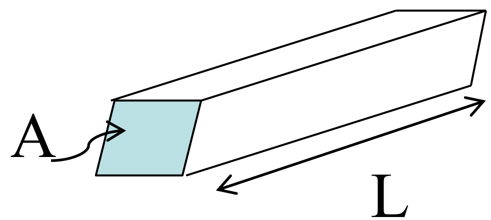
Cenni sull'elettronica dello stato solido

Resistività



- Consideriamo una barretta di un certo materiale, avente sezione A e lunghezza L.
- La sua resistenza, dalla seconda legge di Ohm, è:

$$R = \rho \, L / A$$

- ρ : Resistività. Si misura in: $\Omega \cdot \mathrm{cm}$

Classificazione dei materiali

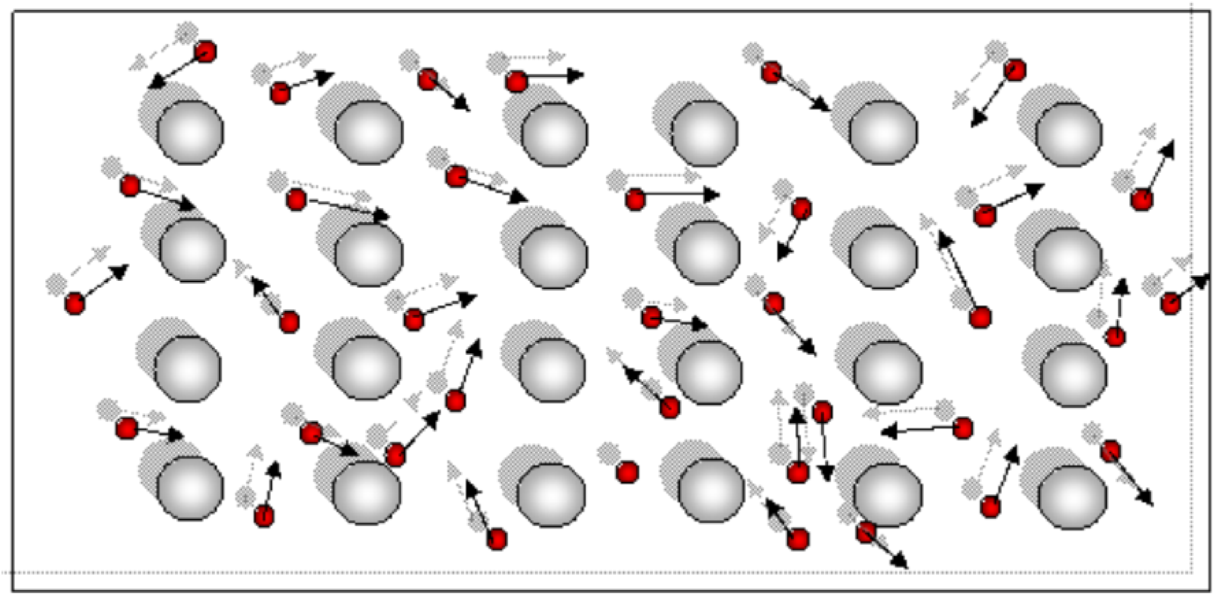
- I materiali possono essere distinti in tre categorie, a seconda del valore di resistività:
  - Isolanti — Resistività (ρ) > 10^5 $\Omega \cdot cm$
  - Semiconduttori — $10^{-3} < \rho < 10^5$ $\Omega \cdot cm$
  - Conduttori — $\rho < 10^{-3}$ $\Omega \cdot cm$

Conduzione nei metalli

- In un solido cristallino gli atomi sono organizzati in una struttura regolare, chiamata reticolo cristallino, all'interno della quale ciascuno di essi occupa una posizione di equilibrio.
- Nei metalli, in particolare, uno (o più) elettroni, che nell'atomo isolato si disporrebbe nell'orbitale più esterno (elettroni di valenza), **risulta quasi del tutto slegato dal proprio nucleo**.

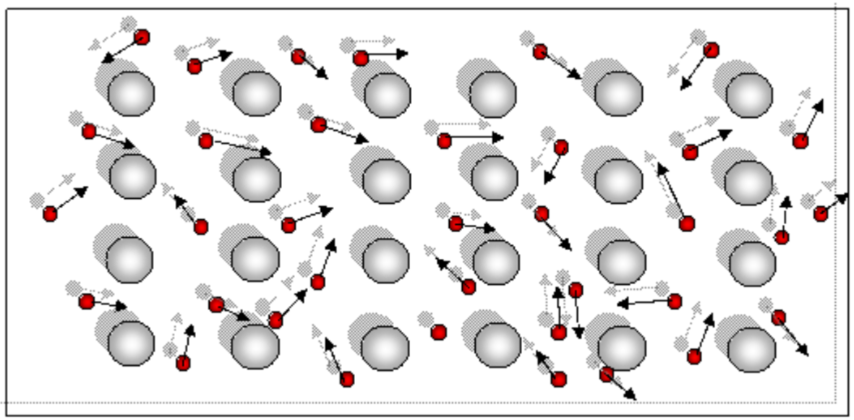
Modello del gas elettronico

▪Un metallo può essere immaginato come costituito da una struttura fissa e ordinata di ioni positivi all'interno della quale si agita una nube di elettroni liberi (elettroni di conduzione), in modo simile alle particelle di un gas racchiuso in un recipiente



Modello del gas elettronico

- Consideriamo una barretta di metallo. Quando al metallo viene applicato un campo elettrico, gli elettroni di conduzione (carichi negativamente) sono sospinti in verso opposto a quello del campo.
- Tale movimento dà origine alla corrente elettrica che attraversa il metallo



Modello del gas elettronico (2)

Indichiamo con Q la carica degli elettroni di conduzione per unità di volume, ovvero la *densità di carica*:

