove molto velocemente tra gli urti.

Come si definisce la massa efficace:

ricavata da $F_{ext} = m^* a$

e- sottoposto a potenziale periodico nel cristallo e la definizione di velocità è fatta in modo quantistico

$$v_j(k) = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E_j}{\partial k}$$

Velocità dell'elettrone (velocità di gruppo)

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\hbar} \frac{\partial E}{\partial k} \right) = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2} F_{ext}$$

(Passaggi nella lezione scorsa)

$$m^* = \frac{1}{\frac{1}{\hbar^2} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{\partial^2 E}{\partial p^2} \right)}$$

La forma della banda (attraverso il valore della concavità) determina il valore della massa efficace, positiva per BC e negativa per BV

Aspetti quantitativi

- Modello semiclassico della dinamica dell'elettrone**

In **assenza di collisioni** il moto degli elettroni segue la dinamica classica per le forze esterne (i campi sono trattati in modo classico) mentre la velocità (influenzata dal potenziale elettrico del cristallo) dipende dalla relazione energia- momento ($E-k$ o $E-p$)

$$\frac{dE}{dt} = F_{ext} \cdot v$$

Assioma quantistico (Analogo alla definizione di lavoro: $L=F \cdot s$)

$$v_j(k) = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E_j}{\partial k}$$

Velocità dell'elettrone (j = indice di banda)

Da queste due relazioni, considerando una sola dimensione, si ha per ogni banda:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial E}{\partial k} \frac{dk}{dt} = F_{ext} \cdot \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E}{\partial k} \Rightarrow \left(\frac{F_{ext}}{\hbar} - \frac{dk}{dt} \right) \cdot \frac{\partial E}{\partial k} = 0$$

Una condizione sufficiente è

$$F_{ext} = \hbar \frac{dk}{dt} = \frac{dp}{dt}$$

Equazione quasi classica


$$p = \hbar k$$

Significato della massa efficace

Partendo dalla definizione di accelerazione, cerchiamo l'equivalente della massa in termini energetici

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\hbar} \frac{\partial E}{\partial k} \right) = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \frac{dk}{dt} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \frac{d}{dt} (\hbar k) = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2} F_{ext}$$

Dal confronto con l'espressione $F_{ext} = m^* a$ si ricava l'espressione della **massa efficace** m^*

$$m^* = \frac{1}{\frac{1}{\hbar^2} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{\partial^2 E}{\partial p^2} \right)}$$

La forma della banda (attraverso il valore della concavità) determina il valore della massa efficace, positiva per BC e negativa per BV

I semiconduttori

Le proprietà che caratterizzano i semiconduttori sono le seguenti:

- a) sono sostanze non metalliche, di resistività variabile nell'intervallo $10^{-3} - 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$; a temperature sufficientemente basse sono buoni isolanti;
- b) la conducibilità elettrica dei materiali puri cresce rapidamente con la temperatura;
- c) le proprietà elettriche sono molto sensibili al contenuto di impurezze caratteristiche;
- d) sono buoni fotoconduttori.

I semiconduttori sono in generale materiali duri e fragili. Alla vista appaiono lucenti e scuri; esaminati con luce infrarossa di frequenza inferiore a una frequenza di soglia sono trasparenti.

I semiconduttori più sfruttati sono il germanio (**Ge**) e soprattutto il silicio (**Si**), che appartengono al gruppo IV del sistema periodico; il silicio è ancor oggi il materiale più estesamente impiegato.

Essi cristallizzano, come il diamante, in un reticolo cubico a facce centrate (**fcc**), in modo che ogni atomo si trovi al centro di un tetraedro ai vertici del quale stanno altri quattro atomi. Il tipo di legame fra ogni coppia di atomi prossimi è **covalente** (come fra i due elettroni della molecola di H_2), quindi la densità elettronica è massima lungo la congiungente centro - spigolo e ogni coppia di elettroni ha **spin** antiparalleli.

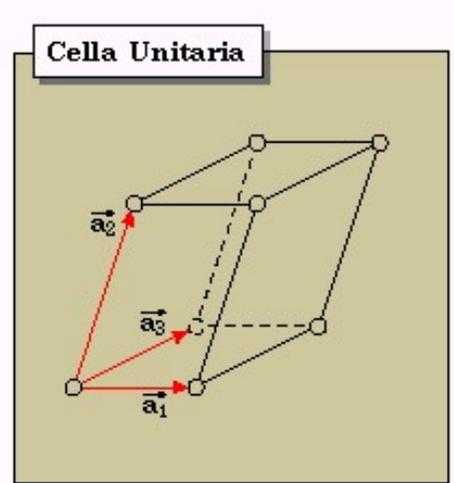
IIIB	IVB	VB	VIB	VIB
B	C	N	O	F
Al	Si	P	S	Cl
Ga	Ge	As	Se	Br
In	Sn	Sb	Te	I
Tl	Pb	Bi	Po	At

Esistono anche i **semiconduttori composti** III-V, formati da elementi del III e V gruppo, quali **GaAs**, **InSb**, **GaP** o leghe ternarie come **$\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$** con $x < 1$.

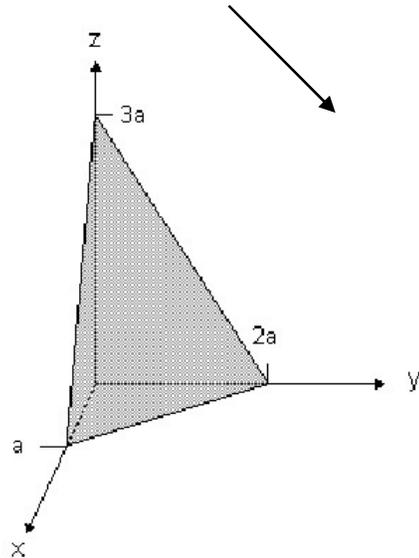
Un'altra classe è quella II-VI, CdS, CdSe ecc.

Indici di Miller e piani cristallini

- Un reticolo cristallino è la ripetizione di una **cella unitaria** definita da tre vettori non complanari
- Per individuare un **piano cristallino** (importante nella fase di crescita e taglio del cristallo) si introducono gli **indici di Miller**:



- Si annota dove il piano intercetta gli assi cristallografici
- Si divide l'intercetta per la lunghezza della cella unitaria lungo ogni asse
- Si calcola il reciproco e si moltiplica per una costante in modo da avere numeri interi



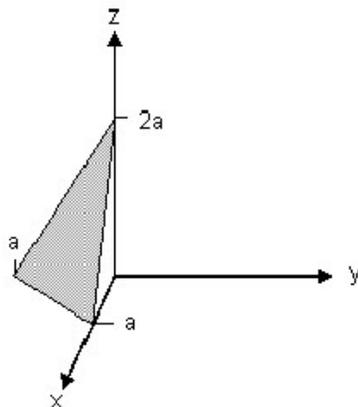
- Normalized intercepts:
 - 1, 2, 3
- Reciprocals:
 - 1, 1/2, 1/3
- Multiplier is 6
- Miller indices for this plane:
 - (6, 3, 2)

Casi particolari di indici di Miller

- Barretta (negato) per indicare Intersezione con ascissa negativa
- 0 per indicare che un piano non interseca un asse (intersezione a ∞)

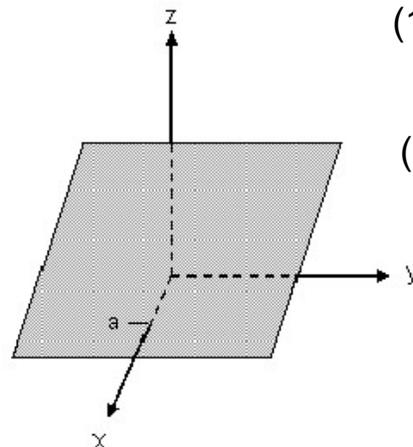
(1, -1, 2)

↓
(2, $\bar{2}$, 1)



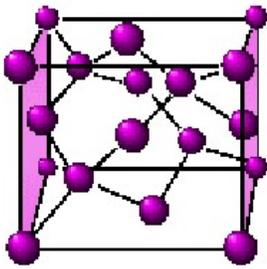
(1, ∞ , 1)

↓
(1, 0, 1)



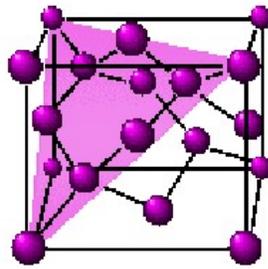
Piani cristallini

- Un semiconduttore è tipicamente anisotropo, ovvero le proprietà di tipo chimico ed elettrico dipendono dalla direzione, quindi dagli indici di Miller.
- La scelta di disporre di un cristallo cresciuto secondo diversi indici di Miller è effettuata a seconda delle proprietà che si vogliono ottimizzare (es. interfaccia, legami non saturati, tasso di ossidazione, correnti ...)



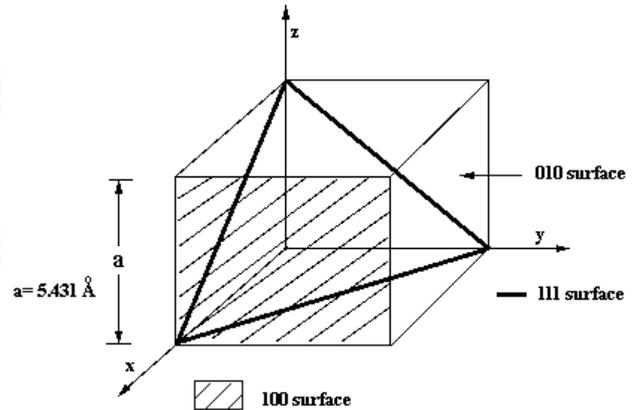
<100>

Per dispositivi
MOS-VLSI



<111>

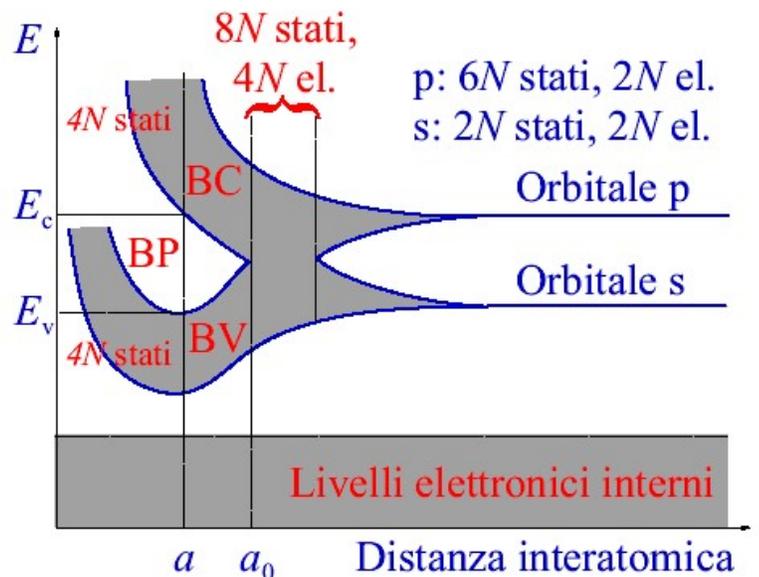
Per altri dispositivi
(bipolari)



Schema della formazione di bande in semiconduttori

■ *N* atomi del IV gruppo (C, Si, Ge, Sn)

■ Se la distanza interatomica si riduce, i livelli energetici esterni interagiscono

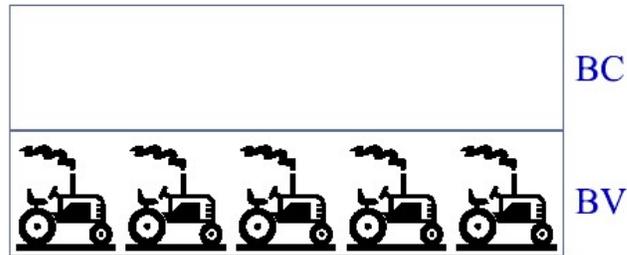


BC: banda di conduzione;
BP: banda proibita (energy gap);
BV: banda di valenza

Modello di Shockley

- Per $a < a_0$, a $T = 0$ K tutti gli elettroni più esterni occupano completamente la BV
- La BC è completamente vuota
- La conduzione elettrica **non è possibile** anche in presenza di un campo elettrico

Modello dell'autorimessa

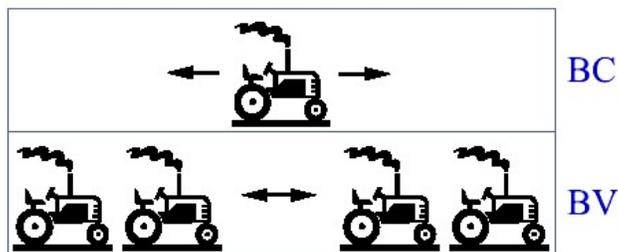


- A $T \neq 0$ K, alcuni elettroni saltano nella BC
- BC è in parte occupata, BV è in parte vuota
- La conduzione elettrica **è possibile** in presenza di un campo elettrico

◆ BC: moto di elettroni

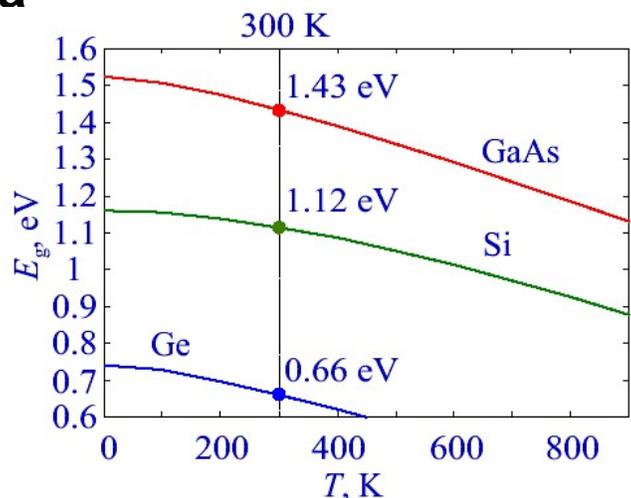
◆ BV: moto di posti lasciati liberi da elettroni, ovvero moto di cariche positive (lacune, carica q)

Modello dell'autorimessa



Dipendenza dalla temperatura

- E_g è una funzione decrescente della temperatura
- Al crescere di T aumenta il numero di portatori liberi, quindi la conducibilità elettrica σ
- A pari T i materiali a gap maggiore hanno inferiore σ

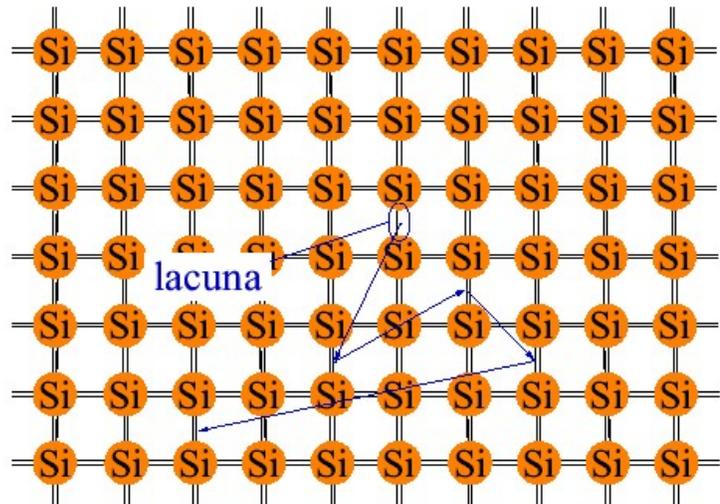


Concetto di lacuna

Perché si rompe il legame covalente? **Temperatura.**

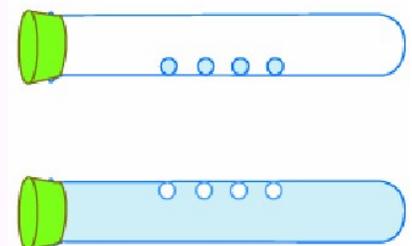
■ *Una lacuna corrisponde ad una rottura di un legame covalente nel cristallo*

■ *Il moto di lacune corrisponde allo spostamento del legame covalente rotto da un atomo all'altro*



La configurazione elettronica di un solido a temperature diverse dallo zero assoluto è in generale diversa da quella corrispondente allo stato fondamentale. Nei semiconduttori ad esempio, per effetto della temperatura può accadere che la banda di valenza non sia completamente occupata.

