

Fondamenti di Elettronica

14

Proprietà dei semiconduttori



Enrico Zanoni

enrico.zanoni@unipd.it

462635

Sommario

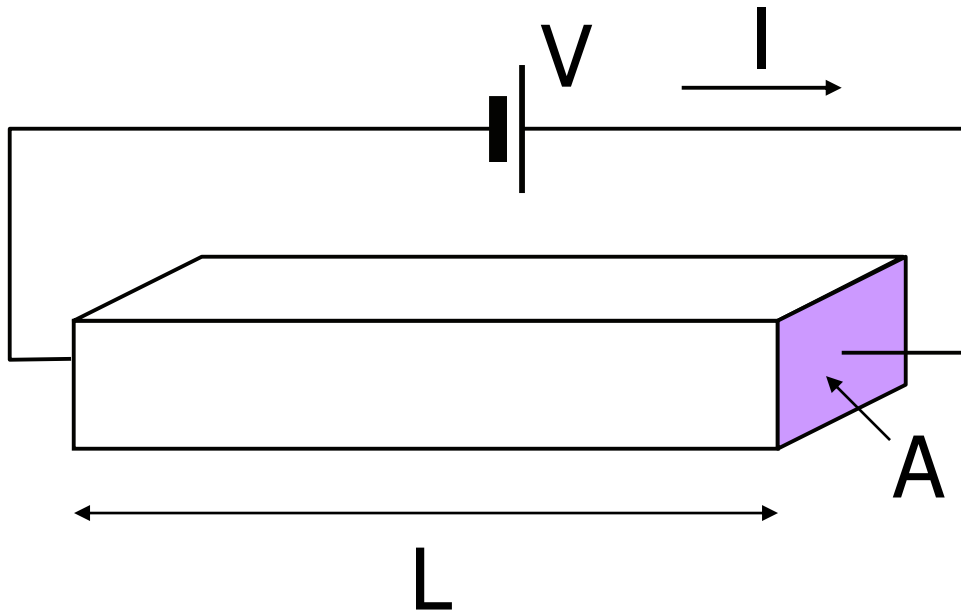
conducibilità dei materiali e concentrazione di elettroni liberi a temperatura ambiente

- energia di legame degli elettroni di valenza in un cristallo: modello chimico e modello «quantistico»
- metalli, semiconduttori, isolanti
- dipendenza della concentrazione di elettroni liberi dalla temperatura in un materiale puro
- elettroni (e^-) e lacune (h^+) : comportamento «intrinseco», creazione di coppie elettrone-lacuna
- come alterare tipo e livello di conducibilità nei semiconduttori : drogaggio di tipo N e di tipo P

come si muovono gli elettroni (e le lacune) in un cristallo

- ridurre la meccanica quantistica a meccanica classica : concetto di «massa efficace»
- interazione degli elettroni con un reticolo «imperfetto»: impurezze, difetti, agitazione termica
- corrente dovuta al campo elettrico: «corrente di deriva»
- corrente dovuta al gradiente di concentrazione: «corrente di diffusione»

Conduttori, isolanti e semiconduttori



Resistenza

$$R = \frac{V}{I} [\Omega]$$

Resistività

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} [\Omega \cdot \text{cm}]$$

Area (handwritten note pointing to A)
lunghezza (handwritten note pointing to L)

Classificazione:

(vetro)

ISOLANTI

SEMICONDUTTORI

(rame)

CONDUTTORI

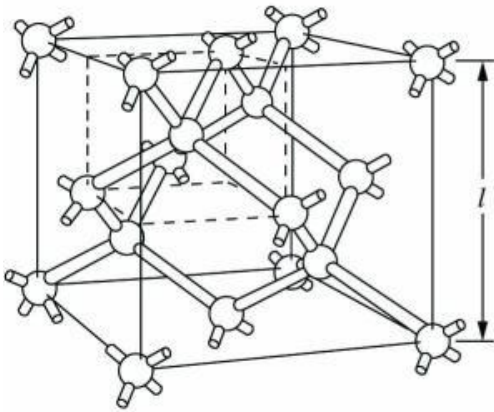
$$\rho > 10^5 [\Omega \text{cm}]$$

$$10^{-3} < \rho < 10^5 [\Omega \text{cm}]$$

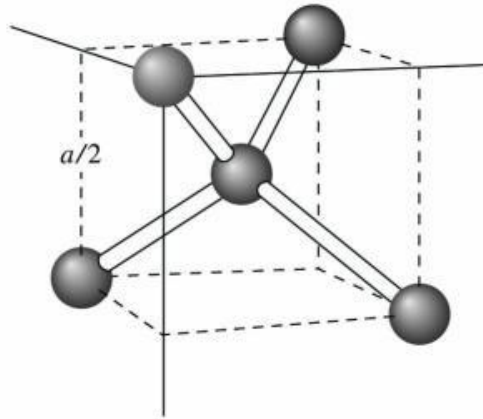
$$\rho < 10^{-3} [\Omega \text{cm}]$$

*dependono dalle caratteristiche del materiale,
dell'illuminazione e temperatura*

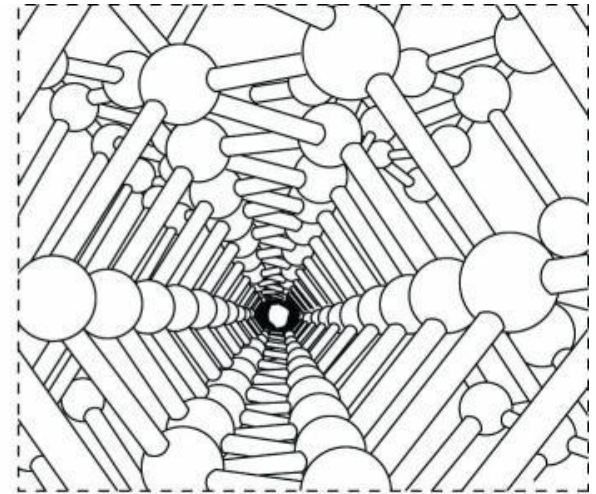
Cella cristalografica del silicio



Silicon diamond
lattice unit cell.

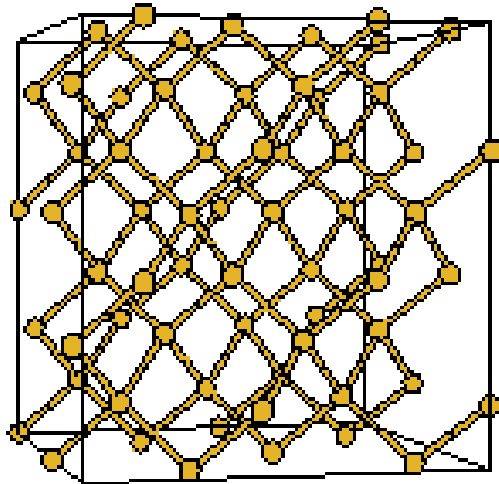


Corner of diamond
lattice showing
four nearest
neighbor bonding.

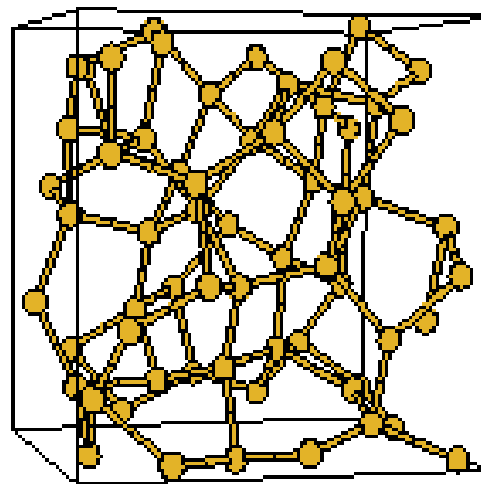


View of crystal
lattice along a
crystallographic axis.

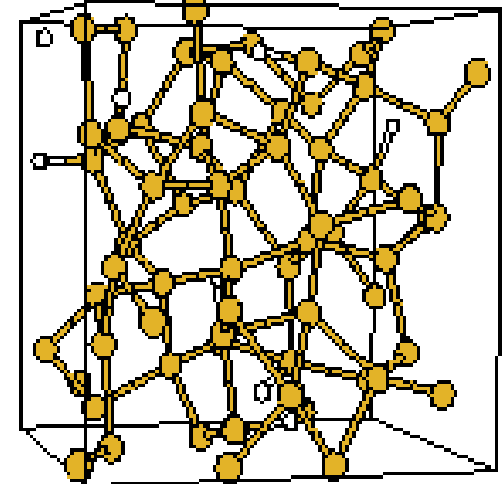
Silicio cristallino



Silicio amorfo



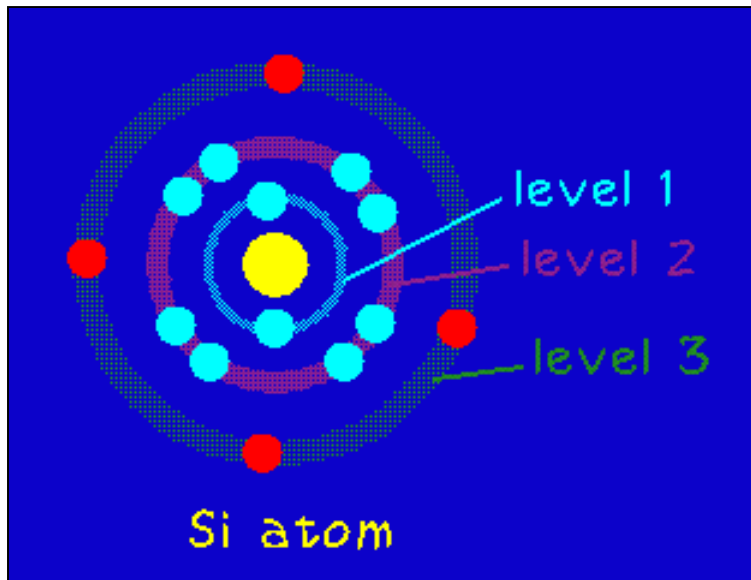
Silicio amorfo con idrogeno



● Silicio ◦ Idrogeno

Modello di Bohr dell'atomo di silicio

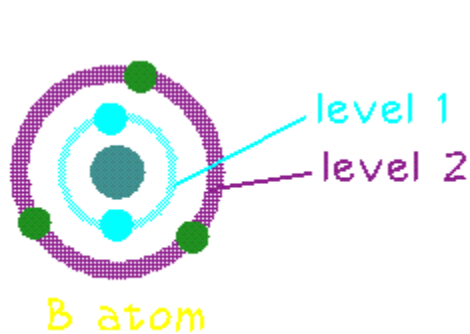
Nel modello atomico di Bohr, gli elettroni di un atomo si dispongono in orbitali e sono caratterizzati da un'energia di legame. Questa è l'energia necessaria a strappare l'elettrone all'atomo e renderlo libero. Nel Silicio, i 14 elettroni sono disposti (nello stato fondamentale) in 7 orbitali raggruppati in 3 livelli.