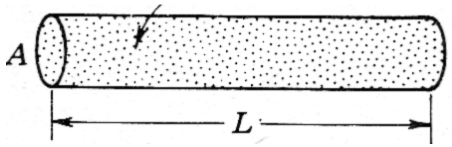
$\boldsymbol{Q}$ = densità di carica (carica in una unità di volume)

Possiamo calcolare $\boldsymbol{Q}$ conoscendo:
- la densità degli elettroni (il numero di elettroni di conduzione per cm^3), che indichiamo con **n**
- la carica di ogni elettrone, che indichiamo con **q** (1.6×10^{-19} Coulomb)

$$Q = -q\,n \quad (C/cm^3)$$

Conduzione nei metalli

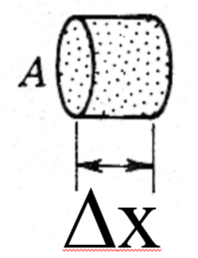
- Consideriamo ora un tratto di conduttore di lunghezza L ed area A



- Se applichiamo una differenza di potenziale V si genera un campo elettrico E nel conduttore.
  $E = V/L$ campo elettrico (V/cm)
- Gli elettroni di conduzione acquistano una velocità di deriva, v, che risulta proporzionale al campo elettrico.
- $\boldsymbol{v = -\mu \cdot E}$ (cm/s)
- μ = mobilità. È un parametro del conduttore e si misura in: $cm^2/(Vs)$

Conduzione nei metalli (2)

Concentriamo la nostra attenzione su un elemento di volume del nostro conduttore di lunghezza Δx.



La carica complessiva in questo elemento di volume è data dal prodotto della densità di carica per il volume:

$Q_{TOT} = \mathcal{Q}\ A\ \Delta x = -q\ n\ A\ \Delta x$

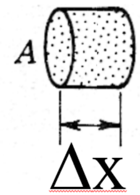
Gli elettroni si muovono con velocità: $v = \Delta x/\Delta t$.

Risulta quindi:

$Q_{TOT} = = -q\ n\ A\ v\ \Delta t$

Conduzione nei metalli (3)

$Q_{TOT} = -q\, n\, A\, v\, \Delta t$



La corrente che fluisce nel conduttore è data dalla la carica che attraversa la superficie *A* nell'unità di tempo. Si ha quindi:

$$I = Q_{TOT} / \Delta t = -q\, n\, A\, v$$

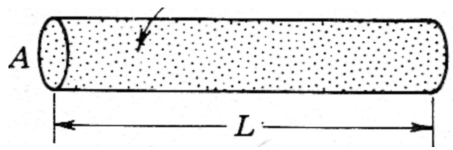
Il rapporto J=I/A è la <u>densità di corrente</u> (si misura in A/cm^2):

$$J = -n\, q\, v$$

Sostituendo l'espressione della velocità $v = -\mu \cdot E$:

$$J = nq\mu E$$

Conduzione nei metalli (4)



$$J = nq\mu E = \sigma E$$

Dove con $\sigma = nq\mu$ si è indicata la **conducibilità** del materiale.

Osservando che: $E = V/L$ si ottiene:

$I = J \cdot A = \mathrm{n}\, q\, \mu\, \mathrm{A\, V/L}$ corrente (A);

$\mathrm{R = V/I = L/(}q\, n\, \mathrm{A}\, \mu\,)$ resistenza (Ohm)

$\mathrm{R} = \rho\, \mathrm{L/A}$, $\rho = 1/(n\, q\, \mu\,)$

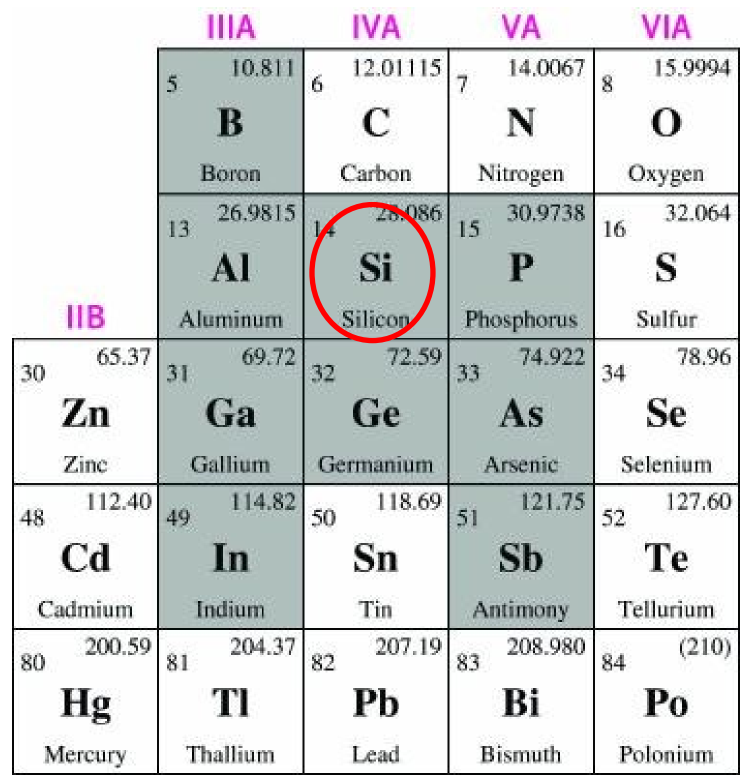
La **resistività** $\rho = 1/\sigma$ è inversamente proporzionale alla mobilità μ ed alla concentrazione *n* degli elettroni

Classificazione dei Materiali

- I materiali possono essere distinti in tre categorie, a seconda del valore di resistività:
  - Isolanti Resistività (ρ) > 10^5 $\Omega\cdot$cm
  - Semiconduttori $10^{-3} < \rho < 10^5$ $\Omega\cdot$cm
  - Conduttori $\rho < 10^{-3}$ $\Omega\cdot$cm
- I semiconduttori elementari sono formati da atomi di un solo elemento , generalmente Silicio.
- I semiconduttori composti sono formati da combinazione di elementi che compaiono nelle colonne V e III oppure II e IV della tabella periodica.
- Nei primi dispositivi elettronici fu utilizzato il Germanio come elemento semiconduttore, in seguito è stato soppiantato dal Silicio anche grazie alle ottime caratteristiche isolanti dell'ossido di silicio, il cui accrescimento può essere controllato con grande precisione.