A livello pittorico possiamo immaginare che in un livello non occupato della banda di valenza sia presente una particella immaginaria, detta "buca" o "lacuna". Una delle conseguenze inaspettate della teoria delle bande è che questa particella si comporta come se avesse carica elettrica positiva: sotto l'azione di un campo elettrico esterno accelera nello stesso verso del campo elettrico applicato (ricordiamo che un elettrone avendo carica negativa accelera nella direzione opposta a quello che campo applicato).



Particella fittizia con carica +q

Densità di portatori liberi

E_c = livello più basso in banda di conduzione

E_v = livello più alto in banda di valenza

■ Per calcolare il numero di portatori liberi disponibili alla conduzione, si usa la **funzione di distribuzione in energia** $\rho(E)$

■ Si def. $dn = \rho_n(E)dE$ ($dp = \rho_p(E)dE$) come:
numero di elettroni (lacune) liberi per unità di volume con energia compresa tra E ed $E + dE$

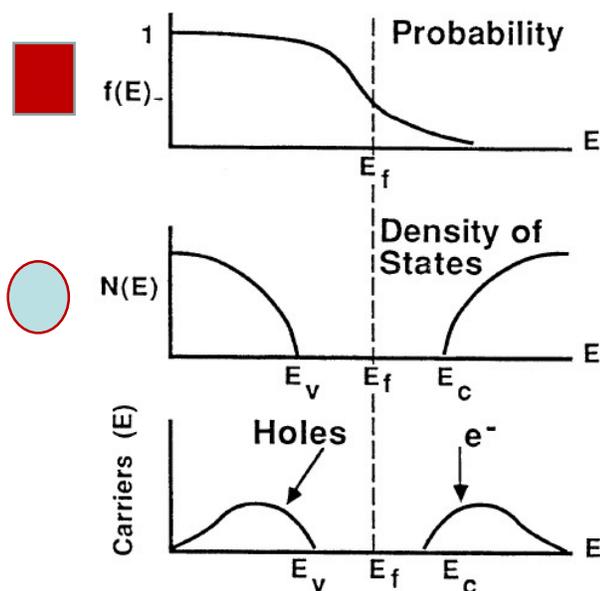
■ Il numero totale di elettroni (lacune) liberi nella BC (BV) è dato da

$$n = \int_{E_c}^{+\infty} \rho_n(E) dE \quad p = \int_{-\infty}^{E_v} \rho_p(E) dE$$

■ La funzione di distribuzione può essere calcolata come il prodotto di due fattori:

- ◆ numero di stati disponibili per unità di energia e volume: $N_n(E)$, $N_p(E)$
- ◆ probabilità che ogni stato sia occupato: $f_n(E)$, $f_p(E)$

$$\rho_n(E) = N_n(E)f_n(E) \quad \rho_p(E) = N_p(E)f_p(E)$$



Nota dalla meccanica statistica

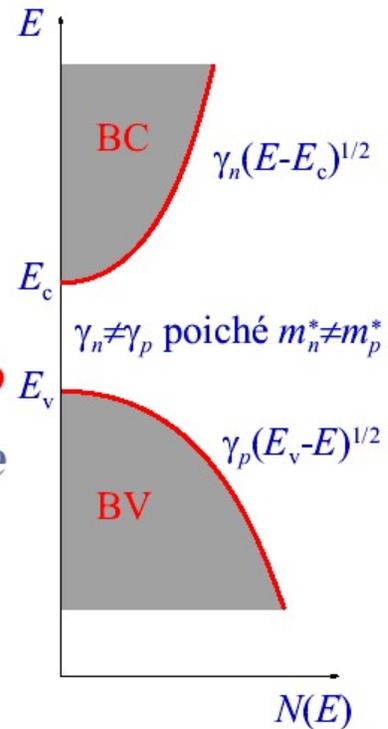
E_f = Energia Fermi = probabilità $\frac{1}{2}$ di occupazione dello stato

Nota dalla meccanica quantistica

Si osservi che per le lacune occorre considerare la funzione «complementare» di Fermi $f_p(E) = 1 - f_n(E)$

Densità degli stati disponibili

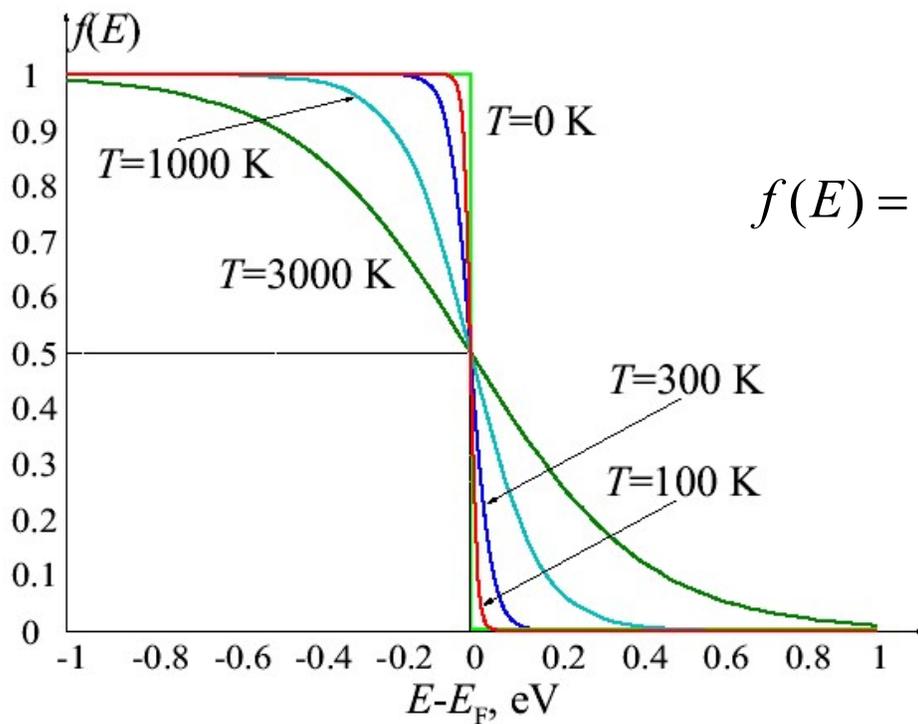
- L'asse delle energie si riferisce convenzionalmente **solo** agli elettroni
- Le lacune sono cariche positive, quindi l'energia potenziale cui sono sottoposte ha **segno opposto**
- L'asse delle energie per le lacune avrebbe **verso opposto**
- Le due curve hanno concavità diversa perché $m_n^* \neq m_p^*$



Funzione di Fermi-Dirac (occupazione)

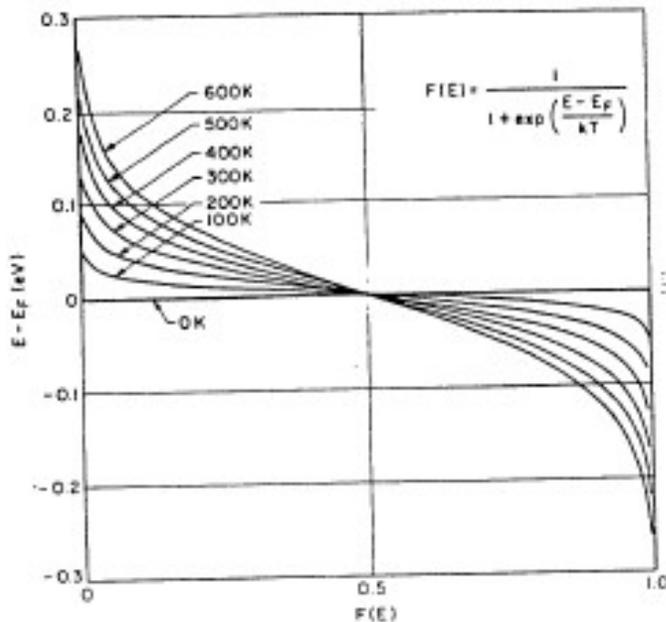
- Ricavabile considerando particelle che obbediscono al principio di indeterminazione e a quello di esclusione, con il vincolo del numero totale costante ed energia costante
- Una lacuna corrisponde ad uno stato non occupato da un elettrone
- Probabilità di occupazione dei posti disponibili in **equilibrio termodinamico**:
 - ◆ elettroni: $f_n(E) = f(E)$
 - ◆ lacune: $f_p(E) = 1 - f(E)$
- $f(E)$ è la funzione di Fermi Dirac

$$f(E) = \left[1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right) \right]^{-1}$$



$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

- Esiste una brusca regione di “transizione” tra stati occupati e stati vuoti
- **La funzione cambia rapidamente solo nell’intorno di pochi kT** ($kT = 26 \text{ meV}$ a $T = 300 \text{ °K}$, dove k è la **costante di Boltzmann**)



$0^\circ\text{K} \Rightarrow$
 all states $< E_F$ occupied
 all states $> E_F$ empty

 $> 0^\circ\text{K} \Rightarrow$
 some e^- have $E > E_F$
 some holes exist $E < E_F$

- Nella maggior parte dei casi i semiconduttori sono **non degeneri** (E_F entro la banda proibita) e vale l’approssimazione di Boltzmann

$$f(E) \approx e^{-\frac{E - E_F}{kT}}$$

che corrisponde a considerare gli e^- come particelle “classiche” (infatti per i gas vale la **statistica di Boltzmann**). Ciò è ragionevole perché per alte energie le particelle sono “rare”, quindi “distinguibili”.

Densità di portatori all'equilibrio

- Con l'approssimazione di Boltzmann si ha in generale

$$n = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}} \quad p = N_v e^{-\frac{E_F - E_v}{kT}}$$

Dove $N_{\{c,v\}} \propto (Tm_{\{c,v\}}^*)^{3/2}$ [cm⁻³] sono le densità degli stati sul fondo della banda di conduzione o in cima alla banda di valenza. Es. nel silicio a T ambiente $N_c = 2.8 \cdot 10^{19}$, $N_v = 1.04 \cdot 10^{19}$.

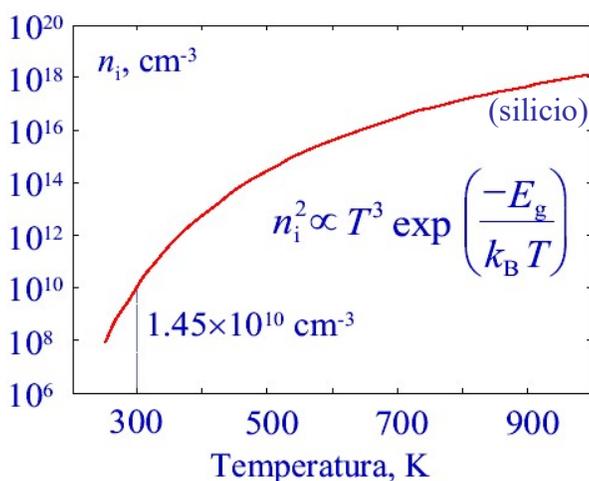
Ne consegue che per un **semiconduttore all'equilibrio termodinamico** si ha sempre

$$np = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

il prodotto **pn è costante** (dipende dalla **temperatura** e dal **materiale attraverso E_g**) e soprattutto **indipendente da E_F**

Concentrazione intrinseca

Per un semiconduttore intrinseco (**senza impurezze droganti**) per il quale $p=n$ (i portatori sono le coppie elettrone-lacuna generate termicamente) si definisce una concentrazione intrinseca n_i dato che dipende solo dal tipo di materiale e cresce rapidamente con la temperatura



T ambiente (300 K)

Elemento	Gap (eV)	$n_i=p_i$ (cm ⁻³)
Ge	0.7	$\sim 10^{13}$
Si	1.1	$\sim 10^{10}$
GaAs	1.4	$\sim 10^6$