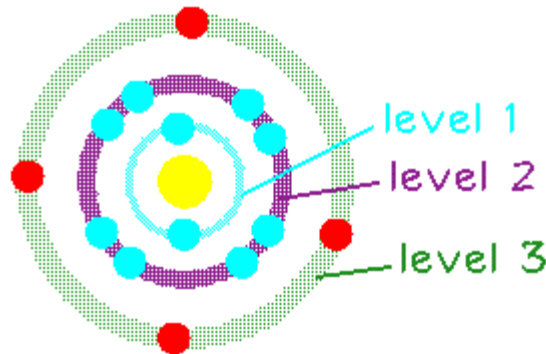
livello	orbitali
1	$1s^2$
2	$2s^2$ $2p_x^2$ $2p_y^2$ $2p_z^2$
3	$3s^1$ $3p_x^1$ $3p_y^2$ $3p_z^3$

Elettroni di valenza

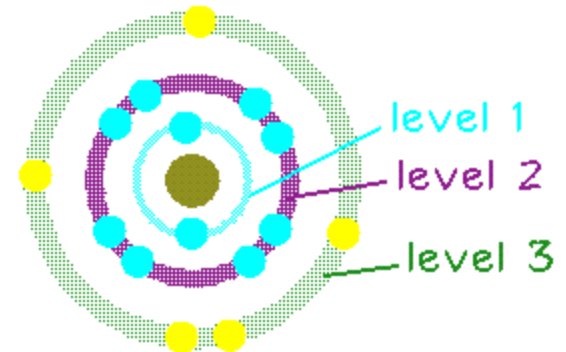
Gli elettroni nello strato esterno di un atomo sono detti **elettroni di valenza**. Tali elettroni hanno effetto sulle reazioni chimiche dell'atomo e determinano le proprietà elettriche dell'elemento.



Atomo di
Boro
3e⁻ valenza

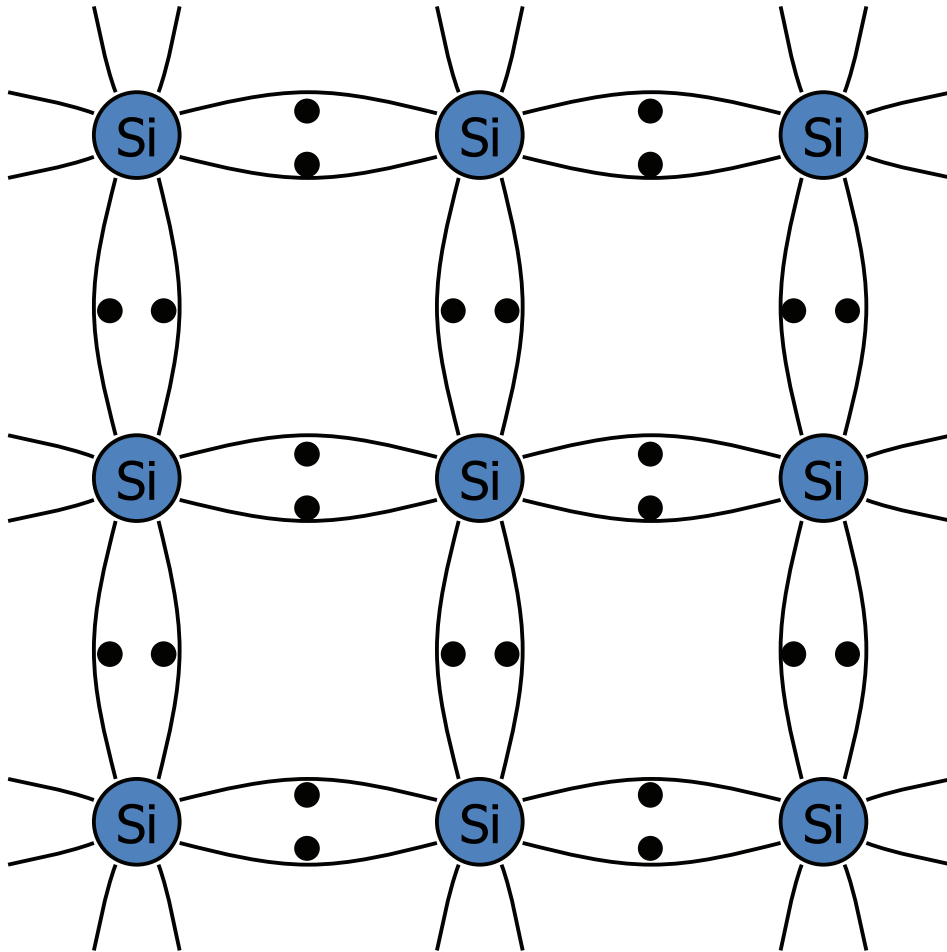


Atomo di
Silicio
4e⁻ valenza



Atomo di
Fosforo
5e⁻ valenza

Cristallo di silicio a ($T = 0\text{K}$) = energia termica nulla



In un cristallo di silicio (o germanio) i 4 elettroni di valenza sono posti in comune tra atomi contigui nel cristallo.

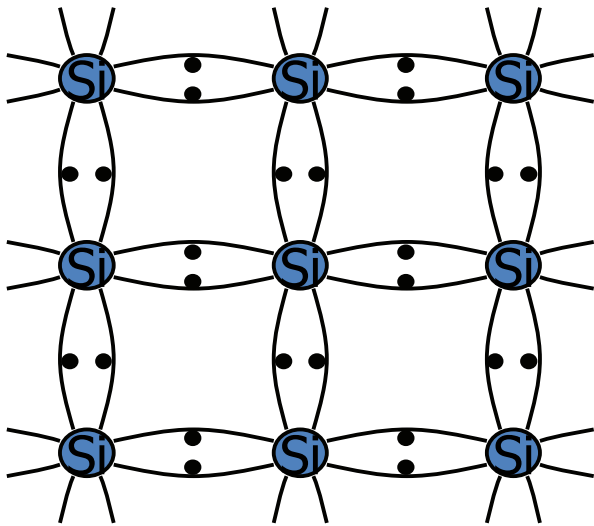
In questo modo ogni atomo completa l'orbitale esterno (con 8 elettroni)

A $T = 0\text{K}$ l'energia cinetica termica di atomi ed elettroni è classicamente nulla: nessun elettrone può raggiungere l'energia necessaria per uscire dal legame covalente e diventare un elettrone libero di muoversi nel cristallo

Energia del legame covalente in silicio = 1.12 eV

1 elettronvolt = 1 eV è l'energia acquisita da un elettrone accelerato da una differenza di potenziale pari a 1 V

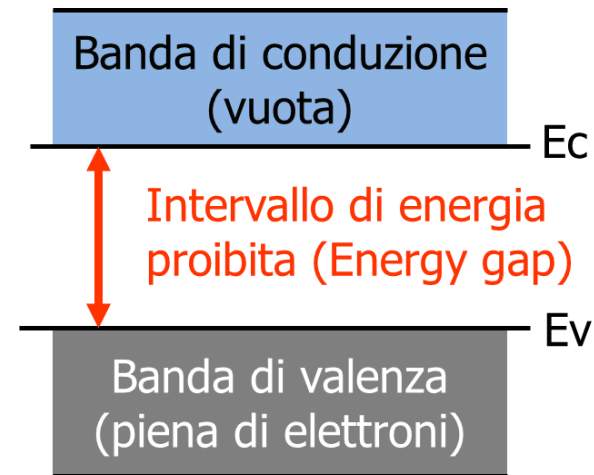
1 eV = $1,602176634 \times 10^{-19}$ Joule



Visione classica (chimica)

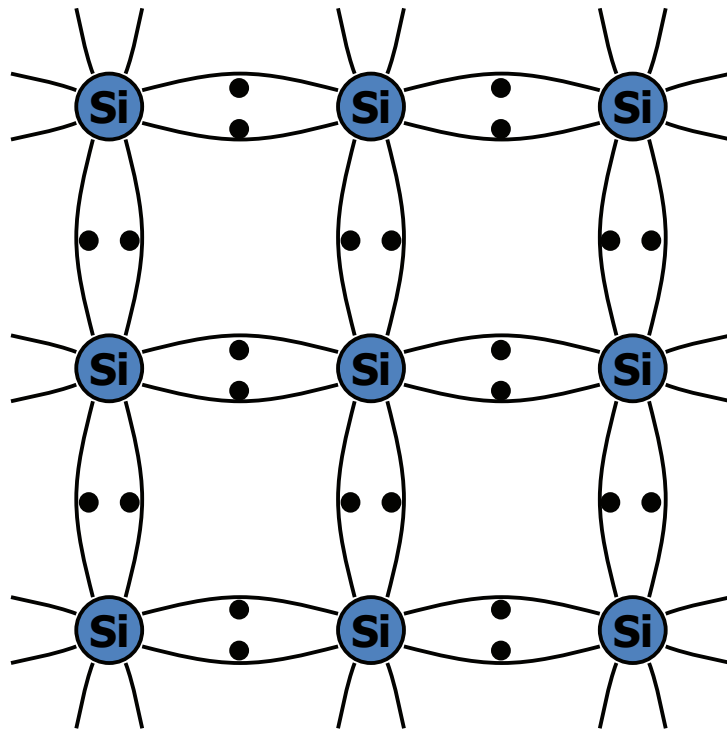
1.12 eV è l'energia necessaria per rompere un legame covalente e creare un elettrone libero di muoversi nel cristallo

Energy gap del silicio $E_g = 1.12$ eV

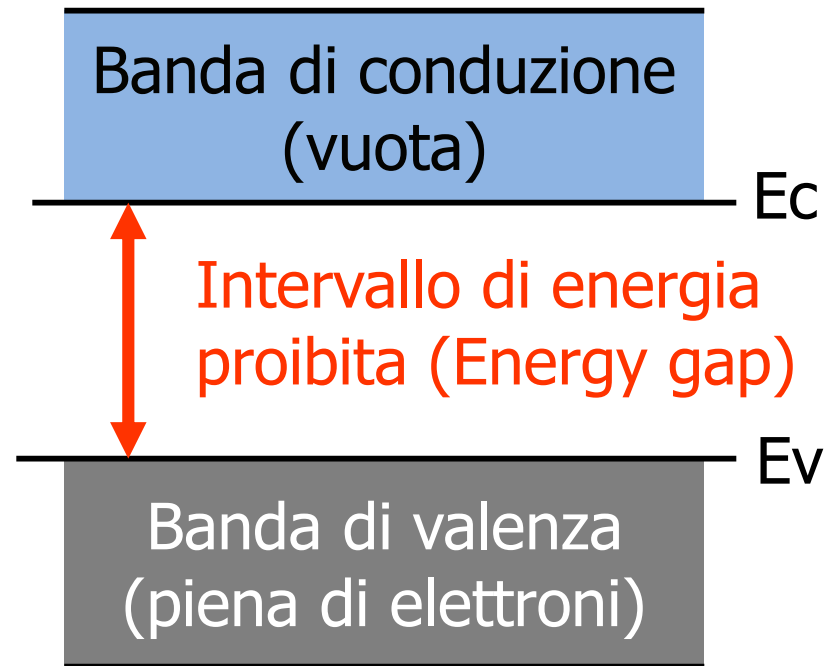


Visione quantistica (fisica)