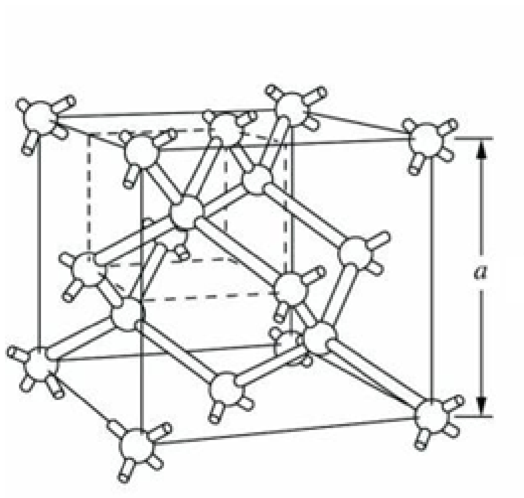
Materiali Semiconduttori

Semiconduttori
Silicio
Germanio
Carbonio (diamante)
Arsenuro di Gallio
Nitruro di Gallio
Fosfuro di indio
Carburo di Silicio

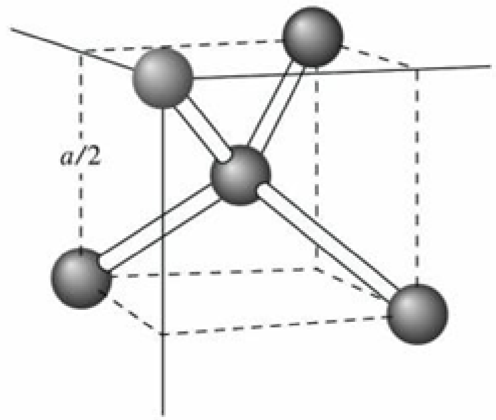


IIB	IIIA	IVA	VA	VIA
	5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.01115	7 N Nitrogen 14.0067	8 O Oxygen 15.9994
	13 Al Aluminum 26.9815	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.9738	16 S Sulfur 32.064
30 Zn Zinc 65.37	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.59	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.96
48 Cd Cadmium 112.40	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.69	51 Sb Antimony 121.75	52 Te Tellurium 127.60
80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.37	82 Pb Lead 207.19	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium (210)

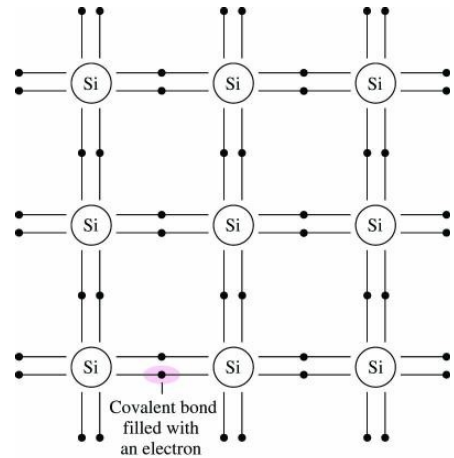
Modello del Legame Covalente



Struttura di un cristallo di Silicio



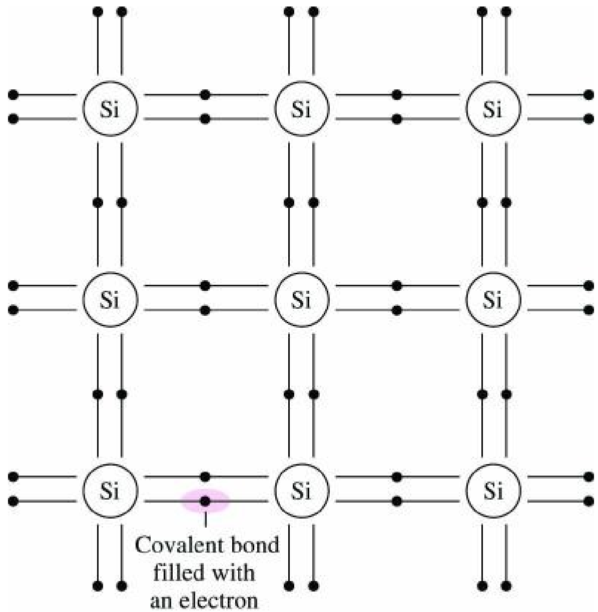
Nel cristallo, ogni atomo di Silicio è legato a quattro atomi adiacenti



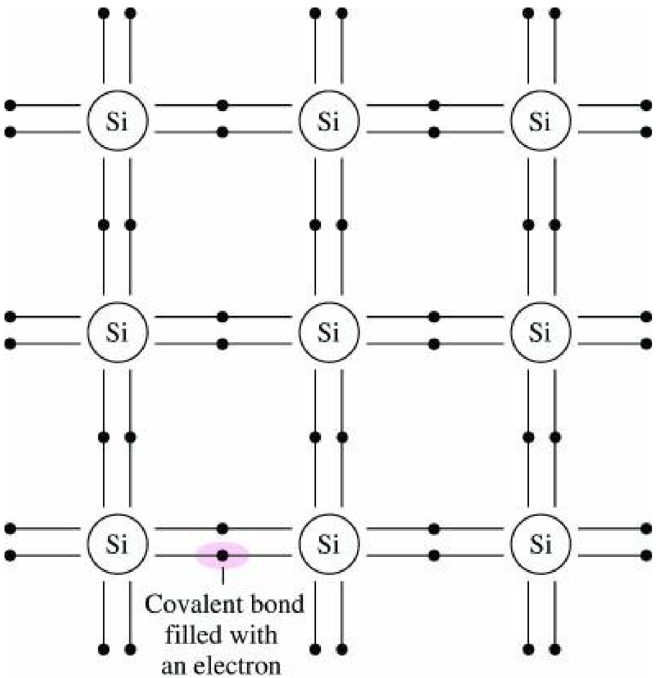
Visione semplificata della struttura di un cristallo di silicio