Data la definizione di n_i si può scrivere che detta **legge dell'azione di massa**

$$pn = n_i^2$$

Livello di Fermi intrinseco

■ Per un semiconduttore intrinseco

$$n = p = n_i \implies E_F = E_{Fi}$$

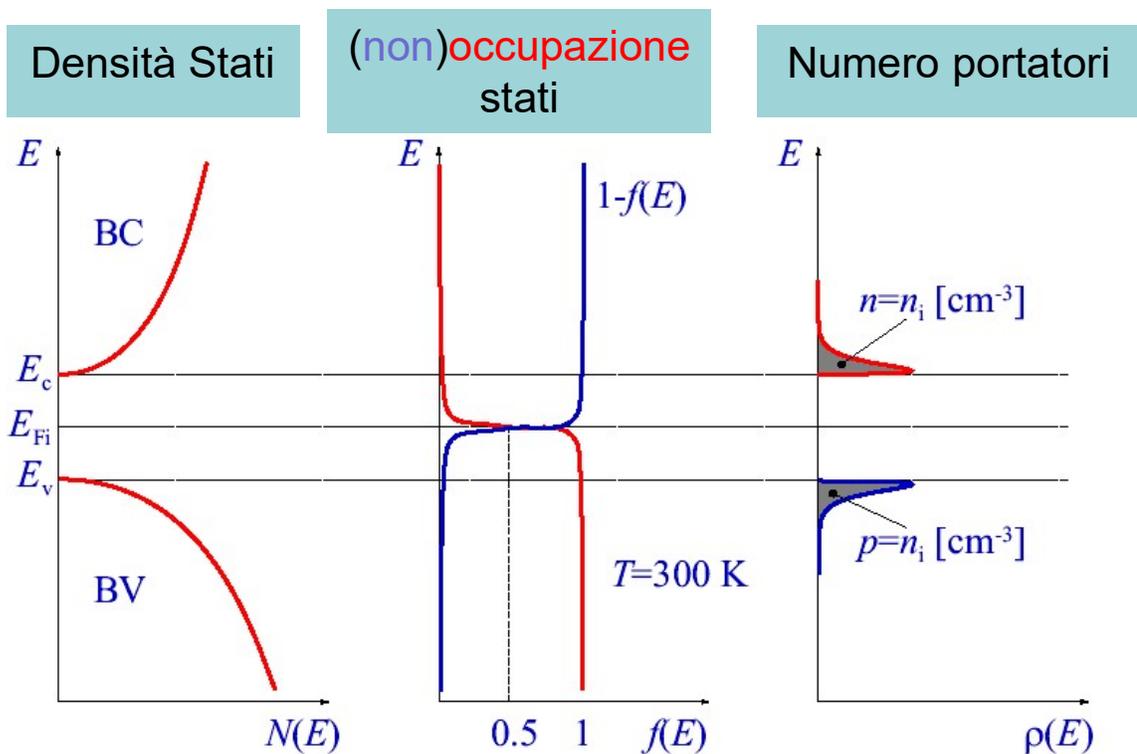
■ Dalla condizione

$$N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_{Fi}}{k_B T}\right) = N_v \exp\left(-\frac{E_{Fi} - E_v}{k_B T}\right)$$

si ricava:

$$E_{Fi} = \frac{E_c + E_v}{2} - \frac{k_B T}{2} \ln \frac{N_c}{N_v} \approx \frac{E_c + E_v}{2} \quad \text{se } N_c \approx N_v$$

■ E_{Fi} è circa al **centro della banda proibita**



Solo in equilibrio termodinamico

■ E_F assume il significato di **baricentro** delle distribuzioni di cariche libere:

- ◆ nel caso intrinseco, $E_F = E_{Fi}$
- ◆ se $n > p$, $E_F > E_{Fi}$
- ◆ se $n < p$, $E_F < E_{Fi}$

■ Si noti che in equilibrio n e p non possono essere variate indipendentemente, infatti deve sempre valere la legge dell'azione di massa $np = n_i^2$

Semiconduttori drogati (estrinseci)

- L'importanza dei semiconduttori risiede nella capacità di **cambiarne la conducibilità elettrica** di diversi ordini di grandezza grazie all'introduzione di opportuni **atomi droganti**
- Gli atomi droganti sono elementi di un gruppo diverso rispetto al semiconduttore, in modo da avere
 - ◆ più di 4 elettroni sul guscio più esterno: atomi **donatori**, **semiconduttore drogato n**
 - ◆ meno di 4 elettroni sul guscio più esterno: atomi **accettori**, **semiconduttore drogato p**

- **Atomi del V gruppo (As), con 5 el. sul guscio più esterno**



n

- **4 dei 5 el. completano i legami covalenti con Si, il quinto è debolmente vincolato al nucleo di As**

- **A 300 K, l'en. termica basta a liberarlo verso la BC ionizzando $As \rightarrow As^+$**

- **Atomi del III gruppo (B), con 3 el. sul guscio più esterno**



p

- **I 3 el. formano legami covalenti con Si, agli altri el. in BV basta poca energia per andare a formare il quarto legame**

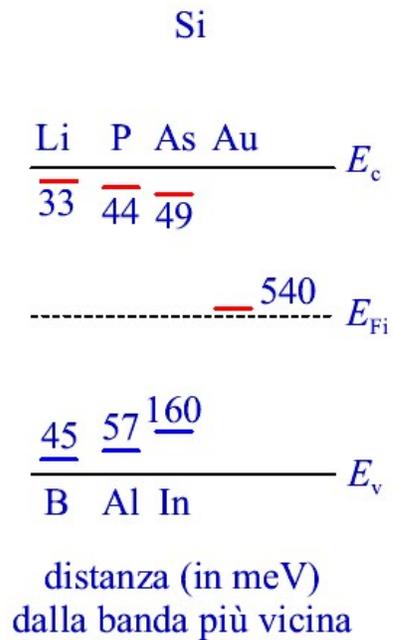
- **A 300 K, l'en. termica basta a liberare una lacuna verso la BV ionizzando $B \rightarrow B^-$**

Atomi droganti

- **Ogni elemento drogante è caratterizzato da un livello energetico corrispondente alla sua ionizzazione**

- **Tipi di atomi droganti:**

- ◆ **superficiali (shallow)** se il livello energetico è vicino alla banda corrispondente
- ◆ **profondi (deep)** se il livello energetico è vicino a E_{Fi}



Neutralità elettrica

- **Consideriamo un campione di semiconduttore drogato con N_D (unità di misura: cm^{-3}) atomi donatori e N_A atomi accettori per unità di volume**

- **Valori tipici di drogaggio sono $10^{14} \div 10^{20} \text{ cm}^{-3}$**

- **Nel campione si hanno:**

- ◆ **cariche positive** mobili (p) e fisse (N_D^+)
- ◆ **cariche negative** mobili (n) e fisse (N_A^-)

dove N_D^+ e N_A^- sono le concentrazioni di atomi droganti ionizzati

- **Se il campione è **omogeneo** deve essere **localmente neutro**:**

$$n + N_A^- = p + N_D^+$$

questa relazione viene detta **condizione di neutralità locale**

■ **Se il semiconduttore è non degenere, vale anche la legge dell'azione di massa $np = n_i^2$**

$$\begin{cases} n - p = N_D^+ - N_A^- = N^+ \\ np = n_i^2 \end{cases}$$

Da queste due relazioni il procedimento rigoroso contempla il calcolo di E_F dal quale dipendono tutte le altre concentrazioni. Infatti per gli ioni vale:

$$N_A^- = N_A f(E_A)$$

$$N_D^+ = N_D [1 - f(E_D)]$$

dove E_A e E_D sono i livelli energetici dei droganti. Normalmente però vale l'ipotesi di **completa ionizzazione** dei droganti, ovvero

$$N_A^- = N_A$$

$$N_D^+ = N_D$$

■ **Le concentrazioni di portatori liberi dipendono da $N^+ = N_D^+ - N_A^-$, ovvero dal drogaggio ionizzato netto**

■ **Per drogaggio n ($N^+ > 0$), usando la legge dell'azione di massa nella condizione di neutralità:**

$$n - \frac{n_i^2}{n} = N^+ \implies n = \frac{N^+}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2n_i}{N^+} \right)^2} \right]$$

Densità di portatori in semiconduttori drogati

■ Per tutte le temperature per cui $n_i \ll |N^+|$:

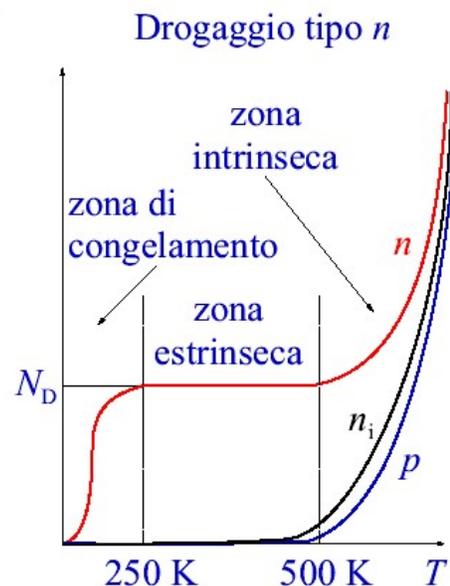
<p style="text-align: center; color: red;">Tipo n</p> $n \approx N^+ \quad p \approx \frac{n_i^2}{N^+}$	<p style="text-align: center; color: blue;">Tipo p</p> $p \approx N^+ \quad n \approx \frac{n_i^2}{ N^+ }$
--	---

■ A $T = 300$ K la **ionizzazione è completa**:

<p style="text-align: center; color: red;">Tipo n</p> $N^+ \approx N_D \text{ a } 300 \text{ K}$ $n \approx N_D \quad p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$	<p style="text-align: center; color: blue;">Tipo p</p> $ N^+ \approx N_A \text{ a } 300 \text{ K}$ $p \approx N_A \quad n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$
---	--

■ In funzione di T , si hanno **3 regioni di funzionamento**

- ◆ **congelamento**: parziale ionizzazione
- ◆ **estrinseca**: normale funzionamento, portatori maggioritari pari al drogaggio
- ◆ **intrinseca**: n_i più grande del drogaggio, $n \approx p \approx n_i$



■ Per del Si a 300 K drogato con $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, si ha $n_i = 1.45 \times 10^{10} \ll N_D$

■ Le concentrazioni di portatori liberi valgono

$$n \approx N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \quad p \approx \frac{n_i^2}{N_D} = 2.1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

■ Le cariche mobili dello stesso tipo del drogaggio si chiamano **portatori di maggioranza**, le altre **portatori di minoranza**

Livello di Fermi

Il livello di Fermi può essere calcolato per una verifica di consistenza

- **Consideriamo un semiconduttore di tipo n , drogato con N_D atomi donatori**
- **A $T = 300\text{ K}$, in equilibrio termodinamico si ha $n = N_D$ e quindi dall'approssimazione di Boltzmann**

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right) \approx N_D$$

si ricava la posizione del livello di Fermi

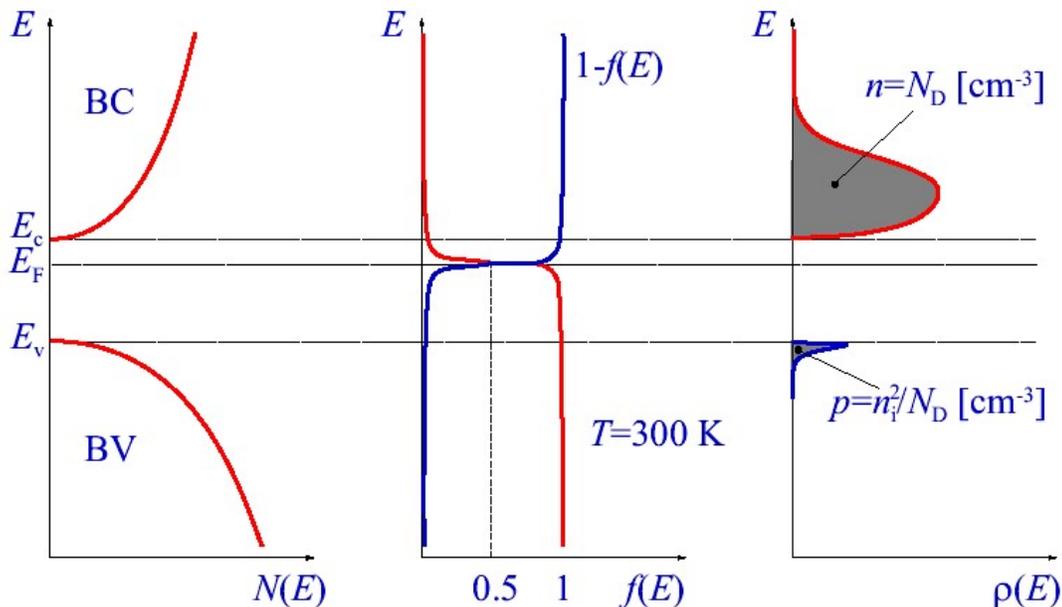
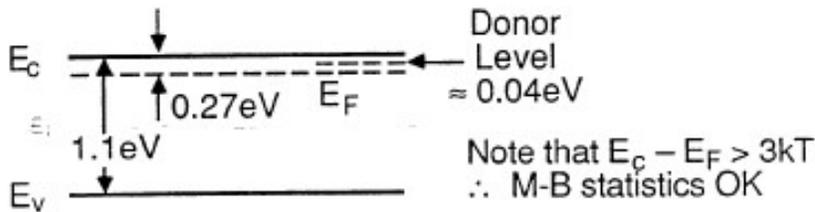
$$E_F = E_c - k_B T \ln \frac{N_c}{N_D}$$

Example: Si doped with $10^{15}/\text{cm}^3$ Phosphorus

$$n \equiv 10^{15}/\text{cm}^3 \quad \mathbf{N_c = 2.8 * 10^{19}}$$

$$p \equiv n_i^2 / N_D \equiv 2.25 \times 10^5 / \text{cm}^3$$

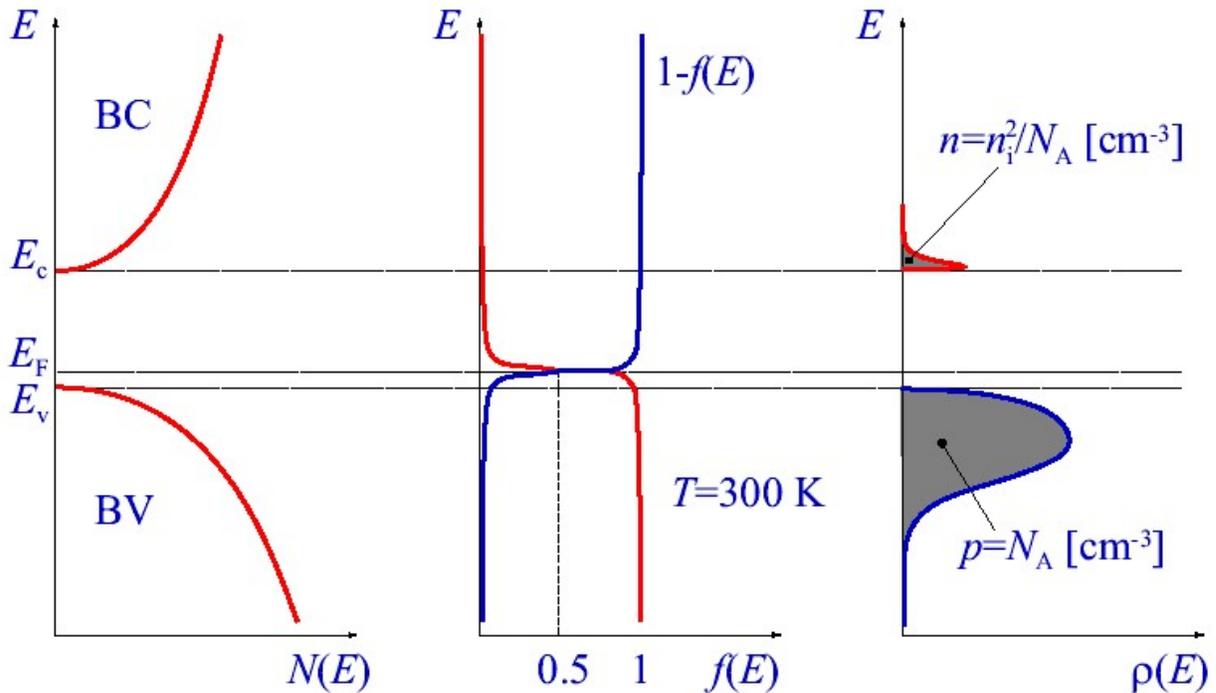
$$E_c - E_F \equiv 0.27\text{ eV}$$



Solo in equilibrio termodinamico

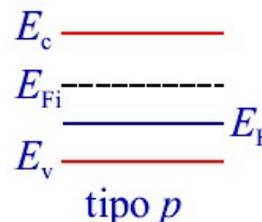
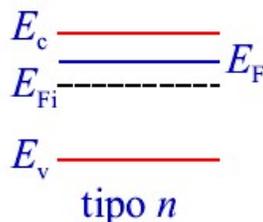
- Analogamente, per un semiconduttore tipo p con drogaggio N_A il livello di Fermi soddisfa

$$E_F = E_v + k_B T \ln \frac{N_v}{N_A}$$



Solo in equilibrio termodinamico

- Si può concludere che un semiconduttore è non degenere se il livello di drogaggio è inferiore alla corrispondente densità efficace degli stati al minimo della BC (N_C) o al massimo della BV (N_V)