1.12 eV è il salto quantico in energia necessario per passare dalla banda di energia degli stati «legati» (piena a 0K) alla banda superiore (vuota a 0K)



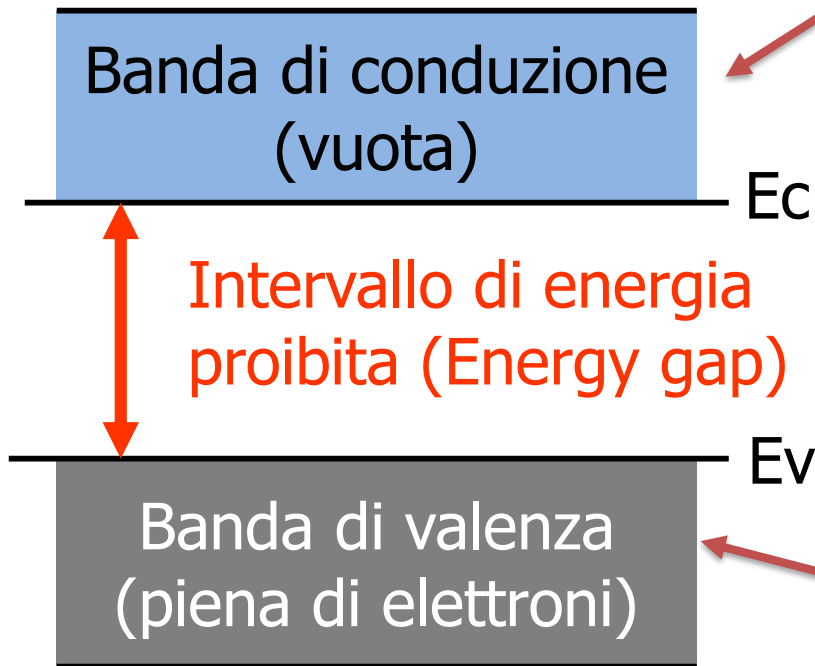
Modello a bande di energia



Nel cristallo di Silicio, gli elettroni di valenza non hanno più tutti la stessa energia di legame come nell'atomo isolato, ma energie leggermente diverse che formano una banda, la **banda di valenza**.

Cristallo di silicio a $T=0K$

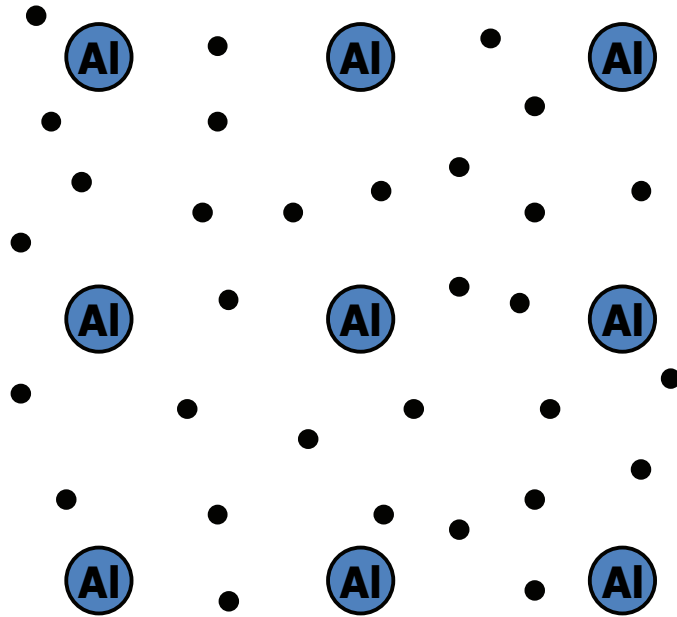
Modello a bande di energia



A 0K nessun elettrone ha potuto rompere il legame covalente che lo vincola al cristallo: questa banda di livelli energetici è vuota

A 0K tutti gli elettroni appartengono a legami covalenti questa banda di livelli energetici è completamente piena

Comportamento dei metalli



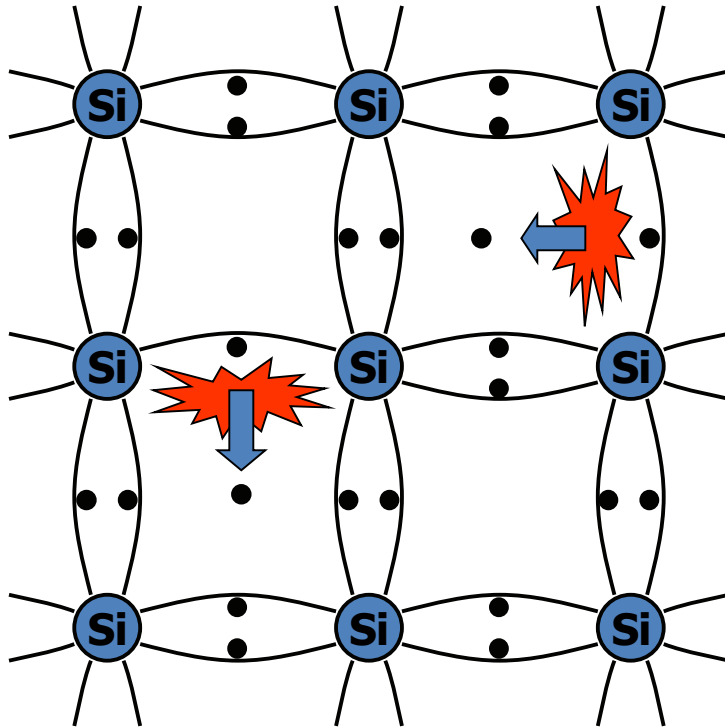
I cristalli metallici sono invece caratterizzati da una densità elevata di elettroni poco legati anche nello stato fondamentale ($T=0$ K).

Questi elettroni poco legati formano un gas elettronico.

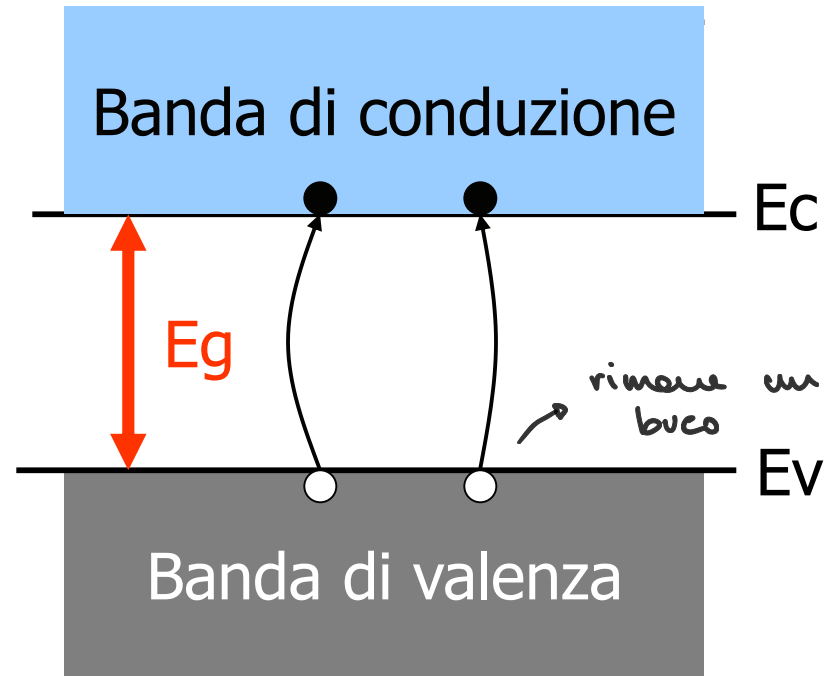
Se si applica una differenza di potenziale, anche molto piccola, si ha circolazione di corrente.

Cristallo di silicio

↳ A temperature ambiente



Modello a bande di energia

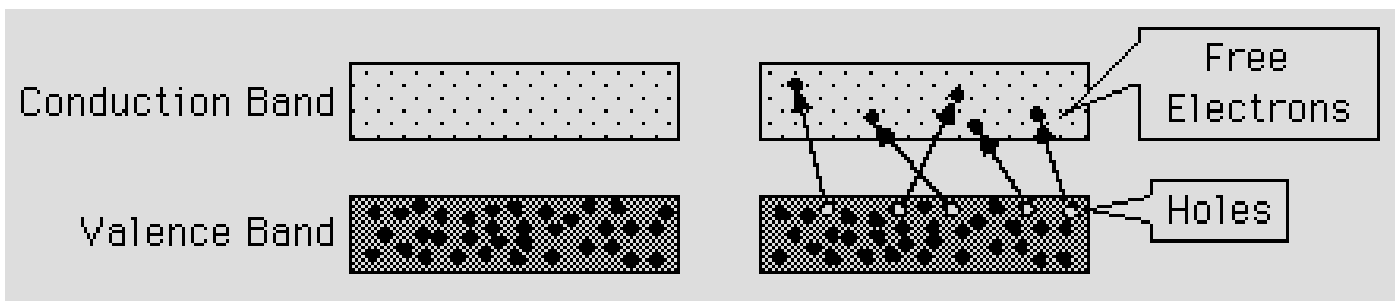
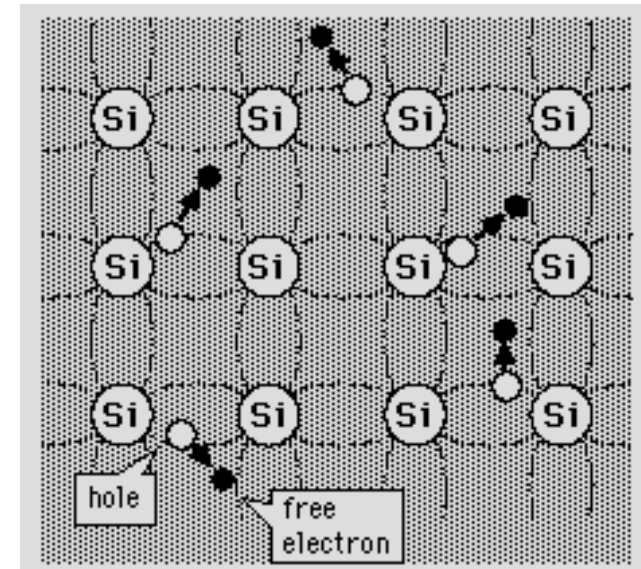


A differenza dei metalli, nei semiconduttori per avere elettroni che possono partecipare alla conduzione di corrente **bisogna rompere i legami covalenti**, portando così gli **elettroni in orbitali delocalizzati poco legati (banda di conduzione)**. Gli elettroni sono liberi di muoversi entro il cristallo.