Legame Covalente nel Silicio

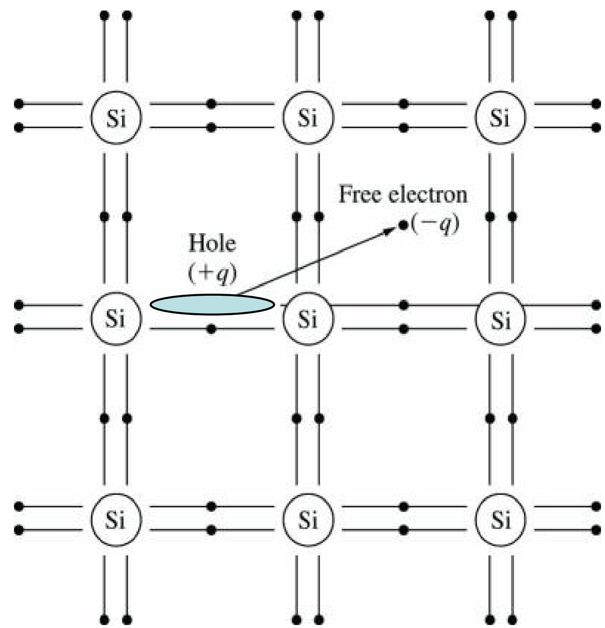
Possiamo rappresentare in modo semplificato un cristallo di silicio secondo lo schema seguente.
Ogni atomo è legato ad ognuno dei quattro atomi adiacenti mediante un **legame covalente**, in cui sono in comune due elettroni dei due atomi.



Legame Covalente nel Silicio

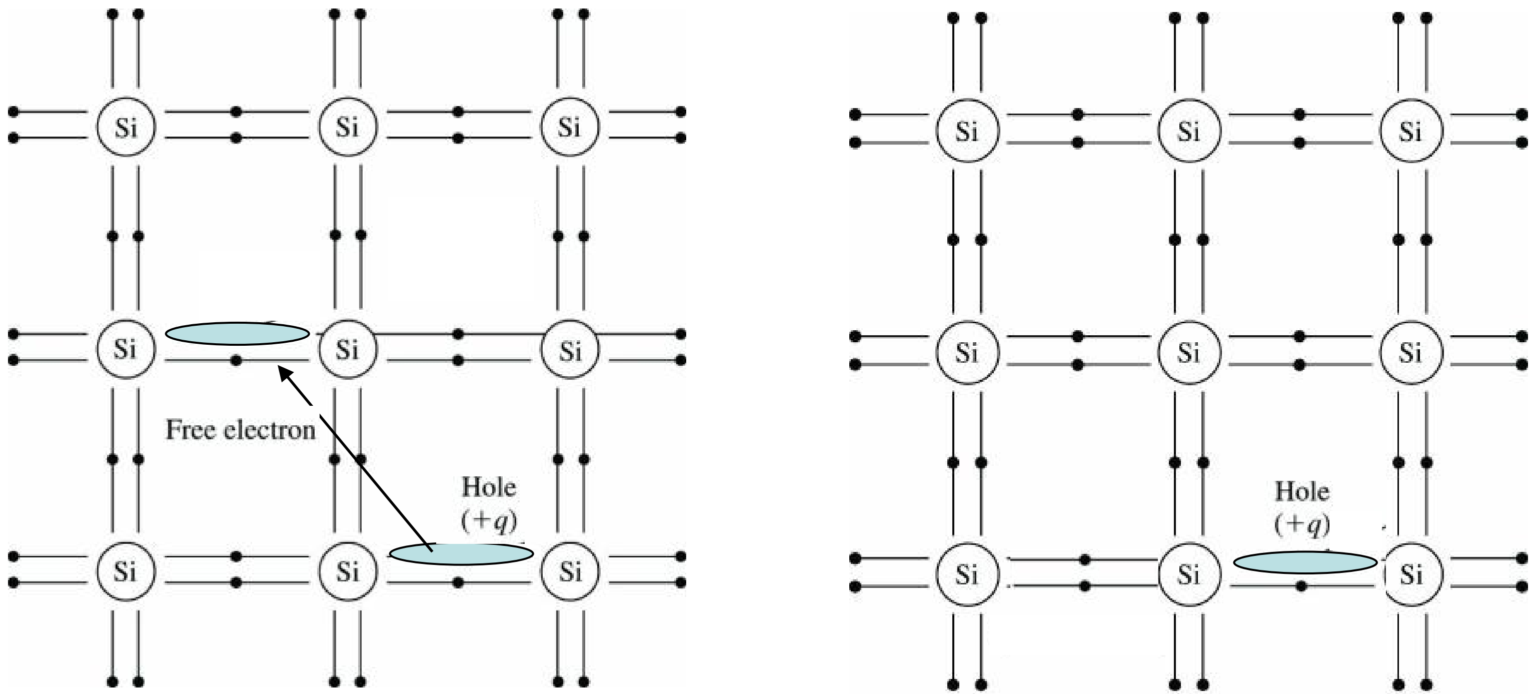


A temperature prossime allo zero assoluto, tutti i legami sono completi. Ogni atomo di Silicio contribuisce con un elettrone ad ognuno dei quattro legami covalenti.