Per il silicio:

$$N_c = 2.8 \cdot 10^{19}$$

$$N_v = 1.04 \cdot 10^{19}$$

Summary For Shallow Impurities

- Assumptions: 1) Complete impurity ionization
 2) Thermal equilibrium

A) Charge neutrality: $n - p + N_A - N_D = 0$

B) Equilibrium: $np = n_i^2$

C) Fermi-Dirac Distribution: $f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}}$

D) Maxwell-Boltzmann Distribution:
 Valid for $E - E_i \geq 3kT$ $f(E) = e^{-(E-E_F)/kT}$

E) Carrier Concentrations: $n = n_i e^{\frac{(E_F - E_i)}{kT}}$
 $p = n_i e^{\frac{(E_i - E_F)}{kT}}$

F) Extrinsic Semiconductors

$n_n = N_D$	$n_p = n_i^2 / N_A$
$p_n = n_i^2 / N_D$	$p_p = N_A$
$E_F - E_C = -kT \ln \frac{N_C}{N_D}$	$E_F - E_V = kT \ln \frac{N_V}{N_A}$
$E_F - E_i = kT \ln \frac{n}{n_i}$	$E_i - E_F = kT \ln \frac{p}{n_i}$
 N TYPE	 P TYPE

Fenomeni di trasporto di carica

Il comportamento dei dispositivi elettronici dipende dal movimento dei portatori nel cristallo di semiconduttore. Conosciamo il modo di calcolare il numero dei portatori, adesso ci concentriamo sui meccanismi che ne determinano il movimento da una regione di semiconduttore a un'altra.

Movimento casuale e velocità termica

In condizioni di equilibrio termodinamico gli elettroni hanno un moto casuale che implica una **corrente netta nulla**, con una velocità calcolabile da considerazioni di meccanica statistica

Energia cinetica = Energia termica

Il **principio di equipartizione dell'energia** dice che ad ogni grado di libertà della particella in equilibrio col sistema è associata un'energia di $\frac{1}{2}kT$

$$\frac{1}{2} m_e^* v_{th}^2 = \frac{3}{2} kT$$

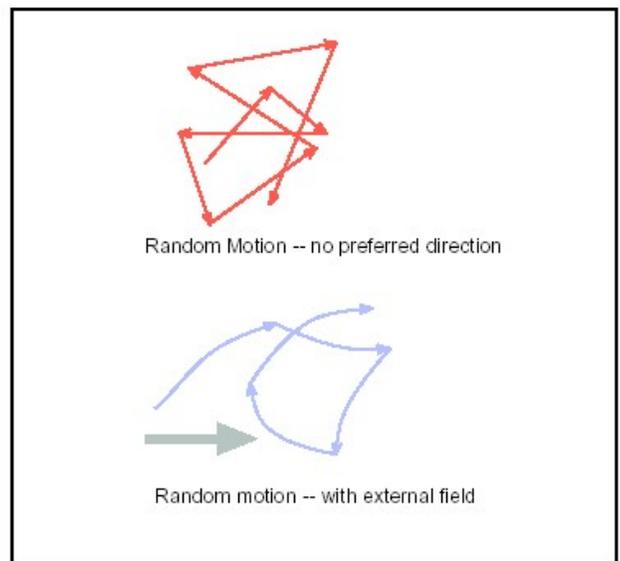
da cui $v_{th} \cong 10^7$ cm/s

(velocità termica)

Considerando una distanza media (**libero cammino medio**) percorsa tra due urti pari a $100\text{\AA} \div 1 \mu\text{m}$, si ha che il tempo medio corrispondente (**tempo di volo**) vale:

$$\tau_m \cong \frac{10^{-5} \text{ cm}}{10^7 \text{ cm/sec}} \cong 1 \text{ psec} \rightarrow 10^3 \text{ GHz!}$$

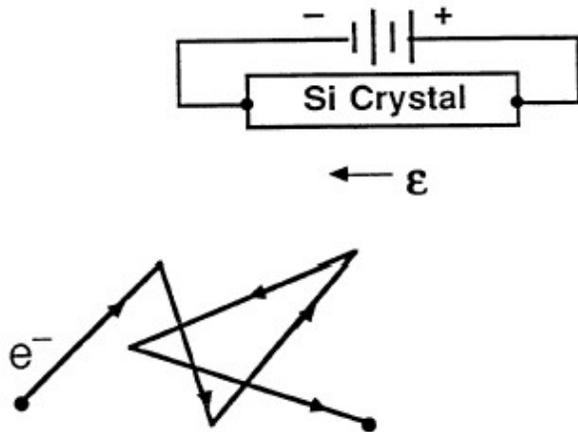
Invece: In presenza di un campo elettrico il moto risulta uniformemente accelerato a tratti da un punto di vista microscopico, ma in media si osserva una **“deriva” (drift)** responsabile del passaggio di corrente



Collisions without and with electric field

Velocità di trascinamento (drift) → movimento guidato dal campo elettrico

Supponiamo di applicare un campo elettrico al cristallo



Il movimento di elettroni è *in media* in direzione opposta al campo elettrico: tale processo è detto deriva o drift.

La velocità di drift è ricavabile a partire dall'**equazione quasi classica**

$$F_{ext} = \frac{dp}{dt} \rightarrow -q\mathcal{E} = m^* \frac{dv}{dt}$$

Se si definisce un tempo di collisione τ_c si ottiene integrando

$$v = -\frac{q\tau_c}{m^*} \mathcal{E}$$

per cui la velocità risulta proporzionale al campo e si definisce **mobilità** la costante relativa

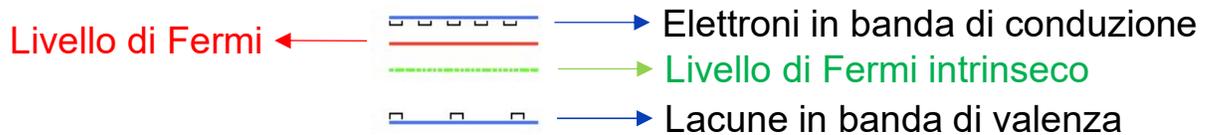
$$\begin{aligned} v_n &= -\mu_n \mathcal{E} \\ v_p &= \mu_p \mathcal{E} \end{aligned}$$

Osservazioni

- Le “collisioni” (interazioni che modificano la traiettoria dei portatori) limitano la massima velocità che i portatori possono acquisire, quindi le prestazioni in frequenza
- La mobilità misura la “libertà” che i portatori hanno di muoversi

Diagramma a bande, potenziale e campo elettrico

- L'energia degli elettroni è costituita di 3 termini:
 - Energia interna (dovuta al potenziale periodico che determina la struttura delle bande)
 - **Energia potenziale di tipo elettrostatico fornita dai campi esterni**
 - Energia cinetica
- **Diagramma a bande di semiconduttore drogato n** senza applicazione di campi elettrostatici



- Applico una differenza di potenziale (campo): l'effetto è che un **potenziale elettrostatico** viene *sommato* alla **struttura a bande**. Mettiamoci sul fondo della banda di conduzione, per vederlo.

$$E_c(x) = E_c^o + U(x) \quad \text{Per } E=E_c \text{ non ho energia cinetica}$$

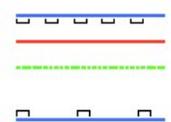
$$V(x) = -\frac{1}{q}U(x) \quad \text{Il potenziale } V \text{ si indica a volte con } \Phi \text{ (phi)}$$

- Dal nuovo diagramma a bande è pertanto immediatamente visualizzabile l'andamento del potenziale (che ha verso opposto rispetto all'energia in eV, ma stesso valore numerico).

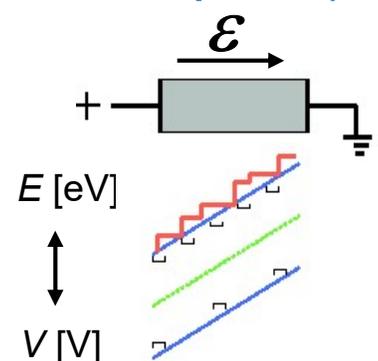
• Piegamento di bande e DRIFT

- L'applicazione di un potenziale esterno costante ad un semiconduttore omogeneo uniformemente drogato provoca lo spostamento (lineare) delle bande
- Gli elettroni – che partono avendo solo energia potenziale - si muovono verso regioni a energia inferiore acquisendo energia dal campo. Acquiscono E_{cin} e si muovono in orizzontale nel gradino rosso. Poi perdono energia per collisioni e tornano ad avere solo en. potenziale. E così via, percorrendo la scala rossa. Alla fine arrivano in fondo e quindi portano corrente.
- L'energia viene rilasciata al reticolo sotto forma di collisioni (fononi)

SENZA CAMPO
(all'equilibrio
Termodinamico,
ovvero k fisso)



CON CAMPO
(non siamo
all'equilibrio)

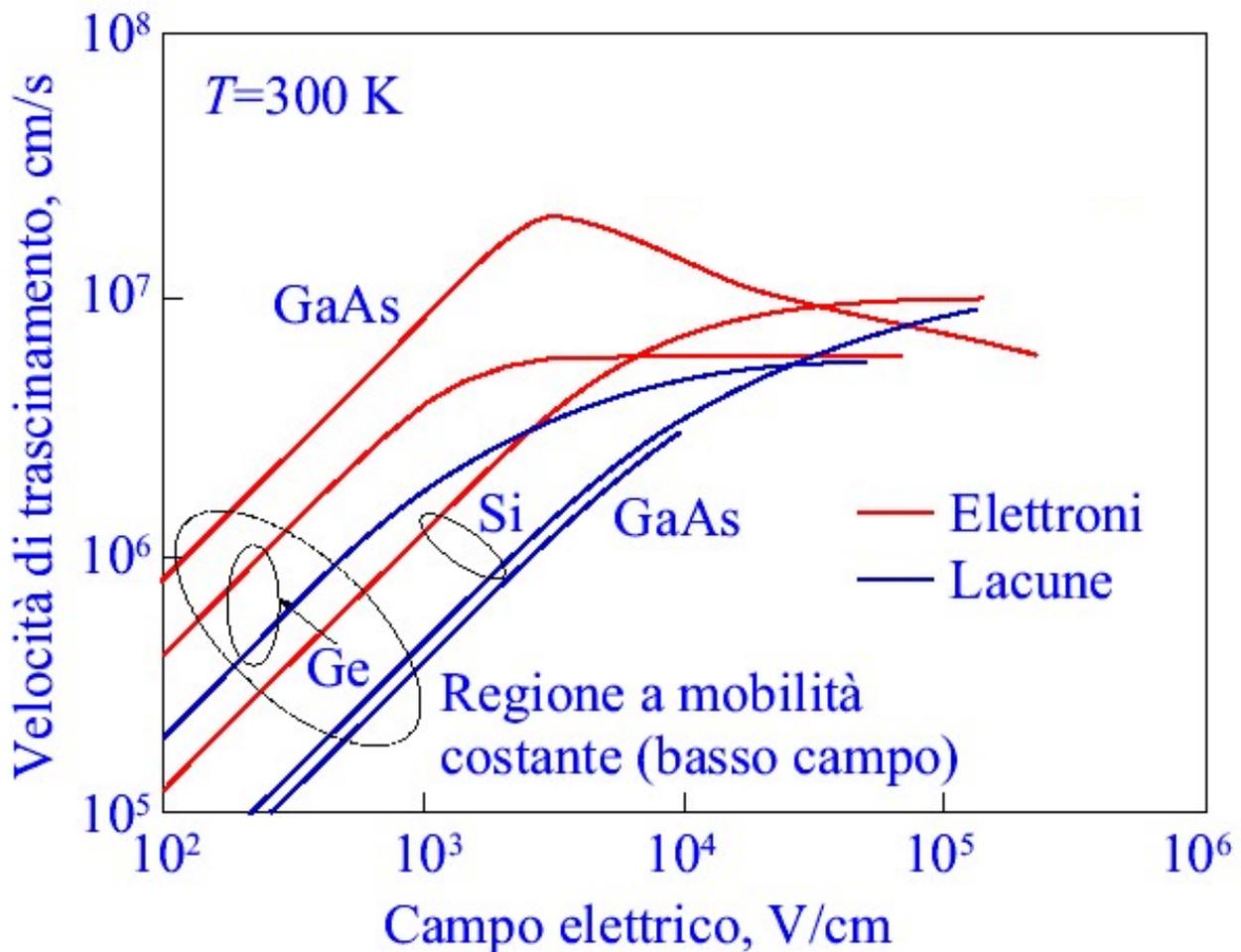


Mobilità

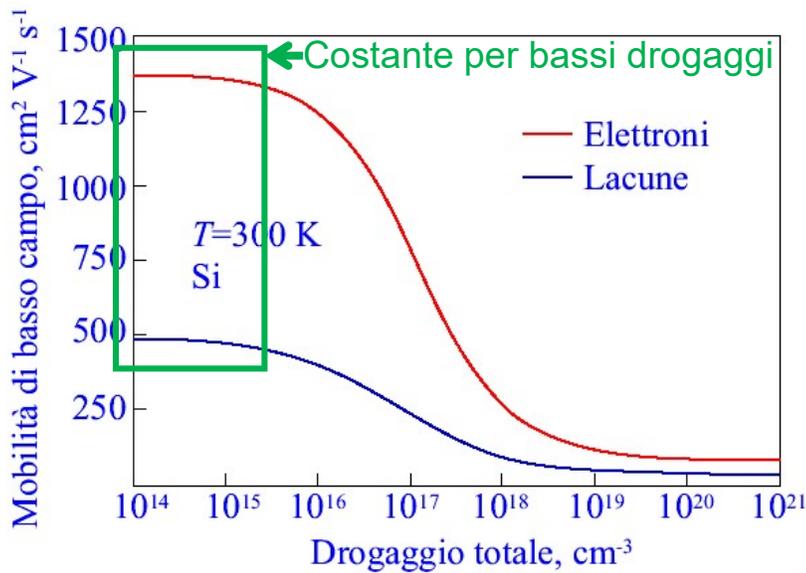
- ◆ μ è costante per campi elettrici molto piccoli: il valore per $\mathcal{E} \rightarrow 0$ viene detto **mobilità di basso campo** μ_0
- ◆ Per campi molto elevati, v tende ad una costante, la **velocità di saturazione**, tipicamente dell'ordine di 10^7 cm/s