↳ Può portare corrente (E_k attraverso un campo E)

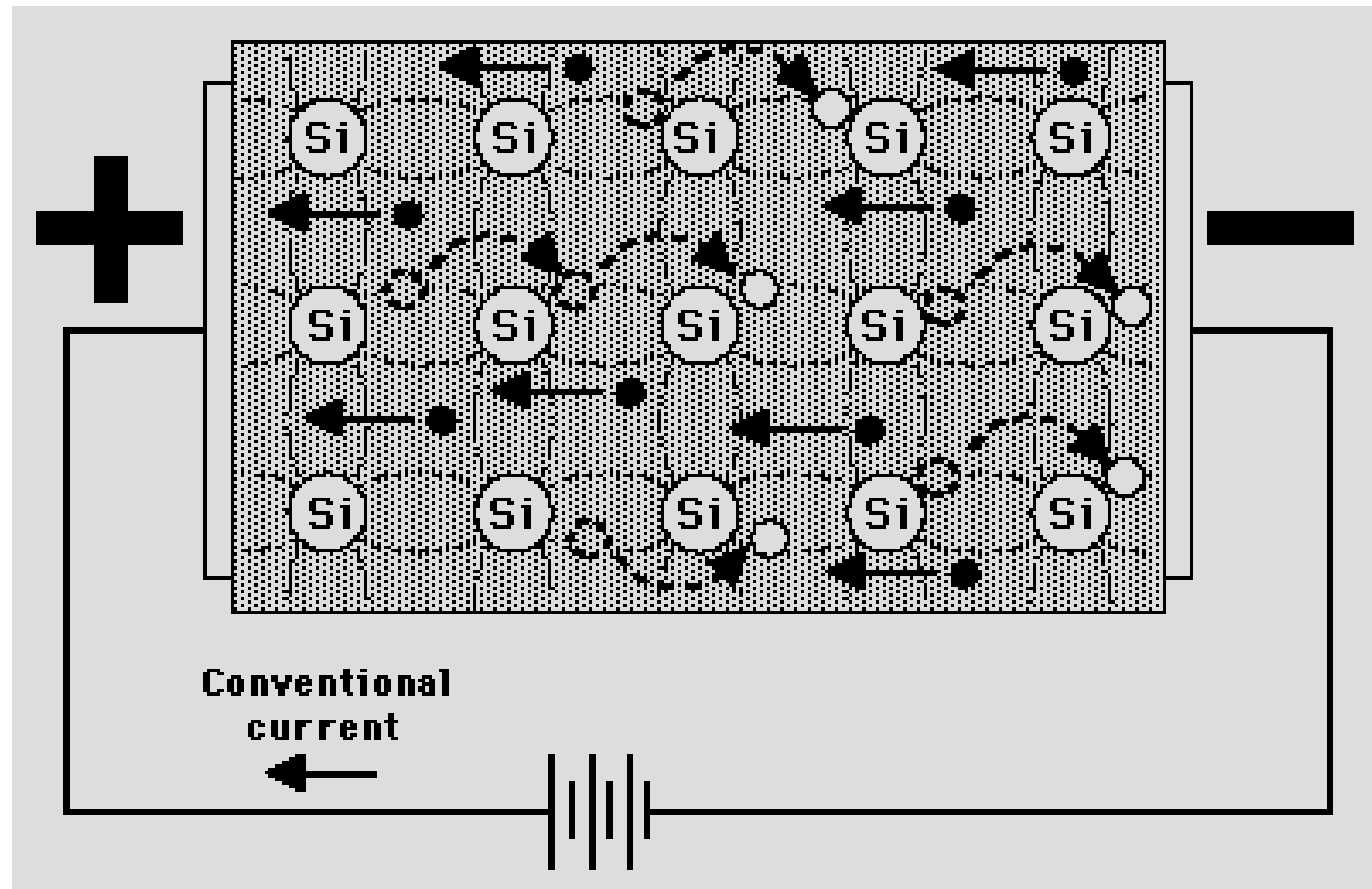
In un cristallo di Si (o altri) a temperatura al di sopra dello zero assoluto, si ha una probabilità non nulla che un elettrone acquisisca energia sufficiente a rompere il legame covalente, **finendo così in banda di conduzione**.

L'elettrone abbandona l'atomo relativo (che diventa uno ione carico positivamente) **lasciandosi dietro un legame incompleto detto *lacuna***.



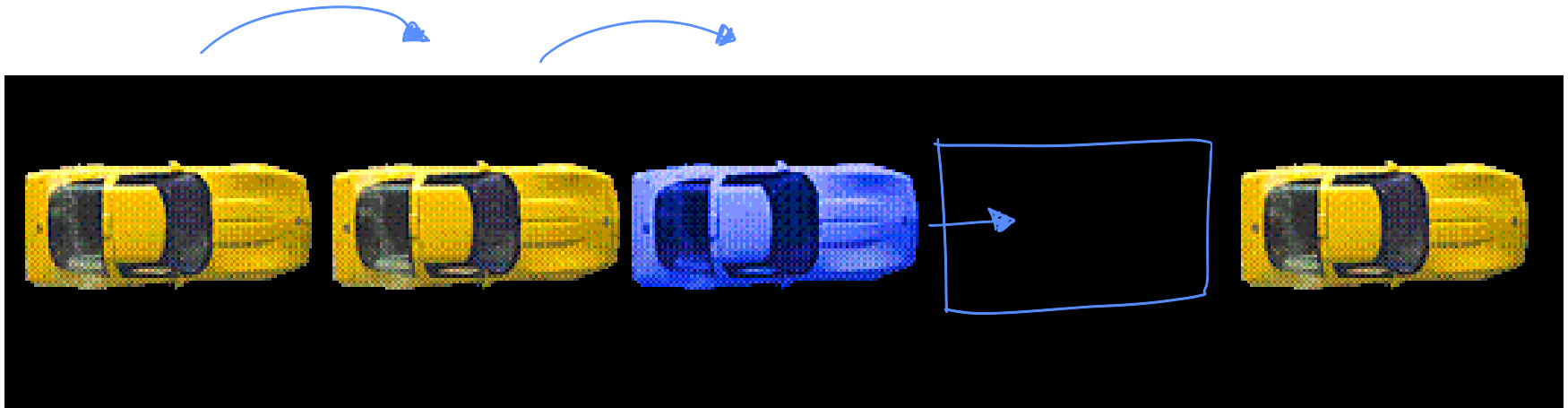
Coppie elettrone-lacuna

In presenza di una tensione applicata, **sia elettroni liberi che lacune** contribuiscono ad una **piccola corrente**.



La lacuna equivale ad una particella con carica positiva $+q$

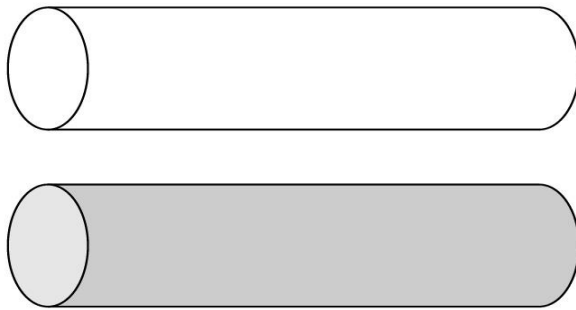
Le lacune si comportano come una carica positiva!



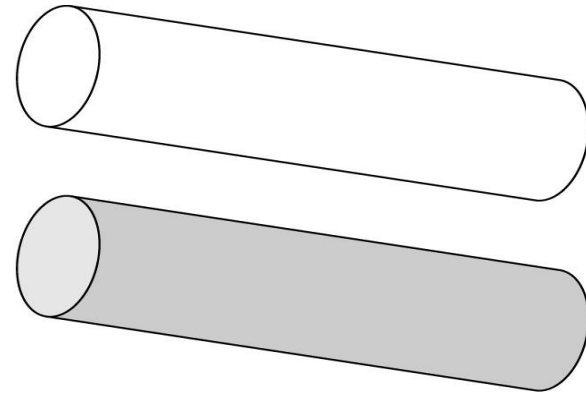
Analogia tra portatori in un semiconduttore e fluido in una conduttura

a) e *(b)* Nessun movimento netto di fluido avviene in caso di contenitore vuoto o completamente pieno.

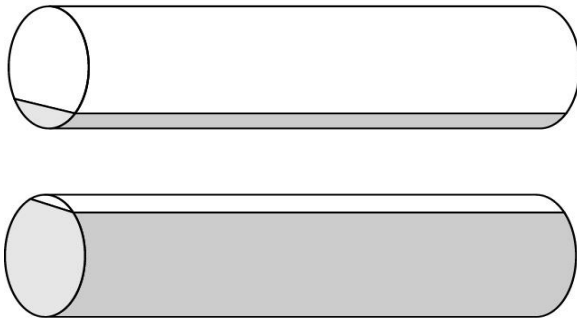
(c) e *(d)* Si ha movimento di Fluido nel caso in cui una parte del fluido del contenitore inferiore sia stata spostata in quello superiore.



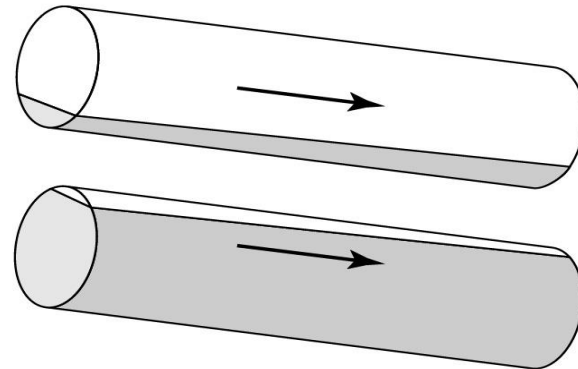
(a)



(b)

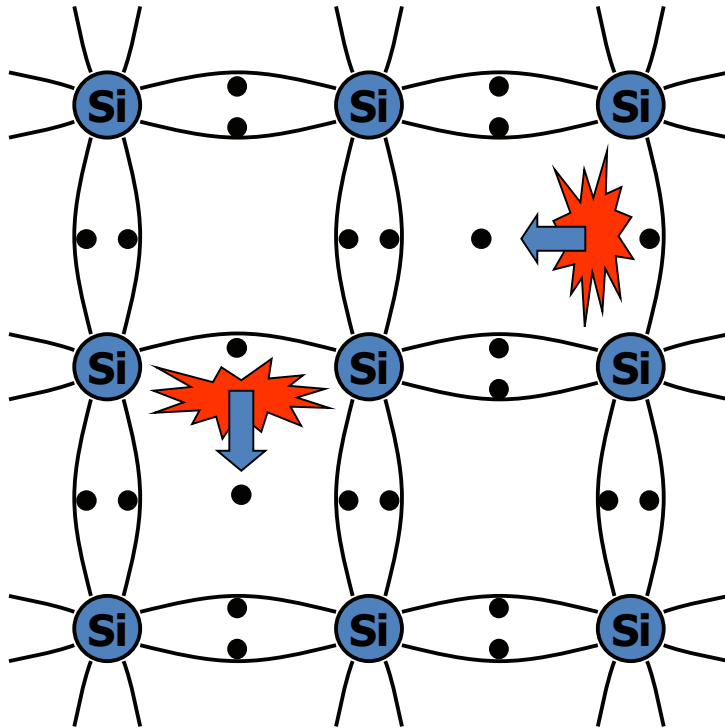


(c)