A temperature più alte, l'energia cinetica degli elettroni aumenta. Alcuni rompono il legame covalente, generando una coppia costituita da un ***elettrone libero***, in grado di muoversi nel reticolo cristallino e di condurre corrente elettrica, e di una ***lacuna***, ovvero un legame covalente non soddisfatto.

Moto delle lacune



L'elettrone libero a seguito della rottura di un legame, può riempire la vacanza di un altro legame.
Il risultato complessivo è equivalente ad un moto delle lacune all'interno del cristallo.

Concentrazione di Elettroni e Lacune

- Quando un legame covalente si spezza si viene a creare una **lacuna** e contemporaneamente si libera un elettrone.
- Una lacuna si muove quando il legame covalente viene ricreato da un elettrone libero, proveniente a sua volta da un legame che si è spezzato altrove. Questo fenomeno è equivalente al moto di cariche positive all'interno del cristallo. Si determina così una **corrente di lacune**.
- La densità di lacune si rappresenta con p, mentre la densità degli elettroni liberi si indica con n.

Concentrazione di Elettroni e Lacune

- Poiché ogni volta che si spezza un legame si genera sia una lacuna che un elettrone, nel caso del Silicio puro **(intrinseco)** risulta:
  $n = p = n_i$
- **Il prodotto delle concentrazioni di elettroni e lacune è dato da:**
  $p \cdot n = n_i^2$
- Il prodotto $p \cdot n$ è costante anche quando il Silicio non è intrinseco, ma contiene delle impurità – questo è un aspetto importante come vedremo fra breve.

Mobilità

Come accennato per i metalli, anche per i semiconduttori si può assumere che la velocità media dei portatori liberi (elettroni e lacune) sia proporzionale al campo elettrico applicato. La costante di proporzionalità viene denominata **mobilità** e viene indicata con la lettera μ

Per gli elettroni: $v_n = -\mu_n \cdot E$; per le lacune: $v_p = \mu_p \cdot E$, dove:

E è il campo elettrico (V/cm)

v_n e v_p = velocità media di elettroni e lacune (cm/s),

μ_n e μ_p = mobilità di elettroni e lacune ($cm^2/V \cdot s$)

Da notare che gli elettroni si muovono in verso opposto rispetto alle lacune (segno – nell'espressione della velocità), in quanto gli elettroni hanno carica negativa, mentre le lacune hanno carica positiva.

Mobilità

$$v_n = -\,\mu_n \cdot E;\; v_p = \mu_p \cdot E$$

La mobilità delle lacune è inferiore rispetto a quella degli elettroni a causa della differente natura dei due tipi di cariche mobili. Il valore del rapporto μ_p/μ_n non è una costante univocamente determinabile, ma dipende da numerosi parametri tecnologici. Come ordine di grandezza si può assumere:

$$1/3 < \mu_p/\mu_n < 1/2$$

Corrente di Deriva

Nel caso dei metalli abbiamo ottenuto la seguente espressione per la densità di corrente:

$$J = -nqv = nq\mu E$$

Possiamo generalizzare questa espressione al caso dei semiconduttori, osservando che la corrente è sostenuta non solo dal moto degli elettroni liberi, ma anche da quello delle lacune:

$$J = Jn + Jp$$

Avendo indicato con *Jn* e *Jp*, rispettivamente, il contributo del moto degli elettroni e delle lacune alla corrente complessiva.

Corrente di Deriva

Elettroni e lacune hanno carica opposta ma si muovono anche in direzioni opposte:

$$Jn = -nqv_n = -nq(-\mu_n E) = nq\mu_n E$$

$$Jp = pqv_p = pq(\mu_p E) = pq\mu_p E$$

Da cui:

$$J = Jn + Jp = q(n\mu_n + p\mu_p)E$$

Ricordando che $J = \sigma E$ (σ è la conducibilità) si ha:

$$\sigma = q\,(n\,\mu_n + p\,\mu_p) \qquad (\Omega\cdot\text{cm})^{-1}$$

La resistività ρ è il reciproco della conducibilità:

$$\rho = 1/\sigma \qquad (\Omega\cdot\text{cm})$$

Esempio: resistività del silicio intrinseco

Esempio: Calcolare la resistività del silicio intrinseco a temperatura ambiente e classificarlo come isolante, semiconduttore o conduttore.

Assumiamo per le mobilità a temperatura ambiente i seguenti valori:

μ_n =1350 cm^2/Vs; μ_p=500 cm^2/Vs.

Per il silicio intrinseco, le concentrazioni di elettroni e lacune sono entrambe n_i. A temperatura ambiente si ha: n_i=10^{10}cm^{-3}.

La carica dell'elettrone è una costante universale e vale: q=1.6×10^{-19} C

Risulta: $\sigma = q\,(n\,\mu_n + p\,\mu_p) = qn_i\,(\mu_n+\mu_p) =$

$$= (1.60\times10^{-19})\,(10^{10})(1350+500) = 2.96\times10^{-6}\ (\Omega\cdot\text{cm})^{-1}$$

$$\rho = 1/\sigma = 3.38\times10^{5}\ \Omega\cdot\text{cm}$$

Il silicio intrinseco, a temperature ambiente, può essere classificato come un cattivo isolante.