$$v_n = -\mu_n \mathcal{E} \quad \text{Elettroni}$$

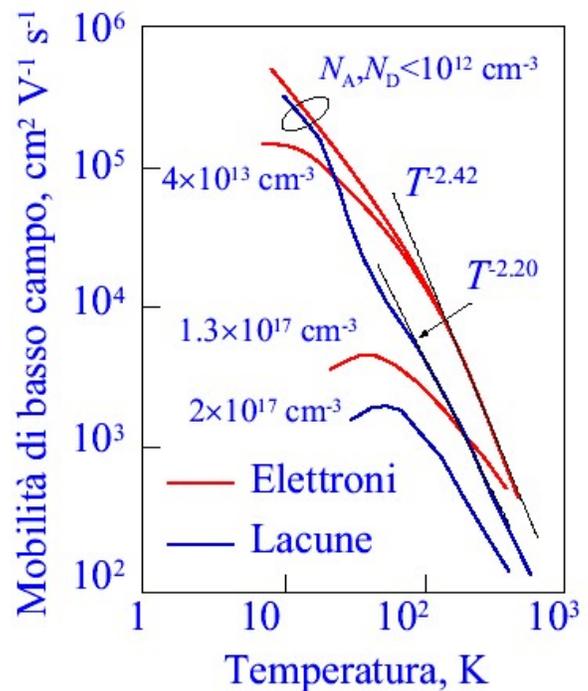
$$v_p = \mu_p \mathcal{E} \quad \text{Lacune}$$



Curve mobilità-drogaggio e mobilità temperatura per il silicio



Al di sopra della temperatura ambiente (300 K) la mobilità di basso campo diminuisce al crescere di T



Conducibilità

- La **densità di corrente** $J = I/A$ [A/cm^2] vale $J = \sigma \mathcal{E}$, dove σ è la **conducibilità elettrica** dovuta agli elettroni liberi di mobilità μ_n :

$$\sigma = qn\mu_n$$

- In un campione in cui vi siano anche p lacune per unità di volume di mobilità μ_p :

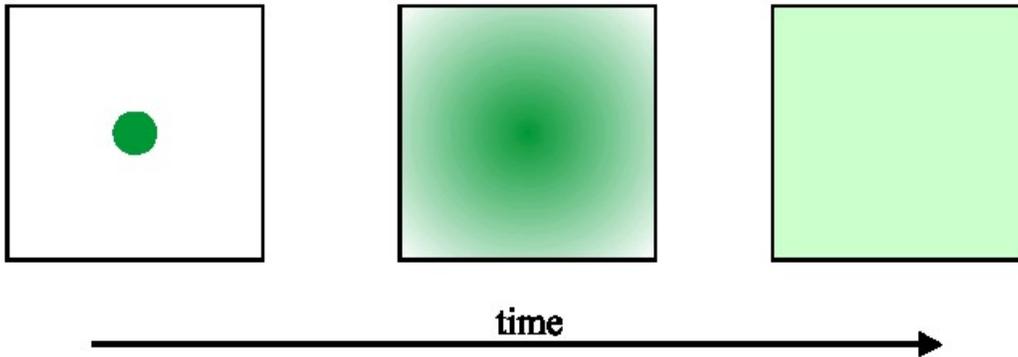
$$J = J_{\text{el}} + J_{\text{lac}} = qn\mu_n \mathcal{E} + qp\mu_p \mathcal{E}$$

e quindi:

$$\sigma = qn\mu_n + qp\mu_p$$

Diffusione → movimento guidato dal gradiente

- Il processo fisico di **diffusione** è il movimento **casuale** di particelle sotto l'influenza di un gradiente di concentrazione.
- Le particelle si muovono in modo da **ridurre il gradiente di concentrazione**, ovvero da una regione a più alta concentrazione verso una regione a concentrazione inferiore.

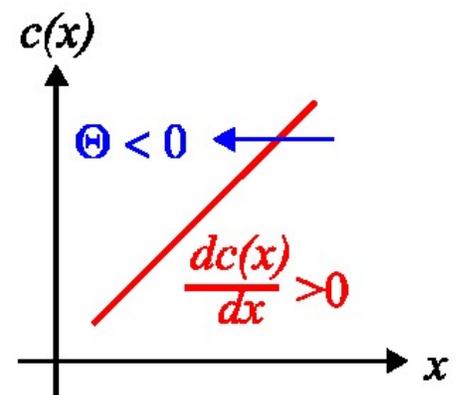


- Nel contesto del trasporto di carica riguarda elettroni e lacune, dando luogo alle **correnti di diffusione**
- La diffusione viene sfruttata nella tecnologia dei semiconduttori per introdurre **impurezze droganti** nel cristallo.

Flusso di diffusione

- Il flusso, o flusso di particelle, è dato dalla **legge di Fick**:

$$\Theta = -D \frac{dc(x)}{dx}$$



dove Θ è il flusso per unità di area [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$], D è il coefficiente di diffusione [cm^2s^{-1}] e c la concentrazione [cm^{-3}].

- Il segno - rende conto del movimento nel verso di minor concentrazione.
- D è una misura della facilità di movimento delle particelle e **dipende fortemente dalla temperatura**. Si può dimostrare che $D = \langle x \rangle^2 / 2t$ ove t è il tempo di diffusione e $\langle x \rangle$ è il raggio medio percorso dalla particella.

Diffusione di elettroni e lacune

- La diffusione di elettroni e lacune in una dimensione dà luogo alle seguenti componenti di densità di corrente

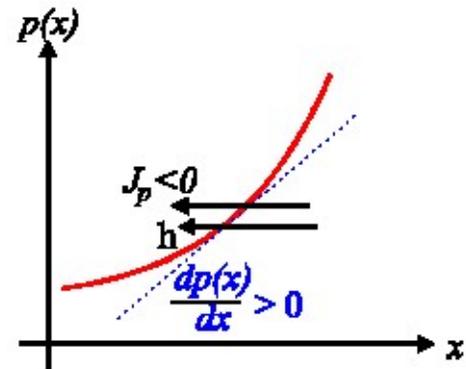
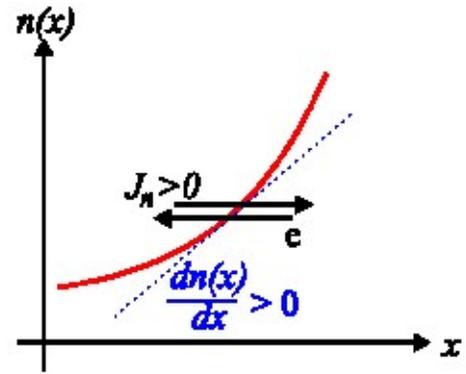
$$J_{n,diff} = qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

$$J_{p,diff} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

- I coefficienti di diffusione di elettroni e lacune D_n e D_p possono essere espressi in funzione delle rispettive mobilità dalla **relazione di Einstein**: $D=(kT/q) \cdot \mu$ per cui

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad D_p = \frac{kT}{q} \mu_p$$

Dip da τ_c , m^* e dalla temperatura. Quindi D non è lineare con la temperatura



Quest'ultima relazione può essere ricavata a partire dalla definizione di p ed n all'equilibrio (risultato della statistica) e dalle **equazioni di trasporto** che per definizione all'equilibrio sono nulle.

Equazioni di trasporto

Dal modello drift-diffusione nascono le equazioni di trasporto:

$$\begin{aligned} J_p &= qp\mu_p E(x) - qD_p \nabla p \\ J_n &= qn\mu_n E(x) + qD_n \nabla n \end{aligned}$$

e la densità di corrente totale J_T , non tenendo conto della corrente di spostamento $\epsilon(\partial E/\partial t)$, vale:

$$J_T = J_p + J_n$$

Densità di portatori in semiconduttori non omogenei / non uniformi

- All'equilibrio termodinamico, in **semiconduttori non omogenei** (es. in presenza di giunzioni pn) o **non uniformemente drogati** (caso più comune nei dispositivi) esiste un campo elettrico non nullo che contrasta la diffusione in modo che la corrente dei singoli portatori sia zero

– Ad esempio dalla relazione $J_p \equiv 0$

$$0 = q\mu_p p \mathcal{E} - qD_p \frac{dp}{dx} \quad \text{Sostituendo la relazione} \quad \mathcal{E} = -\frac{d\phi}{dx}$$

$$\text{si ha} \quad -\mu_p p \frac{d\phi}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\mu_p}{D_p} d\phi + \frac{dp}{p} = 0$$

$$d\left(\frac{\mu_p}{D_p} \phi + \ln p\right) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\mu_p}{D_p} \phi + \ln p = \text{costante} = \ln p_0$$

Un procedimento simile vale per gli elettroni, ne conseguono così le relazioni

$$p(x) = p(x_0) e^{\frac{\phi(x) - \phi(x_0)}{kT/q}}$$

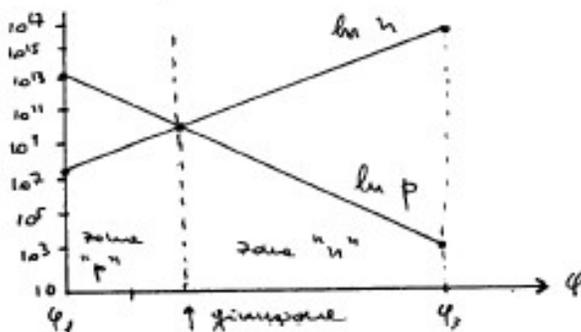
$$n(x) = n(x_0) e^{\frac{\phi(x) - \phi(x_0)}{kT/q}}$$

Notare che $pn = n_i^2$

Esempio: trovare la concentrazione di elettroni in un punto dove si ha una d.d.p. di 0.6 V rispetto ad un altro nel quale la concentrazione di lacune vale 10^{13} cm^{-3} in silicio a temperatura ambiente

$$p(x_1) = 10^{13} \Rightarrow n(x_1) = \frac{n_i^2}{p(x_1)} = \frac{(1.45 \cdot 10^{10})^2}{10^{13}} = 2.1 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$$

$$n(x_2) = n(x_1) e^{\frac{\phi_2 - \phi_1}{kT/q}} = 2.1 \cdot 10^7 e^{0.6 / (26 \cdot 10^{-3})} = 2.6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$



Si trova in presenza di una "giunzione p-n". Si osserva che con 0.6 V $\begin{cases} N_D > 10^{17} \\ N_A > 10^{13} \end{cases}$

Semiconduttore fuori equilibrio

■ La condizione di **equilibrio termodinamico** corrisponde all'**assenza di qualunque scambio energetico con l'esterno**

■ Qualunque dispositivo elettronico opera in regime di non equilibrio, dovendo dar luogo a trasformazioni di energia elettrica

■ **Simbologia:**

◆ se tipo n : n_n, p_n ; se tipo p : n_p, p_p

◆ in equilibrio termodinamico: $n_{n0}, p_{n0}, n_{p0}, p_{p0}$

◆ concentrazione intrinseca: $n_i = p_i$

■ Fuori dall'equilibrio termodinamico, le concentrazioni differiscono dal valore di equilibrio

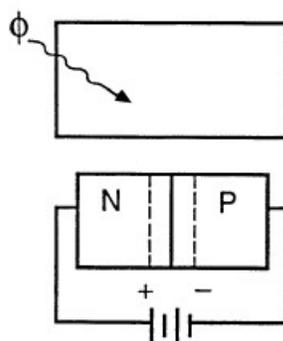
■ Si definiscono le **concentrazioni in eccesso**:

$$\begin{cases} n'_n = n_n - n_{n0} \\ p'_n = p_n - p_{n0} \end{cases} \quad \begin{cases} n'_p = n_p - n_{p0} \\ p'_p = p_p - p_{p0} \end{cases}$$

■ Se $n', p' > 0$ si ha il fenomeno della **iniezione**, se $n', p' < 0$ si ha il fenomeno dello **svuotamento**

■ L'ipotesi di **quasi neutralità** implica $n' \approx p'$

Nota: la condizione di equilibrio si esprime come $pn = n_i^2$



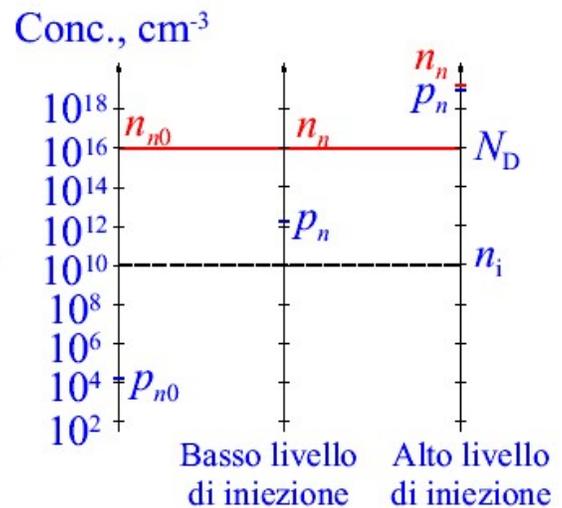
Injection: extra carriers provided by light or electrically
 $n_p > n_i^2$

Extraction: carriers removed electrically
 $n_p < n_i^2$

Livello di iniezione

■ **Campione di Si drogato n**
con $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