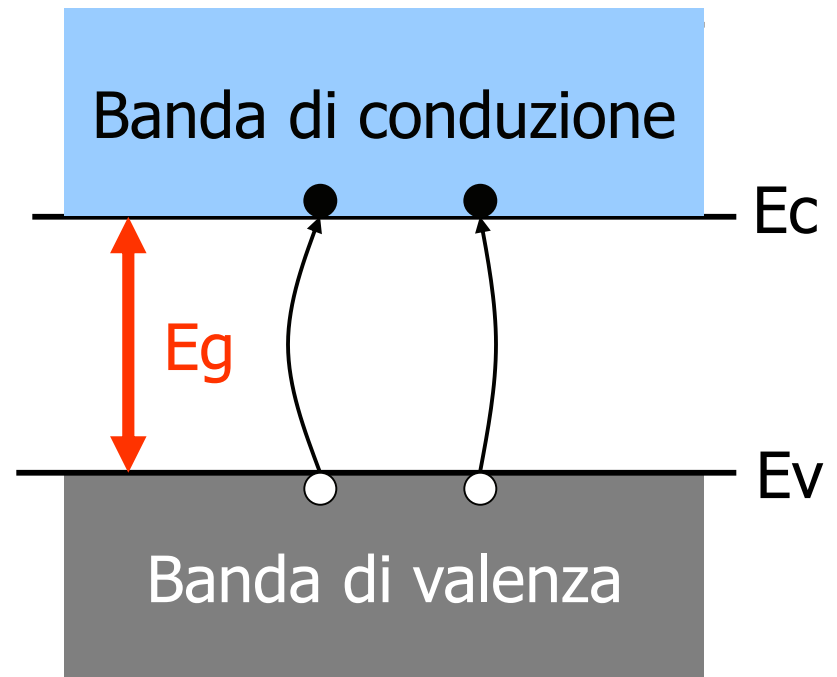


(d)

Energy gap

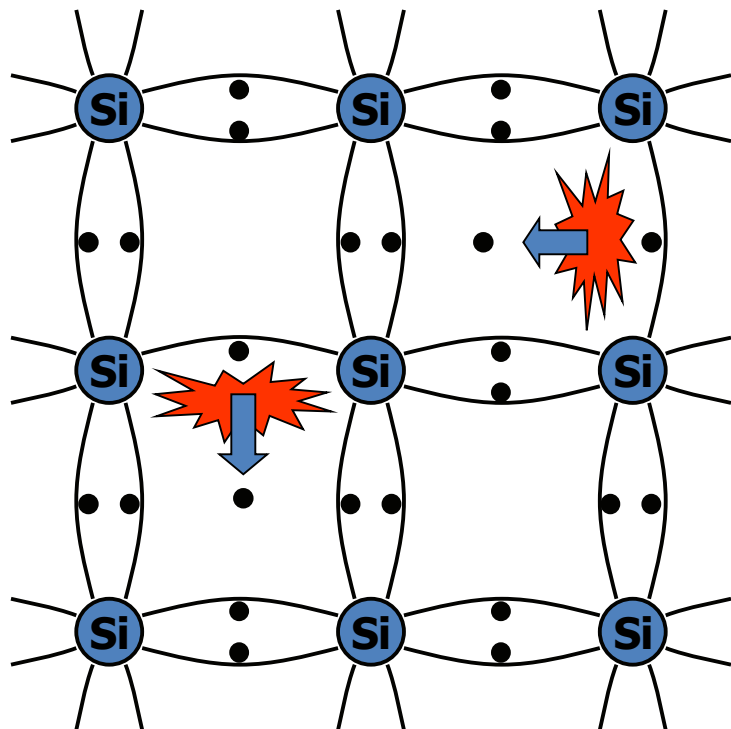


Modello a bande di energia

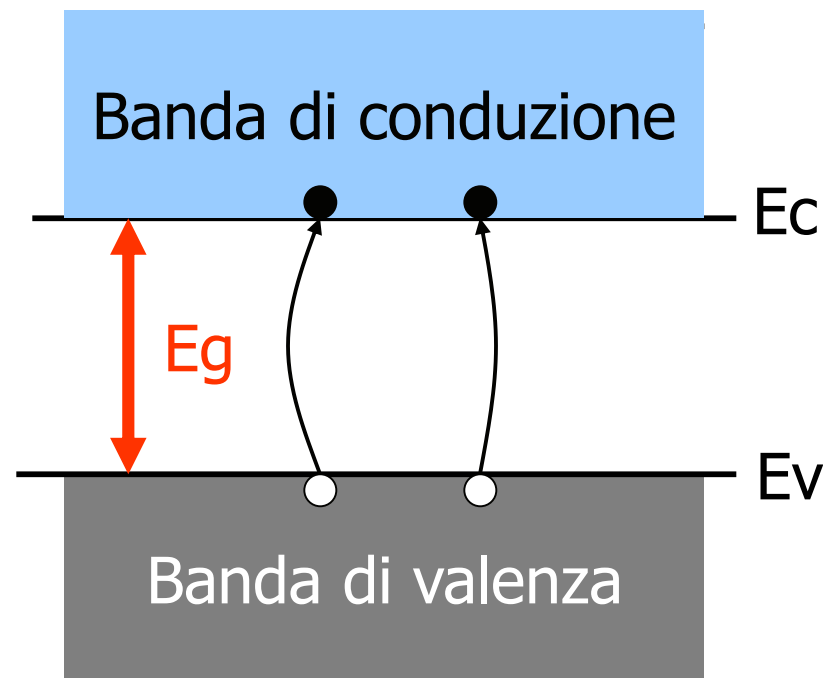


L'energia minima necessaria a rompere il legame covalente e originare una coppia elettrone/lacuna è detta **Energy Gap** (E_g).

Coppie elettrone-lacuna in un semiconduttore intrinseco = puro

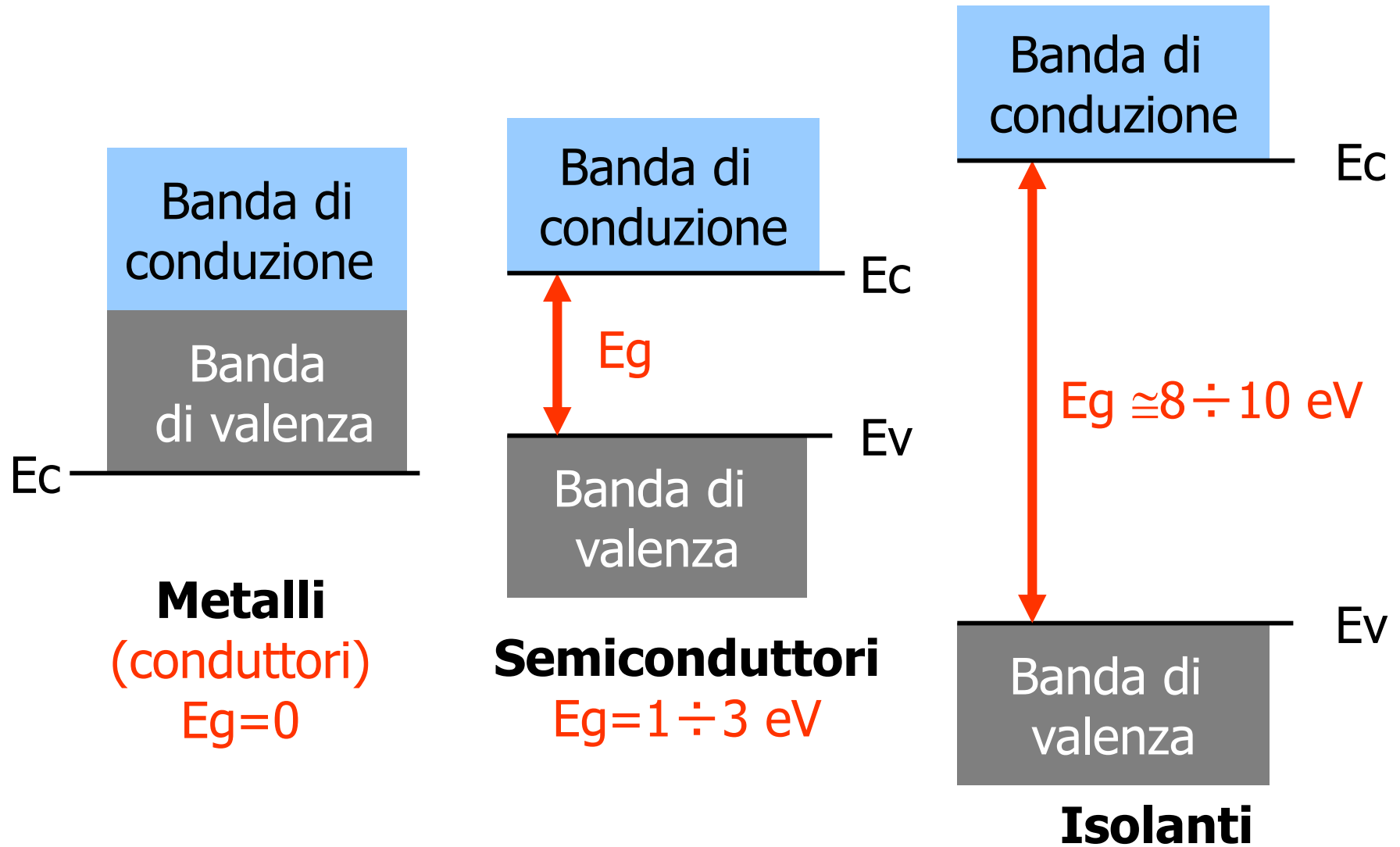


Modello a bande di energia



Gli elettroni possono acquisire energia cinetica in **banda di conduzione** e muoversi entro il cristallo. Anche le lacune possono acquisire energia cinetica in **banda di valenza** e muoversi entro il cristallo.

Conduttori, semiconduttori e isolanti



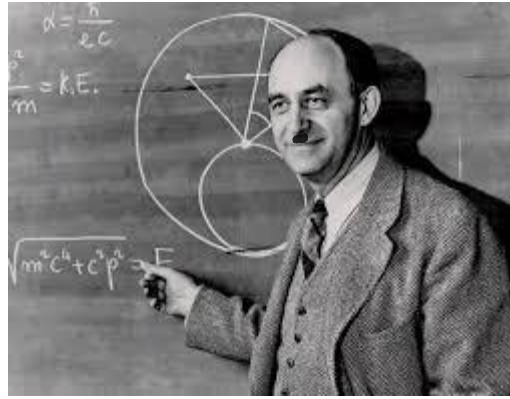
A $T > 0K$ quanti elettroni raggiungono la banda di conduzione?