Drogaggio dei Semiconduttori

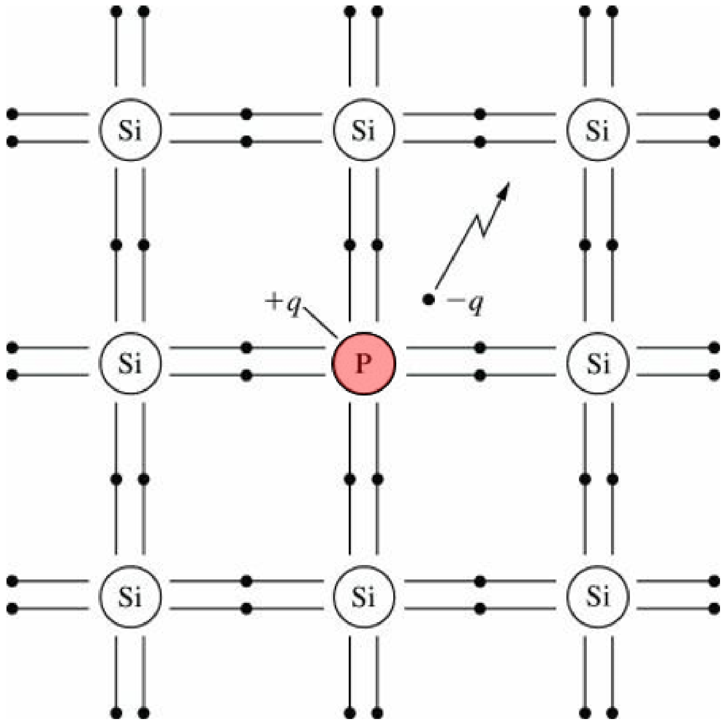
- Il **drogaggio** è il processo mediante il quale si aggiungono, in modo perfettamente controllato, piccolissime quantità di impurezze in un semiconduttore.
- Il drogaggio di un semiconduttore consente di controllarne la resistività in un esteso campo di valori. Oltre alla resistività si modificano anche altre proprietà del semiconduttore.
- Come impurità, per il silicio si adottano elementi appartenenti alle colonne III e V della tabella periodica.

Impurità di tipo Donatore

Supponiamo che all’interno di un cristallo, un atomo di silicio sia sostituito da un atomo di **Fosforo** (elemento della colonna V della tabella periodica).

Poiché il fosforo ha 5 elettroni nel guscio più esterno (rispetto ai 4 elettroni di valenza del silicio) c’è un elettrone "in più" nella struttura.

Il materiale **è sempre neutro** per la carica complessiva, ma è sufficiente una piccola quantità di energia per **liberare l'elettrone che non partecipa al legame covalente. Tale elettrone è in pratica libero di condurre corrente** se si applica un campo elettrico esterno
Una impurità di questo tipo viene denominata "**donatore**"



Materiale di tipo n/p

Indichiamo con N_D la concentrazione di impurità donatrici; N_D si misura in cm^{-3} (il valore di N_D ci dice quanti atomi di materiale donatore sono presenti in un centimetro cubico di cristallo).

Abbiamo **un elettrone libero per ogni atomo donatore**; possiamo quindi scrivere:

$$n \cong N_D$$

A differenza di quello che accade nel silicio intrinseco, **la concentrazione delle lacune sarà molto inferiore rispetto a quella degli elettroni**:

$$p << n$$

Materiale di tipo n/p

Possiamo calcolare il valore di p osservando che la relazione:

$$p\,n = n_i^2$$

che vale per il silicio intrinseco mantiene la sua validità anche per il silicio drogato. Si ha quindi:

$$n \cong N_D$$

$$p = n_i^2/n \cong n_i^2/N_D$$

Poiché in pratica $N_D >> n_i$, l'ultima relazione evidenzia che, a causa delle impurità di tipo donatore, la concentrazione delle lacune è effettivamente molto inferiore rispetto a quella degli elettroni. **Si dice, in questo caso, che il silicio è "di tipo n"**

Esempio

Un campione di silicio è drogato con atomi donatori, N_D=2×10^{17} cm^{-3}. Calcolare la concentrazione di elettroni e lacune. Calcolare inoltre la resistività, assumendo: μ_n = 600 cm^2/(Vs). A temperatura ambiente: n_i=10^{10}cm^{-3}.

Svolgimento

Poiché il materiale è di tipo N, abbiamo:

$$n \cong \mathrm{N_D} = 2\times10^{17}\ \mathrm{cm}^{-3}$$

$$p \cong n_i^2/N_D = 10^{20} / 2\times10^{17} = 500$$

La concentrazione di elettroni è 15 ordini di grandezza maggiore rispetto a quella delle lacune!

Esempio (continua)

$$\sigma = n\, q\, \mu_n + p\, q\, \mu_p \cong N_D\, q\, \mu_n$$

l'ultimo passaggio è giustificato dal fatto che $p \ll n$ e che $n = N_D$. Sostituendo i valori numerici:

$$\sigma \cong 1.6\times10^{-19} \times 2\times10^{17} \times 600 = 19.2 \quad 1/(\Omega\cdot\text{cm})$$

$$\rho = 1/\sigma = 0.052 \quad (\Omega\cdot\text{cm})$$

Per confronto, dall'esempio precedente la resistività del silicio intrinseco è circa: $\rho = 3.38 \times 10^5\ \Omega\cdot\text{cm}$

Il drogaggio ha ridotto la resistività di 7 ordini di grandezza!

Impurità di tipo Accettore

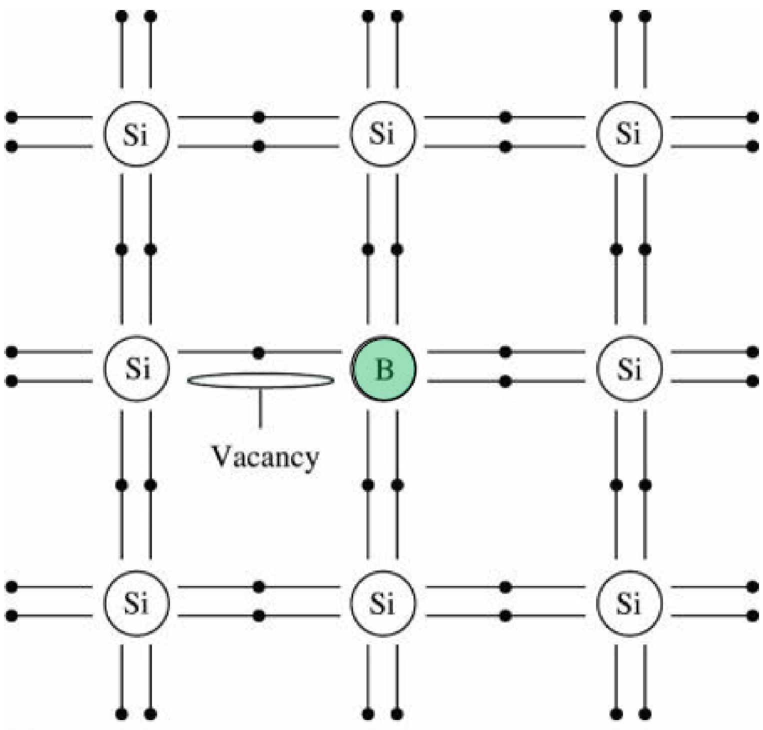
Vediamo cosa accade inserendo nel cristallo di silicio un atomo di Boro (elemento della III colonna della tabella periodica).