■ **Basso livello di iniezione:**
corrisponde a $n'_n, p'_n \ll N_D$;
solo i portatori minoritari
“sentono” le variazioni di
conc., mentre $n_n \approx N_D$



■ **Alto livello di iniezione:** corrisponde a
 $n'_n, p'_n \geq N_D$; entrambi i tipi di portatori
“sentono” le variazioni di concentrazione

Variazioni di concentrazione

■ **Le concentrazioni di portatori sono, in generale, funzione della posizione e del tempo**

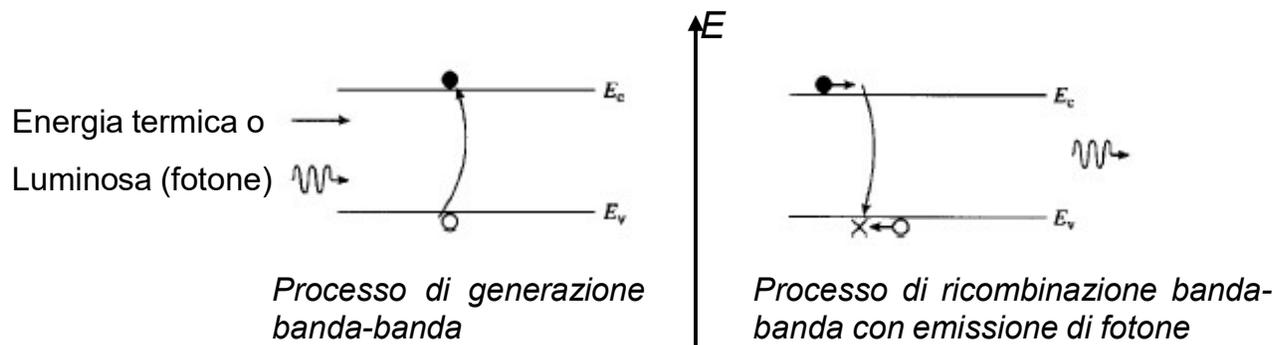
$$n = n(x, t), \quad p = p(x, t) \quad \text{caso 1D}$$

■ **Le loro variazioni dipendono da:**

- ◆ moto di cariche per **diffusione**: corrente di diffusione
- ◆ moto di cariche per **trascinamento** (effetto di \mathcal{E}):
corrente di trascinamento
- ◆ **corrente di spostamento dielettrico**: solo in presenza di
campi tempo-varianti a frequenze molto elevate
- ◆ fenomeni di **generazione e ricombinazione** (GR)

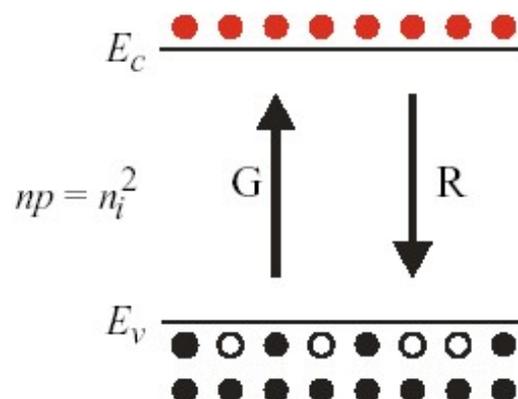
Generazione e Ricombinazione di portatori

- Sono i fenomeni che determinano eventi di **creazione** e **distruzione** (annichilazione) di portatori liberi che influenzano in modo **indiretto** il flusso di corrente nei semiconduttori, in quanto intervengono sulle concentrazioni dei portatori coinvolte nei processi di deriva e diffusione.
- Riguardano pertanto le transizioni dei portatori tra le bande di valenza e di conduzione
 - **Generazione**: è la transizione di un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione, con conseguente creazione di una lacuna in banda di valenza. E' associata ad un **assorbimento** di energia (termica o luminosa)
 - **Ricombinazione**: è la transizione di un elettrone dalla banda di conduzione alla banda di valenza con "annichilazione" di una lacuna in banda di valenza (equivalente al riempimento di un orbitale). E' associata ad un' **emissione** di energia (termica o luminosa).



Processi di GR ed equilibrio termodinamico

- I due processi sono sempre presenti, ma all'equilibrio si bilanciano esattamente: dal punto di vista quantitativo si ha l'equivalenza con la condizione $np = n_i^2$



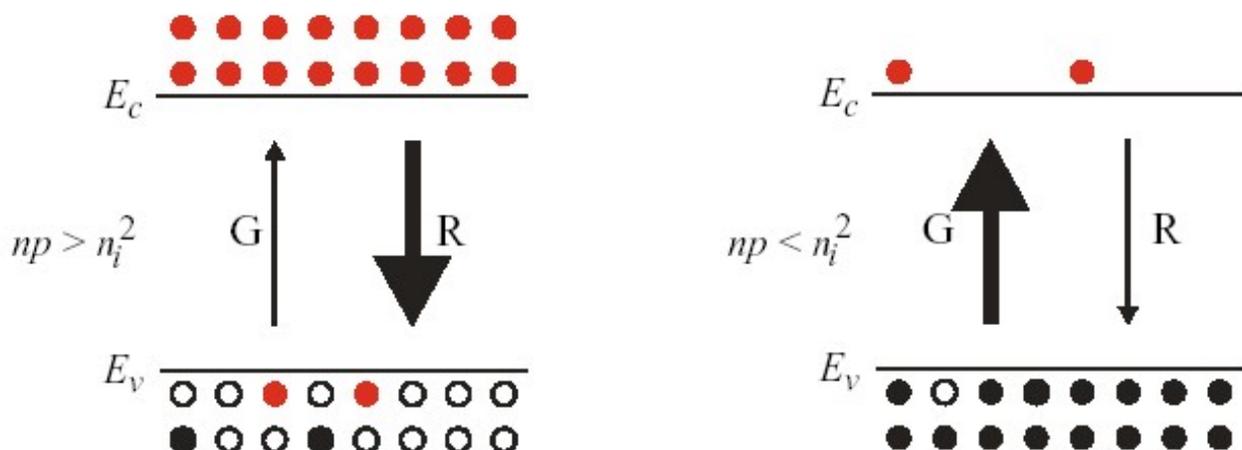
■ Per caratterizzare i fenomeni di GR si usano:

- ◆ il **tasso** o **velocità di generazione** G , ovvero il numero di portatori generati per unità di tempo e volume
- ◆ il **tasso** o **velocità di ricombinazione** R , ovvero il numero di portatori ricombinati per unità di tempo e volume

Tasso netto di ricombinazione

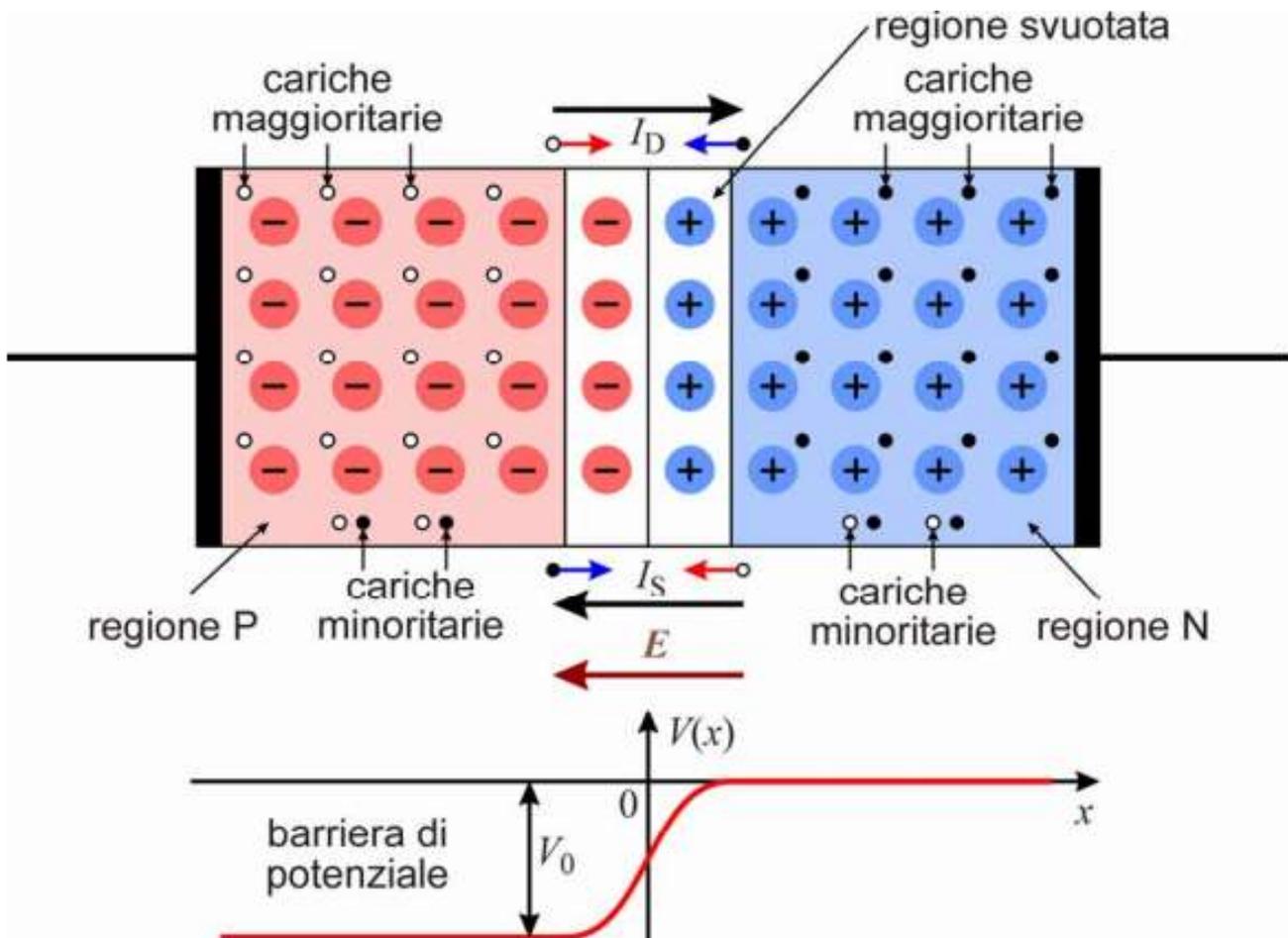
- Si definisce $U \equiv R - G$ il tasso netto di ricombinazione che risulta proporzionale al termine $pn - n_i^2$ (che infatti è zero all'equilibrio)
- All'equilibrio termodinamico $U = 0$
 - Nota: nella definizione di U , il termine G comprende solo la generazione termica, in quanto la presenza di quella ottica porta il sistema fuori equilibrio.
- Se prevale la ricombinazione ($U > 0$) il semiconduttore è in condizione di **iniezione** perché $pn > n_i^2$, e il dispositivo è percorso da correnti significative. La ricombinazione agisce in modo da ridurre (se possibile) nel tempo le concentrazioni di portatori in eccesso.
- Se prevale la generazione ($U < 0$), il semiconduttore è in condizione di **svuotamento** e le correnti associate sono normalmente trascurabili. La generazione agisce in modo da aumentare (se possibile) nel tempo le concentrazioni di portatori in difetto.

I processi di GR agiscono in modo da riportare il sistema all'equilibrio e contrastano le variazioni di concentrazione dei portatori indotte dalla polarizzazione



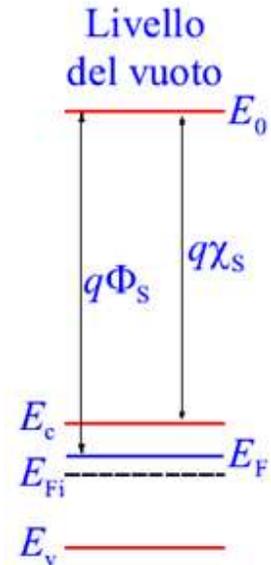
Applicazione: La giunzione p-n (principio del diodo)

- Una **giunzione p-n** viene realizzata creando all'interno di un cristallo semiconduttore una regione drogata di tipo p (atomi **accettori**) e una di tipo n (con atomi **donatori**).
- Dato che nelle due regioni le densità di portatori di carica sono diverse nasce una **corrente di diffusione** creando una **regione svuotata** di portatori con i soli ioni dove il campo elettrico determina una corrente di drift uguale e contraria all'equilibrio termodinamico



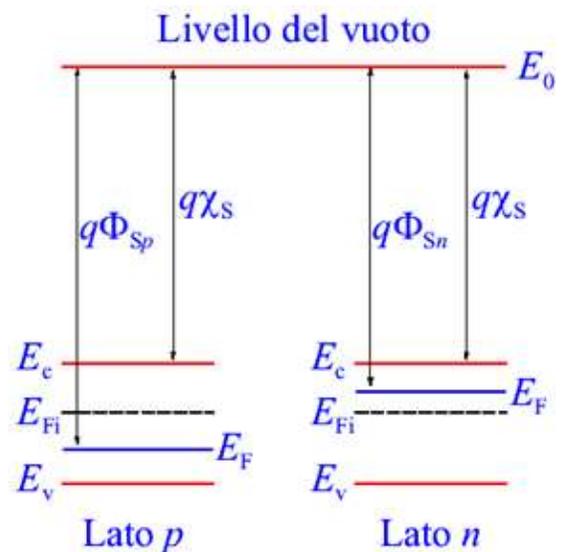
Diagrammi a bande all'equilibrio termodinamico (1)

- Un **diagramma a bande** è una rappresentazione dell'energia potenziale cui sono sottoposte le cariche libere
- I parametri più importanti sono:
 - ✓ L'**affinità elettronica**, la quantità che in figura è indicata con $q\chi_s$, pari alla distanza tra il livello del vuoto e il bordo della banda di conduzione, nel silicio pari a 4.05 eV.
 - ✓ La **funzione lavoro** (altrimenti detta Lavoro di estrazione), che è invece pari alla distanza tra il livello del vuoto e il livello di Fermi. Il senso fisico di questa quantità è quello della minima energia che occorre fornire al sistema per estrarre da esso un elettrone.