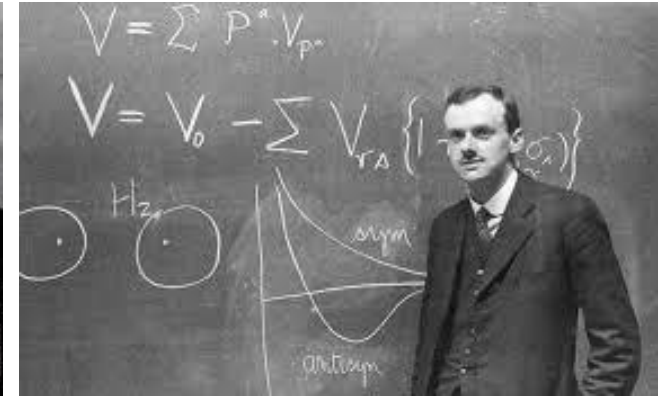
James Clerk
Maxwell



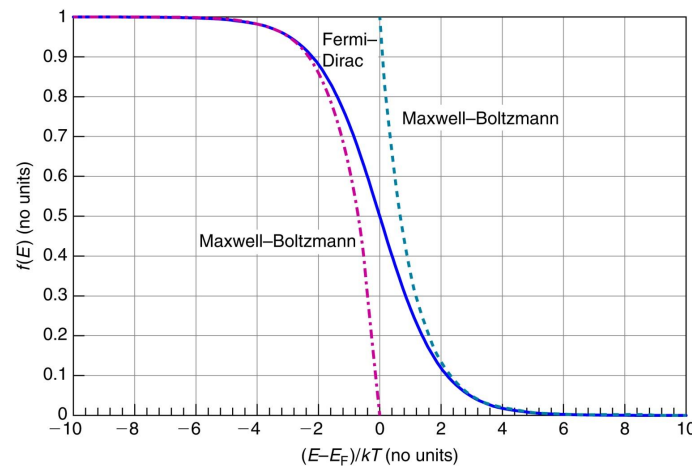
Ludwig
Boltzmann



Enrico
Fermi



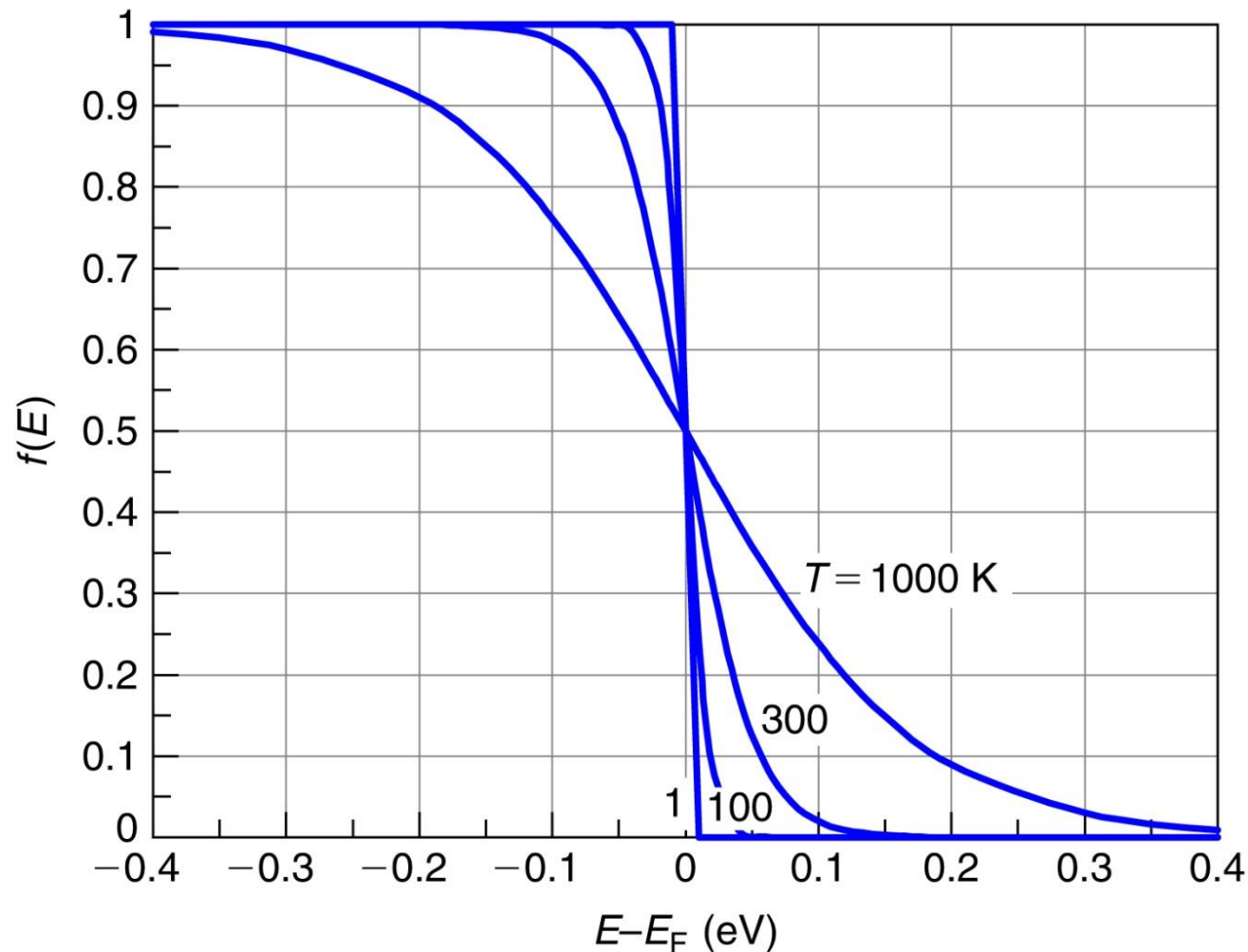
Paul Adrien Maurice
Dirac



Statistica di Fermi-Dirac per l'energia degli elettroni

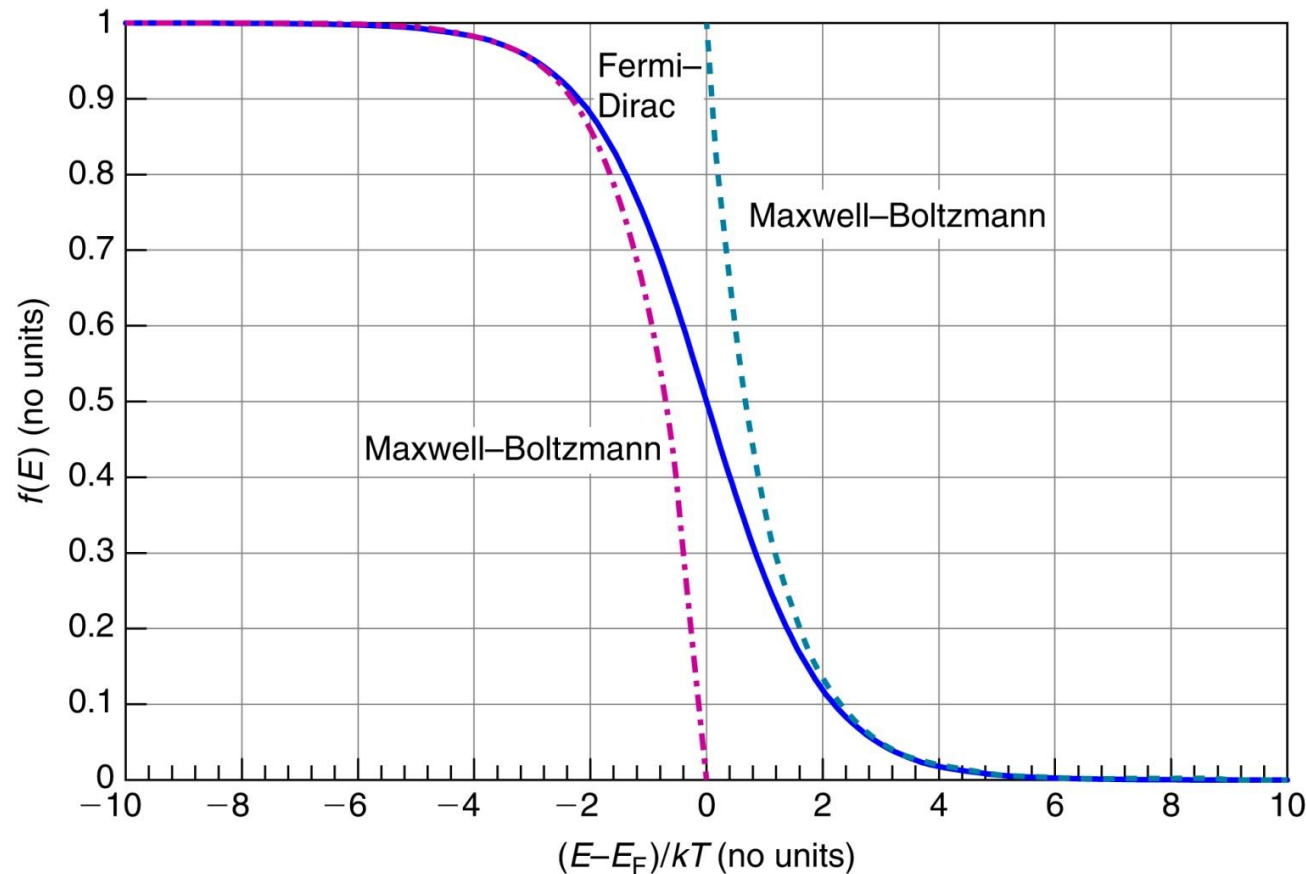
$$f_D(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)}$$

probabilità che l'elettrone abbia una certa energia E rispetto ad un'energia di riferimento E_f



Approssimazione di Maxwell-Boltzmann

$f_M(E) = \exp\left(-\frac{E - E_f}{kT}\right)$ probabilità che l'elettrone abbia una certa energia E rispetto ad un'energia di riferimento E_f



semiconduttori intrinseci

A temperatura ambiente (25° C) la densità di elettroni presenti in un semiconduttore intrinseco (n_i) che statisticamente (in un equilibrio dinamico) si trovano in banda di conduzione è dell'ordine di

10^{10} elettroni/cm³.