In questo caso si crea un **legame covalente incompleto.**

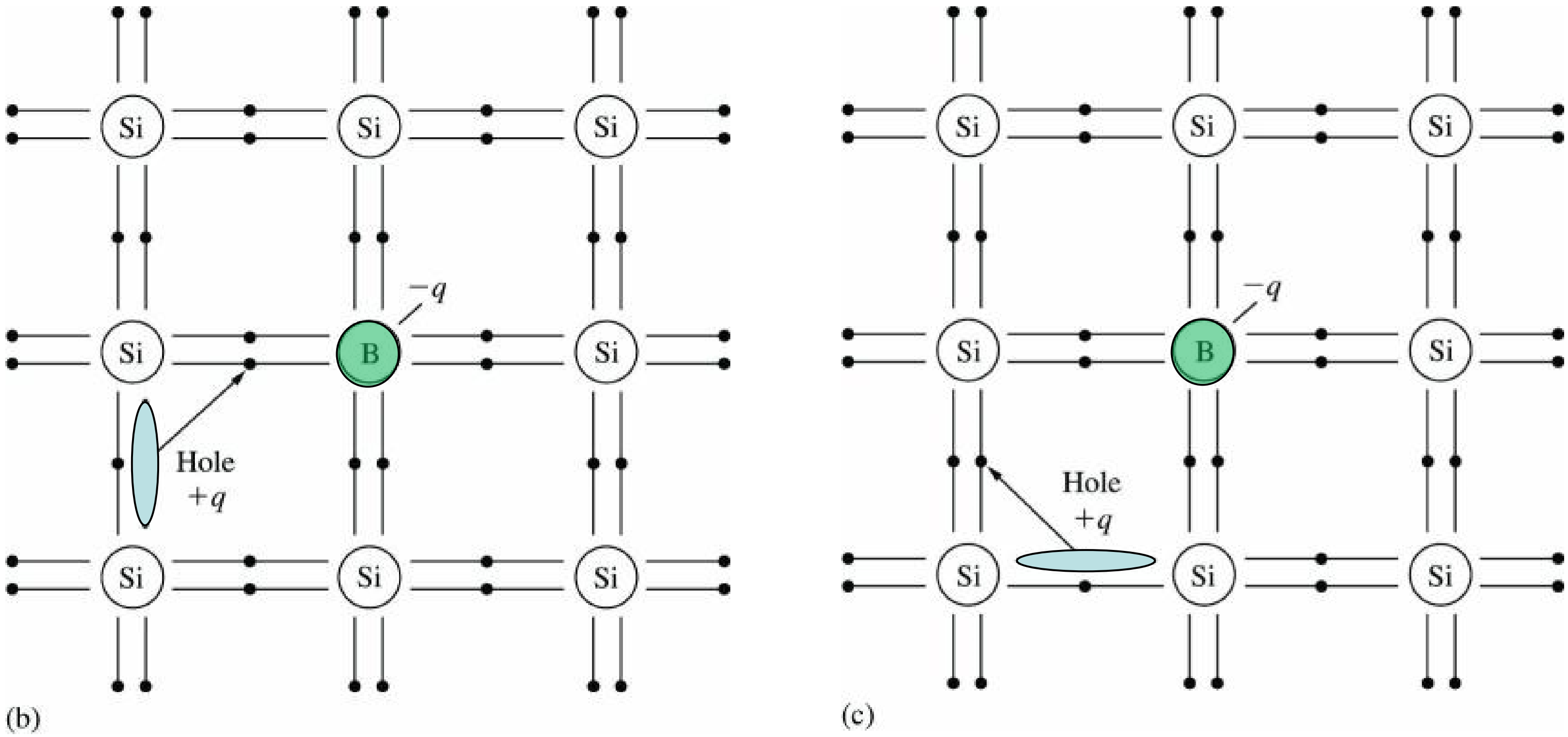
È sufficiente una piccola quantità di energia affinché un elettrone libero nelle vicinanze venga a completare il legame covalente.

Si genera quindi una lacuna.

Una impurità di questo tipo viene denominata "**accettore**"



Impurità di tipo Accettore



Moto delle lacune nel silicio drogato con accettori.

Materiale di tipo n/p

Indichiamo con N_A la concentrazione di impurità donatrici; N_A si misura in cm^{-3} (il valore di N_A ci dice quanti atomi di materiale accettore sono presenti in un centimetro cubico di cristallo).