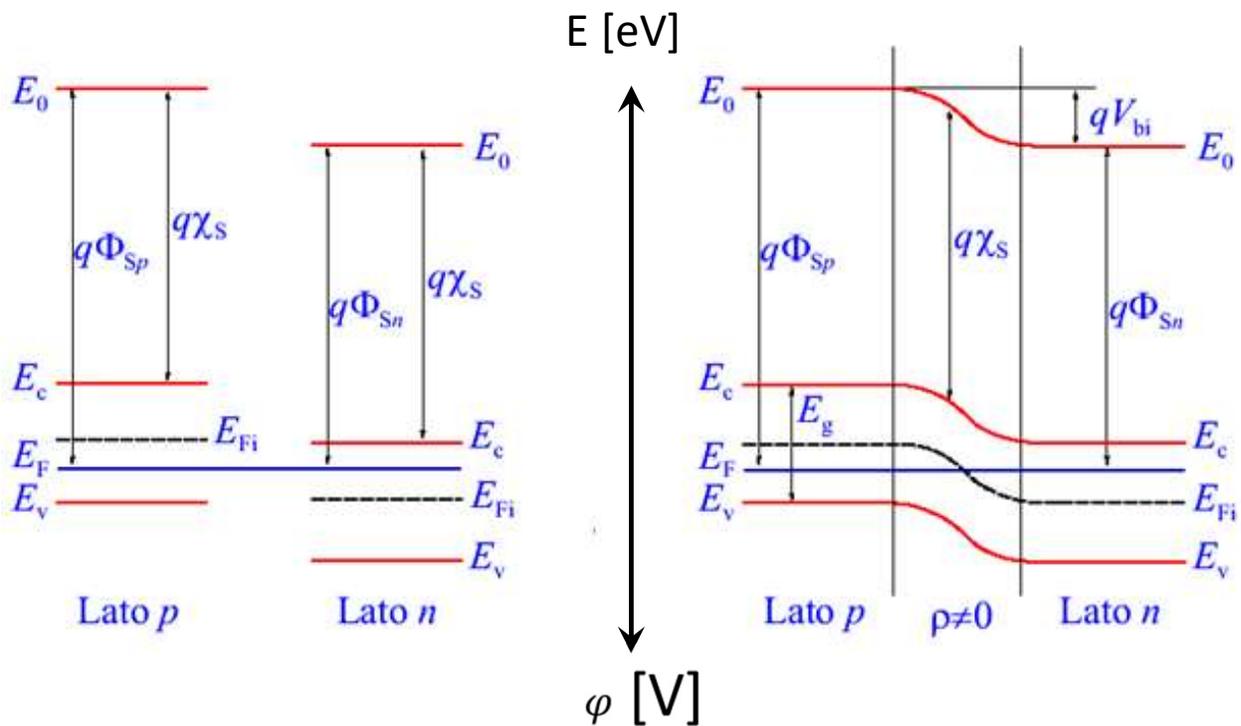
- Si costruisce prima il diagramma a bande dei due lati come se fossero isolati

- ✓ L'affinità elettronica è la stessa nei due lati
- ✓ La funzione lavoro è maggiore dal lato p, implicando che, a contatto, parte degli elettroni del lato n si trasferiscano dal lato p (e viceversa per le lacune della regione p), coerentemente con le precedenti considerazioni sulla diffusione.



Diagrammi a bande all'equilibrio termodinamico (2)

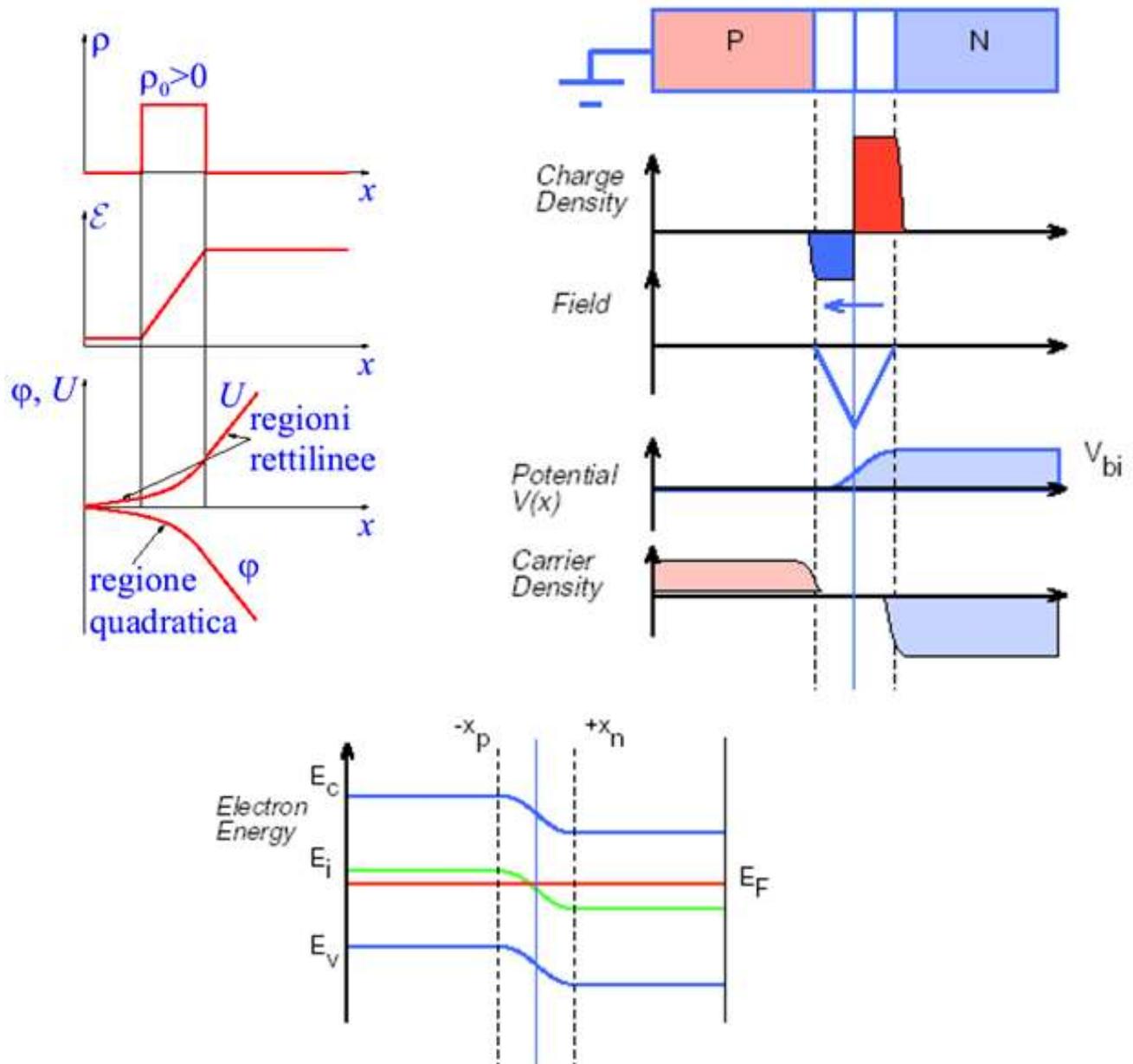
- Il diagramma a bande complessivo si costruisce sulla base di precise **regole**:
 - ✓ Il **livello di Fermi è costante** nella struttura.
 - ✓ L'affinità elettronica e il gap sono **costanti**.
 - ✓ Lontano dalla giunzione il diagramma è **uguale a quello di ciascuno dei due lati preso isolatamente**.
 - ✓ Il livello del vuoto è **continuo**.



- A cavallo della giunzione metallurgica si stabilisce una regione di carica spaziale costituita essenzialmente da ioni fissi, mentre è svuotata di cariche libere (**regione di svuotamento**). Si instaura un **potenziale di contatto** V_{bi} (visibile dato dal piegamento delle bande)
- Lontano dalla giunzioni le regioni sono **neutre** (bande piatte, potenziale costante).

Legami tra densità di carica e bande

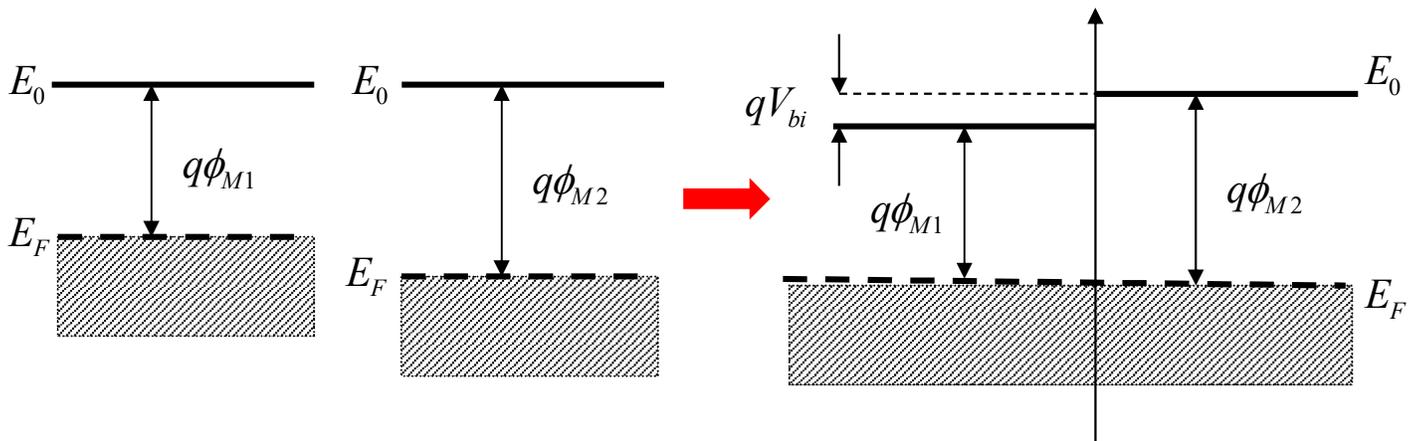
- ✓ In una regione neutra $\rho = 0 \Rightarrow \frac{dE}{dx} = 0 \Rightarrow E(x) = E_0$, quindi $\varphi(x) = -E_0x + \varphi_0$, ovvero $\varphi(x)$ è una retta
- ✓ L'energia potenziale che subiscono gli elettroni vale $U(x) = -q\varphi(x)$
- ✓ Si può concludere che nelle regioni neutre il diagramma a bande è rettilineo, e viceversa.
- ✓ Se la regione neutra ha campo elettrico nullo ($E_0 = 0$), le bande sono orizzontali (piatte), ovvero il potenziale è costante
- ✓ In una regione non neutra ($\rho \neq 0$) il campo elettrico E non è più costante e le bande non hanno più andamento lineare; se ρ è costante, il campo E varia linearmente e le bande avranno andamento parabolico.



Eterogiunzioni

- ✓ Interfacce tra materiali con diverso reticolo cristallino
 - Metallo-metallo
 - Metallo-isolante
 - Metallo-semiconduttore
 - Semiconduttore-semiconduttore
- ✓ Per studiarne le proprietà il primo passo è analogo a quello visto per la giunzione p-n
 - Disegno del diagramma a bande tenendo conto dei diversi lavori di estrazione

Eterogiunzioni metallo-metallo

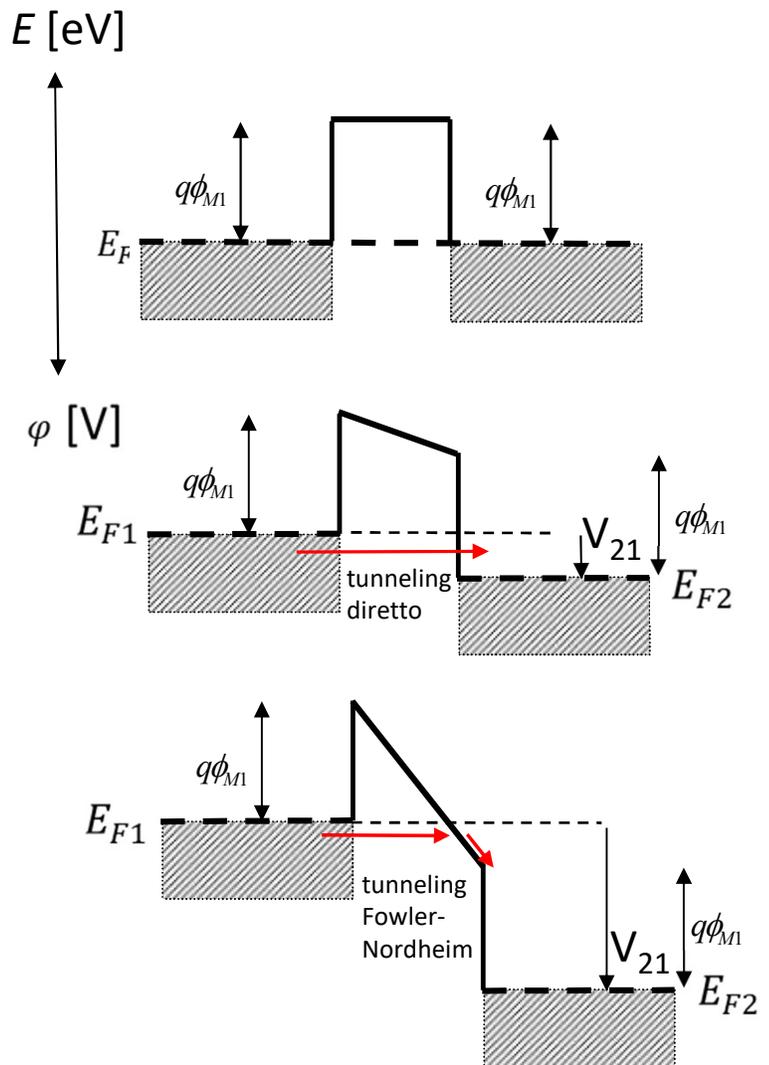


- Il contatto fa nascere una discontinuità alla giunzione in quanto i metalli sono equipotenziali (campo elettrico nullo) e le bande devono rimanere piatte
- Il **potenziale di contatto** V_{bi} è costante, per cui l'eterogiunzione non cambia caratteristica quando vi è passaggio di corrente (**contatto ohmico**). La proprietà di avere una variazione del potenziale può essere sfruttata per raffreddare giunzioni a scapito di altre che subiscono un riscaldamento.