$$n_i^2 = BT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

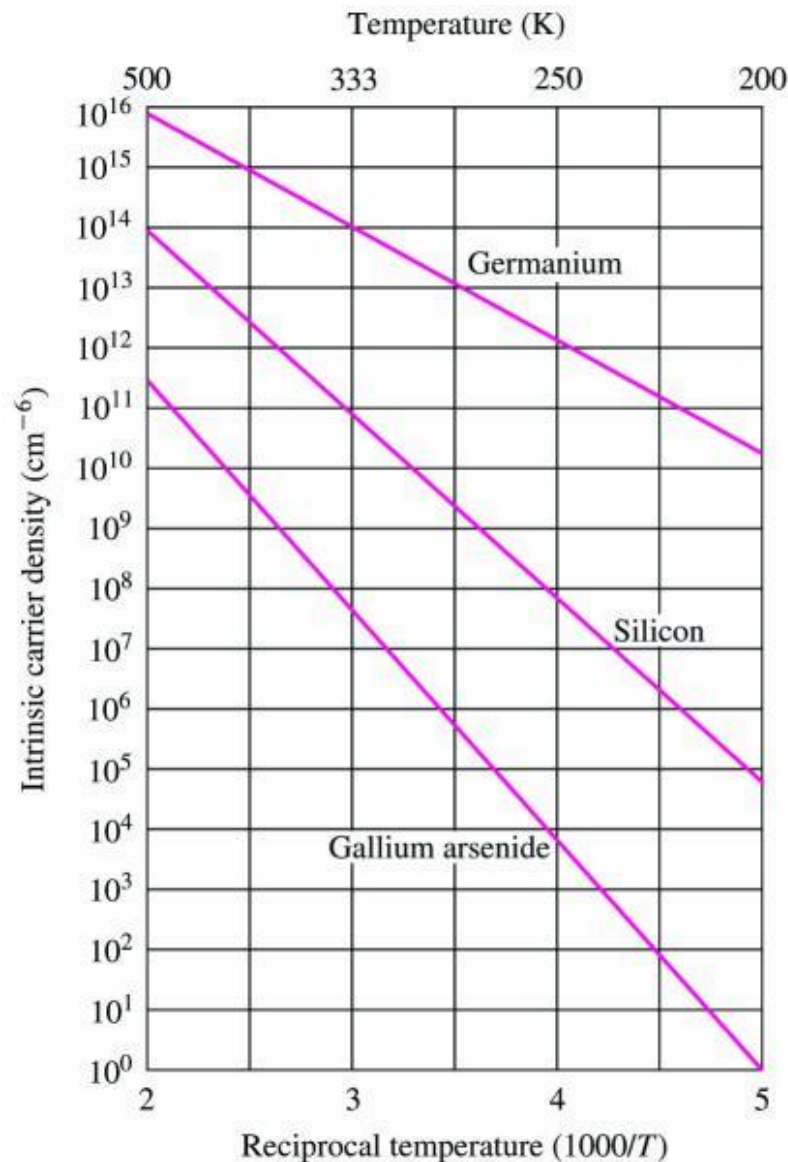
k = costante di Boltzmann = 8.62×10^{-5} eV/K

La densità di atomi nel cristallo è dell'ordine di 10^{22} atomi/cm³, per cui all'incirca un atomo ogni 10^{12} perde un elettrone di valenza.

Per il bilanciamento delle cariche, si ha anche che

$$n = p = n_i$$

Concentrazione dei portatori intrinseci vs. T



□ $n = \text{densità di elettroni}$ (elettroni/ cm^3) $n = n_i$ Per un materiale intrinseco.

□ $n_i^2 \approx 10^{20} \text{ cm}^{-6}$ per Si

maggiore = + conducibilità (non riesco a controllarla)

$$n_i^2 = BT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

	$B (\text{K}^{-3} \cdot \text{cm}^{-6})$	$E_g (\text{eV})$
Si	1.08×10^{31}	1.12
Ge	2.31×10^{30}	0.66
GaAs	1.27×10^{29}	1.42

come alterare tipo e livello di
conducibilità nei semiconduttori :
drogaggio di tipo N e di tipo P

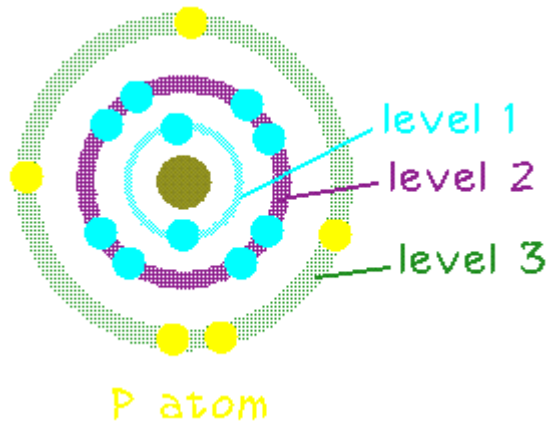
Elementi del gruppo III, IV e V della tavola periodica

Semiconductor	Bandgap Energy E_G (eV)
Carbon (diamond)	5.47
Silicon	1.12
Germanium	0.66
Tin	0.082
Gallium arsenide	1.42
Gallium nitride	3.49
Indium phosphide	1.35
Boron nitride	7.50
Silicon carbide	3.26
Cadmium selenide	1.70

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

Drogaggio (doping) di un semiconduttore

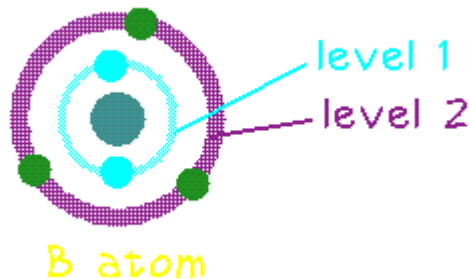
L'aggiunta di una piccola percentuale di atomi di altri elementi nel cristallo comporta forti cambiamenti nelle proprietà elettriche del cristallo, che viene detto **drogato**.



FOSFORO

(5 elettroni di valenza)
fornisce 1 elettrone
aggiuntivo (**donatore**).

Drogaggio di tipo n

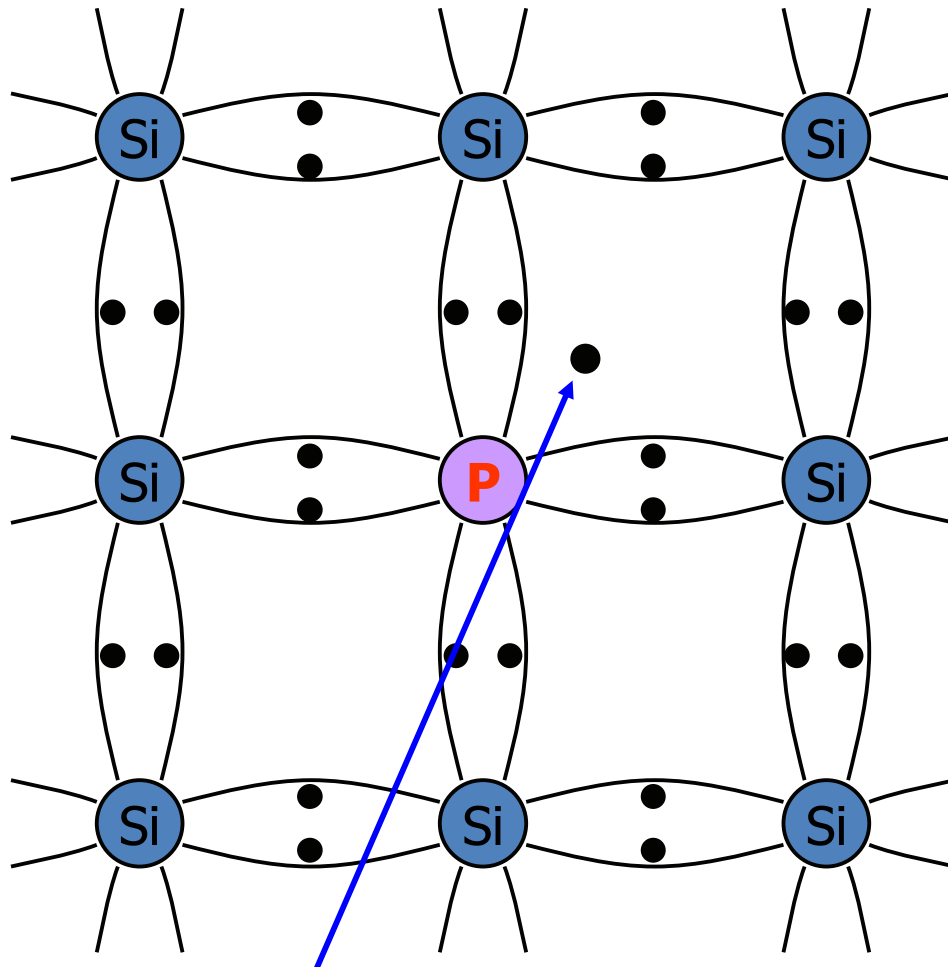


BORO

(3 elettroni di valenza)
fornisce 1 lacuna
aggiuntiva (**accettore**).

Drogaggio di tipo p

Silicio drogato n = con atomi donatori

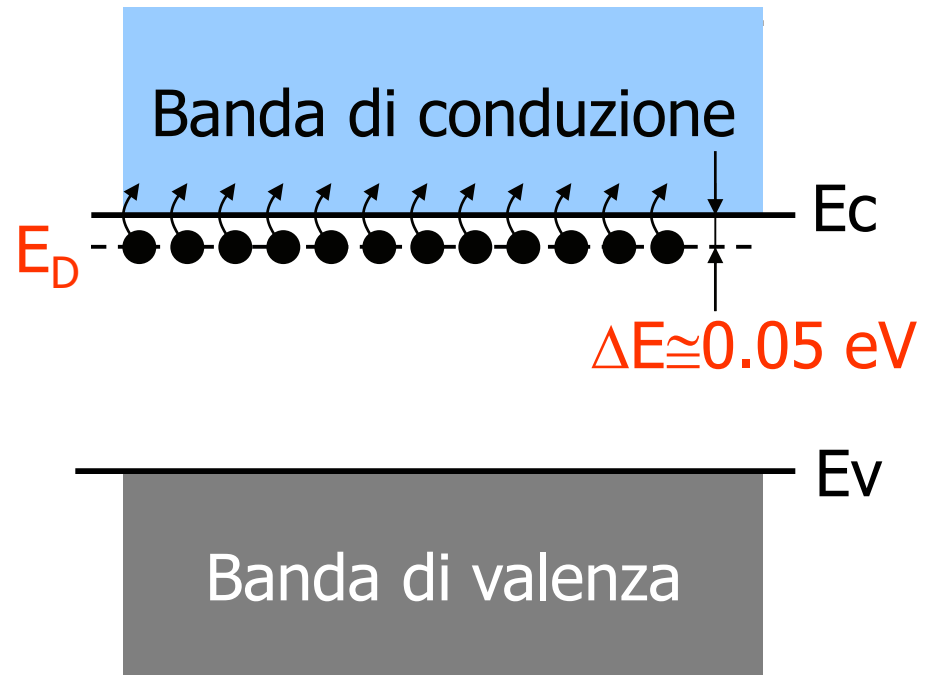
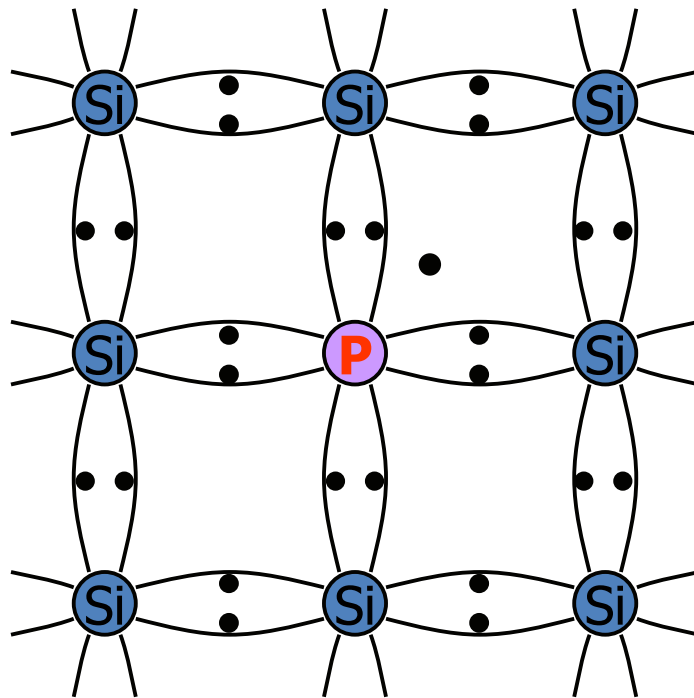


elettrone debolmente legato

L'aggiunta di impurità pentavalenti (Sb, As, P) **introduce elettroni liberi** che non partecipano ai legami covalenti, e **aumentano la conduttività** del semiconduttore.
(non si creano lacune),