Materiale di tipo n/p

Abbiamo **una lacuna per ogni atomo accettore**; possiamo quindi scrivere:

$$p \cong \mathrm{N_A}$$

Seguendo un ragionamento analogo a quello fatto in precedenza, otteniamo:

$$n = n_i^2/p \cong n_i^2/N_A$$

In questo caso, **la concentrazione degli elettroni è molto inferiore rispetto a quella degli elettroni**.

$$n << p$$

Si dice che **il silicio è "di tipo p"**

Riepilogo

Introducendo impurità di tipo **donatore**, il silicio diviene di **tipo n**, con:

$$n \cong \mathrm{N_D} \quad \text{e:} \qquad p = n_i^2/N_D << n$$

Introducendo impurità di tipo **accettore**, il silicio diviene di **tipo p**, con:

$$p \cong \mathrm{N_A} \quad \text{e:} \qquad n = n_i^2/N_A << p$$

Corrente di diffusione

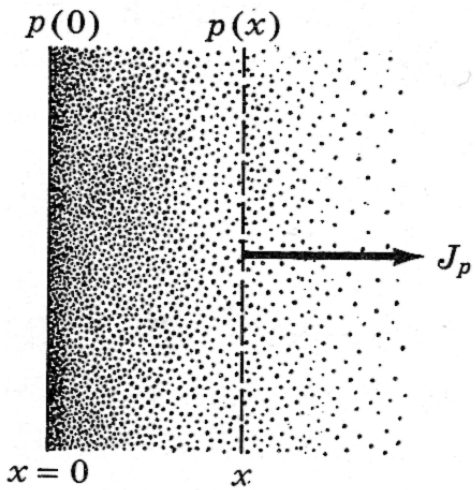
Le componenti di corrente che abbiamo visto in precedenza, caratterizzate dalle relazioni:

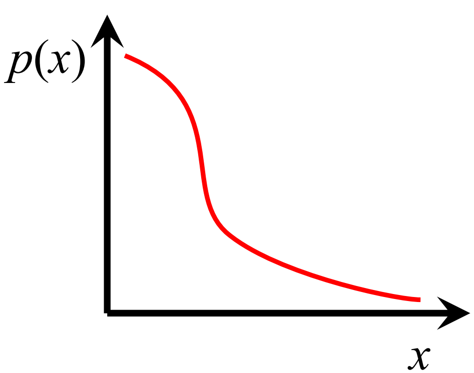
$$Jn = nq\mu_n E; \qquad Jp = pq\mu_p E$$

vengono denominate **corrente di deriva** (drift in inglese).

In un semiconduttore questa non è l'unica componente della corrente. Esiste infatti una **corrente di diffusione** che nasce ogni volta che **la concentrazione di elettroni e lacune non è costante**, ma presenta invece un gradiente.

Corrente di diffusione





La figura mostra un esempio in cui la concentrazione di lacune, $p(x)$, non è costante, ma decresce rispetto ad x.

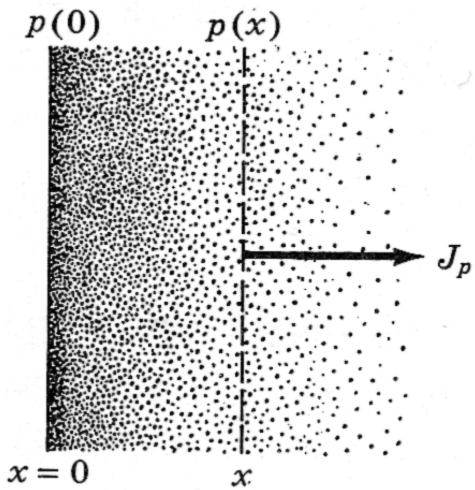
I portatori tendono a muoversi dalle zone in cui la concentrazione è maggiore a quelle in cui la concentrazione è minore. Questo fenomeno è analogo a quanto accade al gas racchiuso in una stanza, che tende a muoversi in modo da distribuirsi uniformemente nel volume, e comporta la nascita di una **corrente di diffusione**.

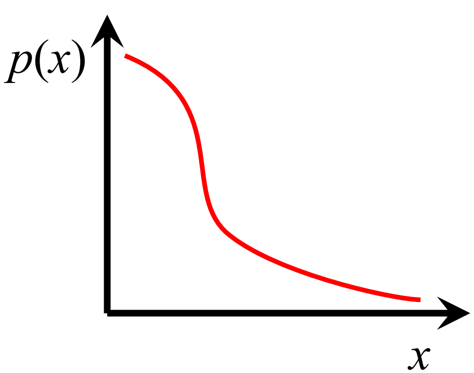
Corrente di diffusione

In pratica, si ha un gradiente nelle concentrazioni di elettroni e lacune quando vengono inserite in un semiconduttore delle impurità la cui concentrazione non è costante, ma ha invece una determinata distribuzione.

Un ulteriore esempio, estremamente importante in pratica, è il caso in cui in due regioni adiacenti del cristallo si inseriscono da un lato impurità di tipo accettore e dall'altro impurità di tipo donatore.

Corrente di diffusione





In questo esempio, in cui $p(x)$ è decrescente e la derivata di $p(x)$ è negativa, le lacune tenderanno a muoversi nella direzione dell'asse x. La corrente di diffusione avrà quindi segno positivo (opposto alla derivata di $p(x)$).

In generale possiamo quindi scrivere:

$$Jp,diff = -qD_P \frac{dp}{dx}$$

Nella relazione precedente, D_P è un coefficiente che prende il nome di *costante di diffusione* delle lacune.

Corrente di diffusione

Nel caso degli elettroni abbiamo una situazione analoga.

Se $n(x)$ è decrescente e la derivata di $n(x)$ è negativa, gli elettroni tenderanno a muoversi nella direzione dell'asse x. poiché la carica degli elettroni è negativa, la corrente di diffusione avrà segno negativo (concorde con quello della derivata di $n(x)$)

Si ha quindi:

$$Jn, diff = qD_N \frac{dn}{dx}$$

D_N è la *costante di diffusione* degli elettroni.

Corrente di diffusione

L'equazione totale della corrente che fluisce in un semiconduttore può essere ottenuta sommando le componenti di corrente di deriva e di diffusione degli elettroni e delle lacune:

$$J = Jn + Jp$$

$$Jn = nq\mu_n E + qD_N \frac{dn}{dx}$$

$$Jp = pq\mu_p E - qD_P \frac{dp}{dx}$$