Eterogiunzioni metallo-isolante-metallo

Esempio base: struttura con isolante tra due metalli identici

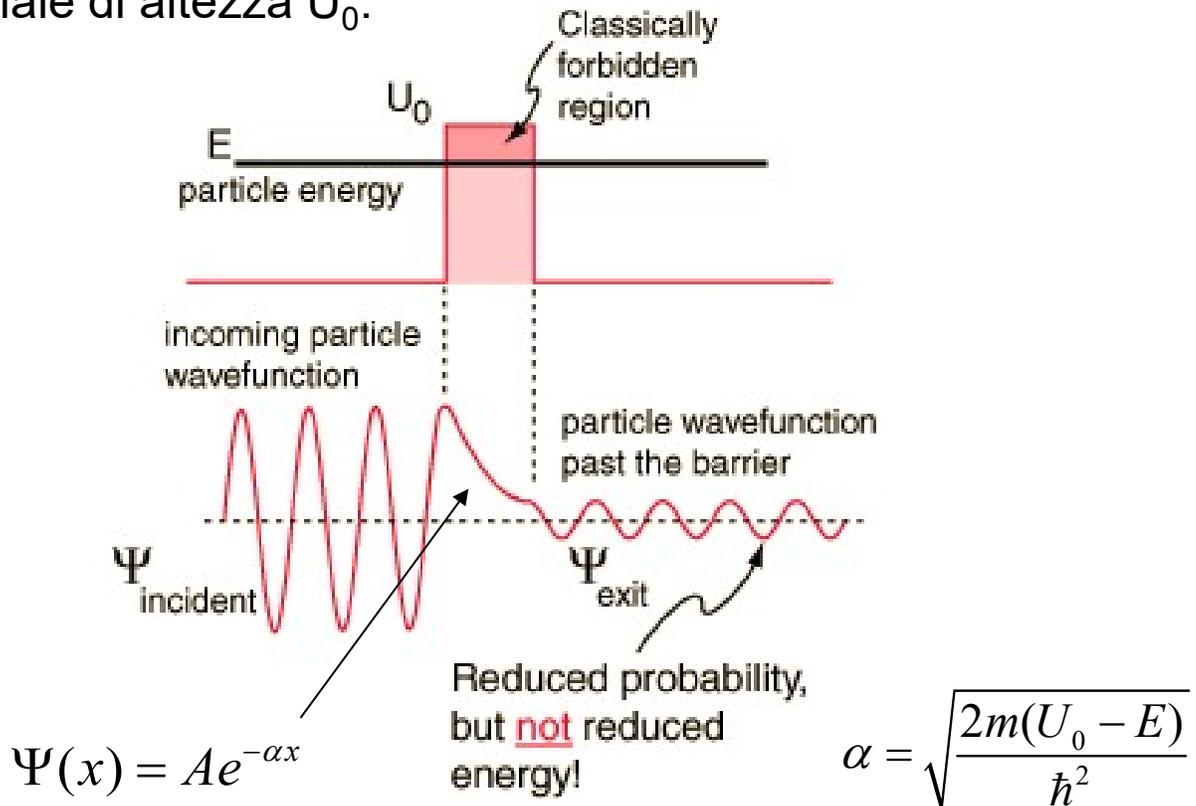
- All'equilibrio (livello di Fermi E_F costante) non si può avere corrente e si osserva la barriera di potenziale data dalla funzione lavoro
- Applicando una differenza di potenziale esterna si determinano 2 **quasi livelli di Fermi** con due possibili situazioni



1. una barriera «trapezoidale» per basse tensioni e tunneling diretto (come per l'STM, ma i metalli hanno due diverse funzioni lavoro)
2. una barriera «triangolare» per alte tensioni, che evidenziano il possibile tunneling detto Fowler-Nordheim (FN) (e maggiori correnti per la ridotta distanza)

RICHIAMO: effetto tunnel

Le differenze tra il comportamento quantistico e quello classico sono particolarmente evidenti se si considera una particella di energia E che incide contro una barriera potenziale di altezza U_0 .



Nel caso classico la particella riesce a superare la barriera potenziale solo se possiede un'energia $E > U_0$, altrimenti viene sempre riflessa.

Nel caso quantistico si ha sempre una parte trasmessa anche quando $E < U_0$ (*effetto tunnel*); viceversa se $E > U_0$ si ha sempre, in generale, una parte riflessa. Ciò non significa che la particella si divida fisicamente: la frazione trasmessa rappresenta la probabilità che, a seguito di un esperimento di misura, la particella trovata venga trovata oltre la barriera, mentre la frazione riflessa rappresenta la probabilità che venga trovata a sinistra della barriera; in ogni caso viene trovata intera!

Questo esempio illustra come la meccanica classica sia deterministica, mentre la meccanica quantistica è data in termini di "probabilità".

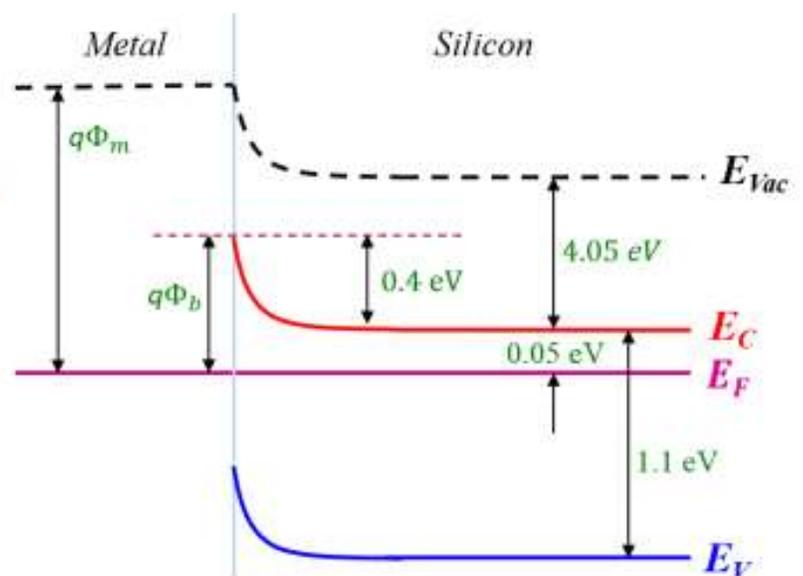
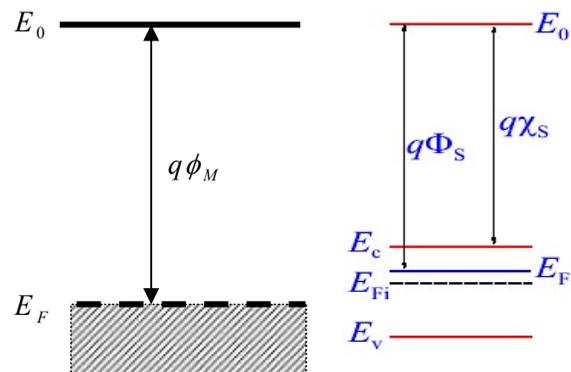
Eterogiunzioni metallo-semiconduttore

Possono formare

- giunzioni rettificanti (**diodi Schottky**)
- contatti ohmici

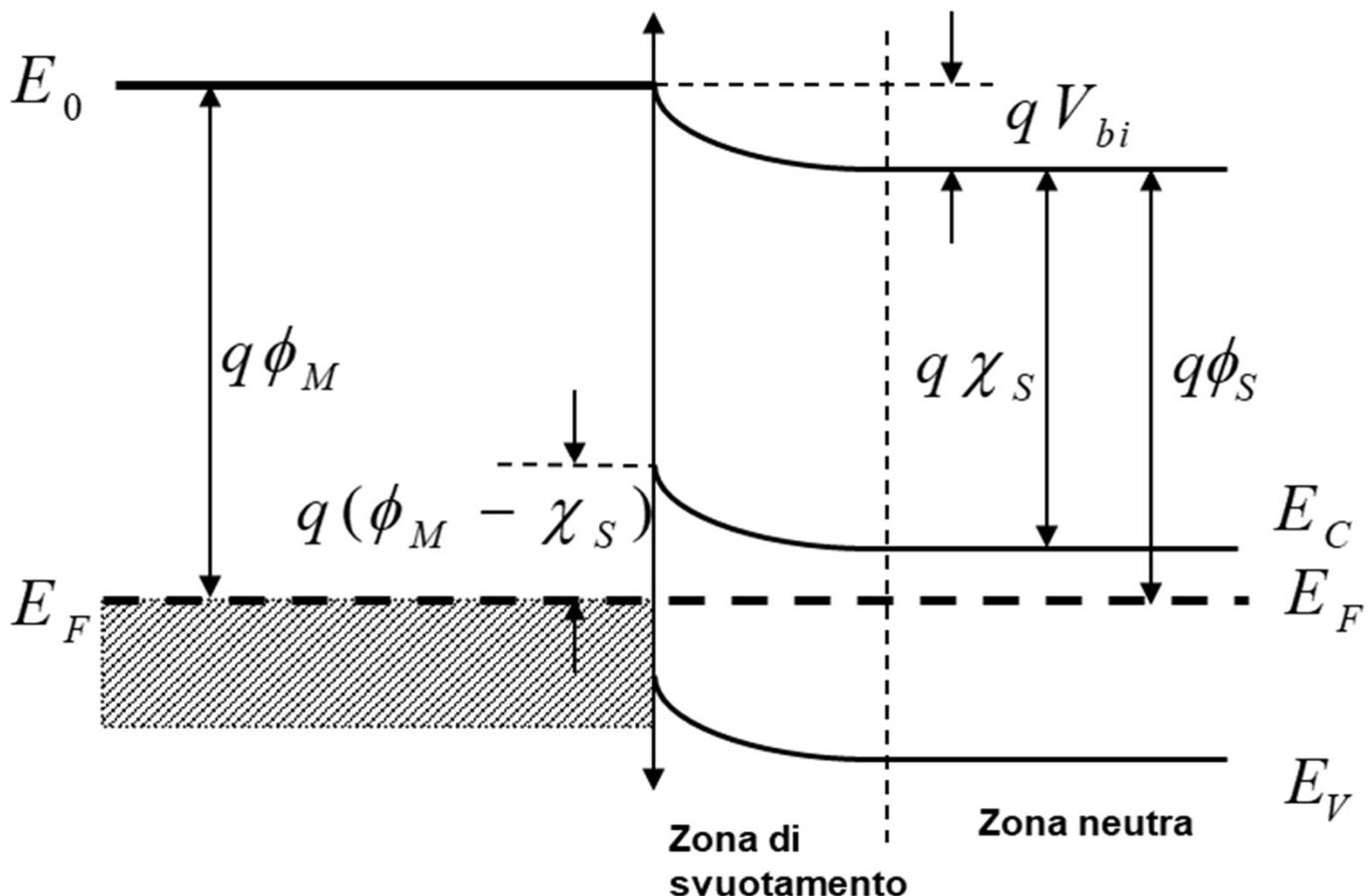
Diodi Schottky

- Il materiale con lavoro di estrazione minore tende a perdere elettroni a favore del materiale con il valore di ϕ maggiore.
- Se ad esempio come in figura si ha $\phi_M > \phi_S$, è il semiconduttore a cedere elettroni
 - Se allora il semiconduttore è di tipo n ci si aspetta un comportamento tipo diodo (a causa della regione di **svuotamento** che si viene a creare con la perdita di elettroni)



Osservazioni sul diodo Schottky

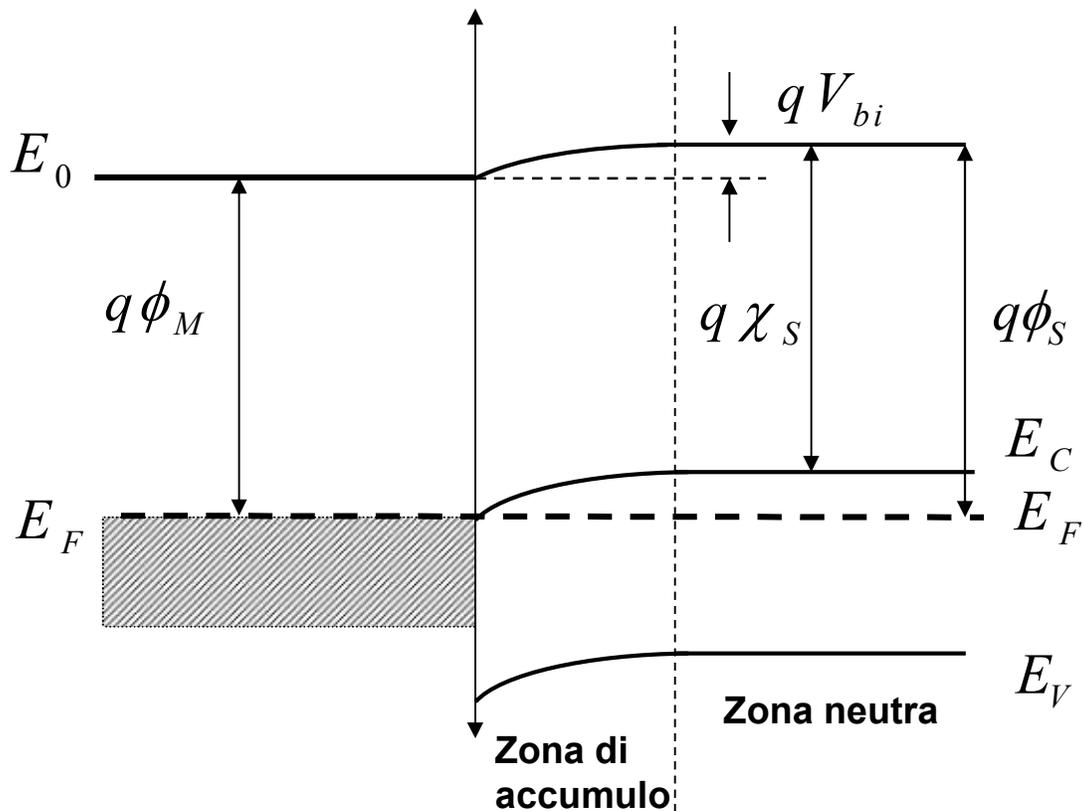
- Gli elettroni del metallo devono superare una barriera di potenziale di altezza $q(\phi_M - \chi_S)$, che non varia fuori equilibrio
- Gli elettroni del semiconduttore devono superare una barriera di potenziale di altezza $qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S)$, che, fuori equilibrio, varia con la tensione esterna applicata: $V_{bi} \rightarrow V_{bi} - V$
- La condizione di equilibrio si instaura quando i flussi di elettroni sono uguali e contrari: la corrente fuori equilibrio sarà di soli portatori **maggioritari** ovvero il dispositivo è **unipolare**.
- La zona di svuotamento è estesa solo nel semiconduttore (nel metallo il campo elettrico è nullo)



Contatto ohmico metallo-semiconduttore n

- Se si verificasse la condizione opposta sui lavori di estrazione, ovvero $\phi_M < \phi_S$, sarebbe il metallo a perdere elettroni: si crea allora una **zona di accumulo** (di dimensione inferiore rispetto a quella precedente di svuotamento) di portatori maggioritari, e non c'è ostacolo al passaggio di corrente.
- Il potenziale di contatto V_{bi} è pertanto analogo a quello dell'eterogiunzione metallo-metallo.

Questa situazione, però, nella pratica non esiste. **E' un diagramma teorico.**



In realtà **il contatto ohmico su regioni n si effettua tramite una zona molto drogata n^+ per la quale si ha una zona di svuotamento così sottile che consente il passaggio di elettroni per effetto tunnel** (contatto tunnel)