Gli atomi del **V** gruppo donano un elettrone e per questo vengono detti: "**donatori**"

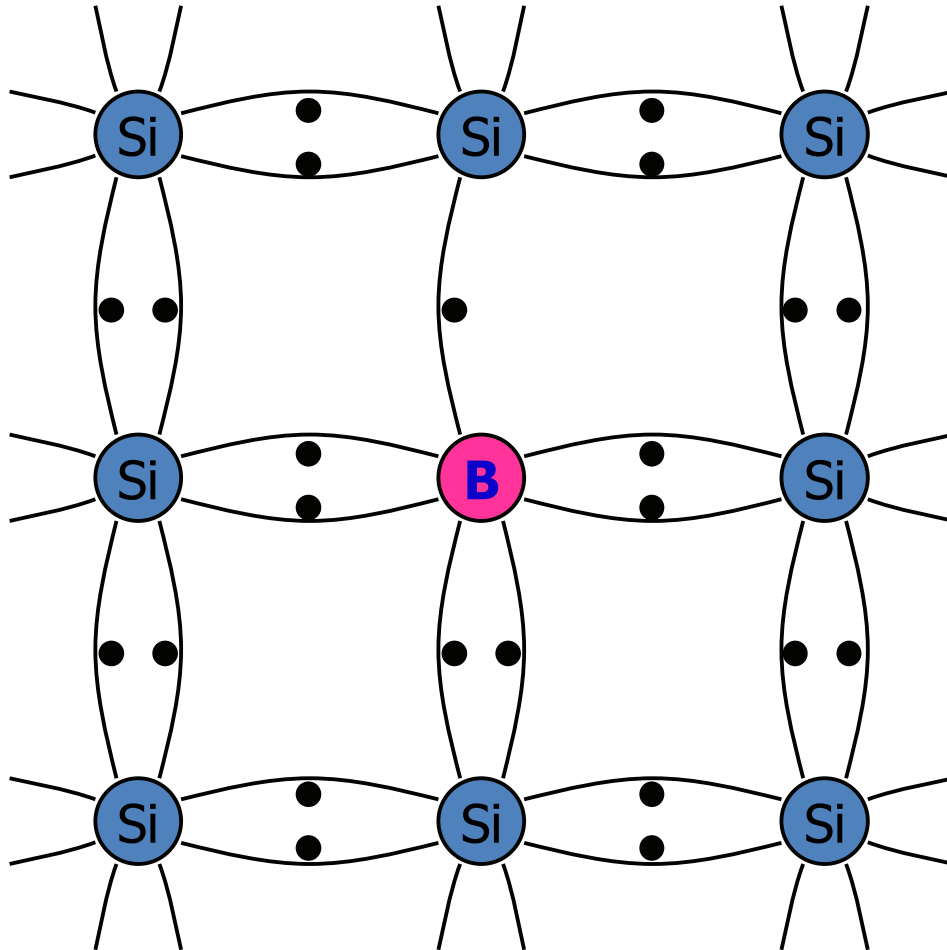
Silicio drogato n con atomi donatori



A $T=300 \text{ K}$ tutti i donatori sono ionizzati. Se introduco $N_D \text{ [cm}^{-3}\text{]}$ (con $N_D \gg n_i$) donatori allora $n \cong N_D$

concentrazione di elettroni liberi

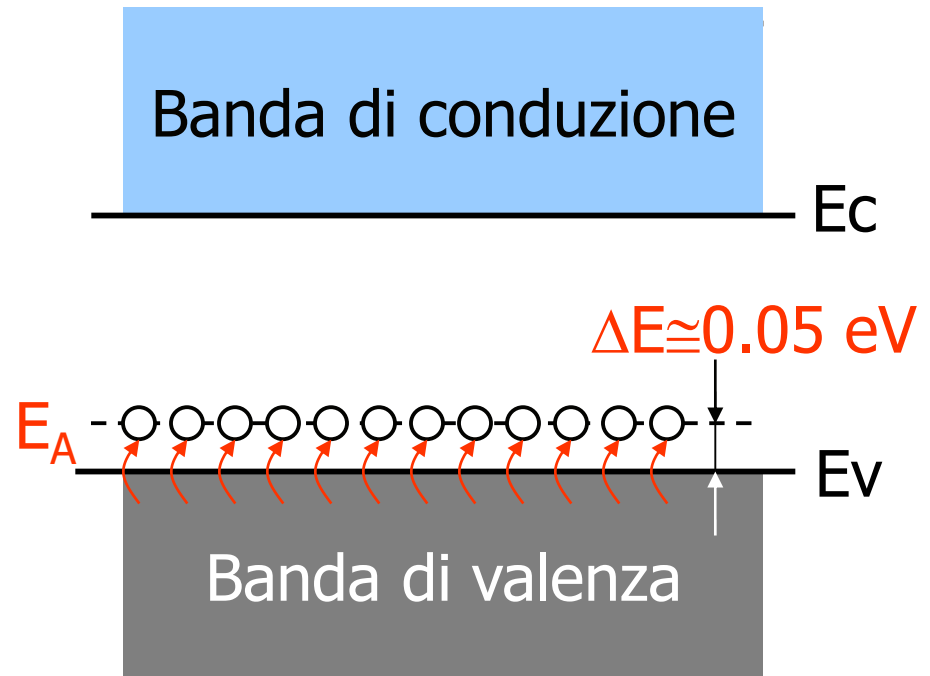
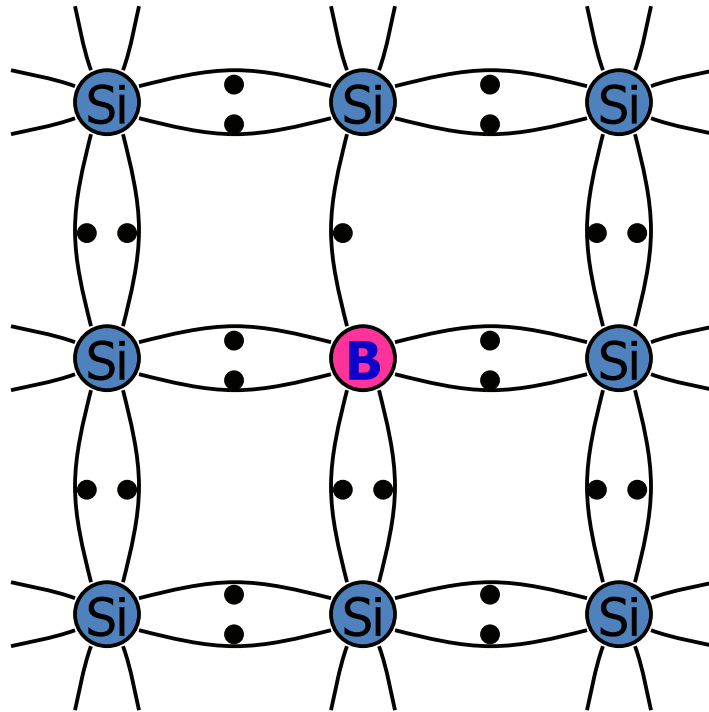
Silicio drogato p – con atomi accettori



L'aggiunta di impurità trivalenti (B, Al, Ga) **crea delle assenze di elettroni di valenza (lacune)** che aumentano la conduttività del semiconduttore.

Gli atomi del **III** gruppo accettano un elettrone e per questo vengono detti: **"accettori"**

Silicio drogato p – con atomi accettori



A $T=300\text{ K}$ tutti gli accettori sono ionizzati. Se introduco $N_A\text{ [cm}^{-3}\text{]}$ (con $N_A \gg n_i$) donatori allora $p \cong N_A$

↳ concentrazione di lacune

Legge di azione di massa : $np = n_i^2(T)$

Attraverso il drogaggio possiamo inserire portatori di un solo tipo (elettroni, oppure lacune), nella concentrazione desiderata (tipicamente da 10^{14} atomi/cm³ fino a 10^{21} atomi/cm³).

Il semiconduttore risulta quindi «drogato» di tipo n (conducibilità dovuta a elettroni) o di tipo p (conducibilità dovuta a lacune)

Si può dimostrare che vale la «legge di azione di massa» : il prodotto tra la concentrazione di elettroni e di lacune dipende solo dalla temperatura e non dal drogaggio

quindi per una data temperatura, in un semiconduttore intrinseco il prodotto $np = n_i^2(T)$

↳ concentrazione di coppie elettroni liberi / lacune

Semiconduttore tipo “n”:

$$n \approx N_D$$
$$p = \frac{n_i^2}{n} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

Esempio:

$$N_D = 10^{18} \left[\text{cm}^{-3} \right], \quad n = 10^{18}, p = 2.1 \cdot 10^2 \left[\text{cm}^{-3} \right]$$

Semiconduttore tipo “p”:

$$p \approx N_A$$
$$n = \frac{n_i^2}{p} \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

Esempio:

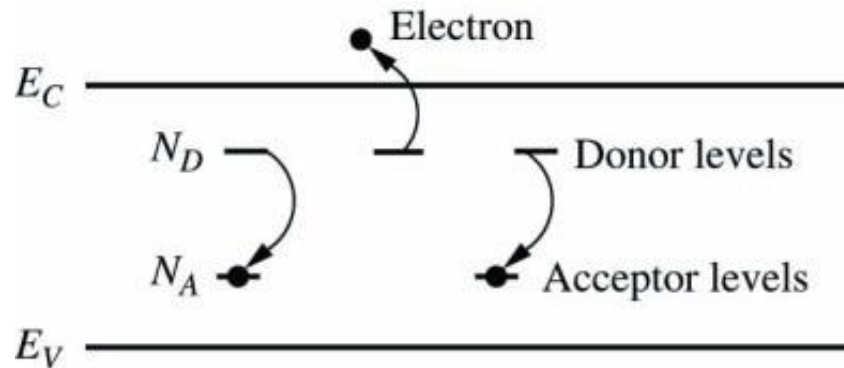
$$N_A = 10^{16} \left[\text{cm}^{-3} \right], \quad p = 10^{16}, n = 2.1 \cdot 10^4 \left[\text{cm}^{-3} \right]$$

$$n_n \gg n_i = p_i \gg p_n \quad \text{e} \quad p_p \gg p_i = n_i \gg n_p$$

Portatori maggioritari e minoritari

- ❑ Se $N_D > N_A$, il materiale è di tipo-n.
Se $N_A > N_D$, il materiale è di tipo-p.
- ❑ I portatori (elettroni o lacune) presenti in concentrazione maggiore si dicono portatori maggioritari, gli altri si dicono portatori minoritari.

Principio di compensazione del drogaggio



Un semiconduttore compensato ha sia drogante di **tipo-n** che di **tipo-p**. Se $N_D > N_A$ gli elettroni forniti dagli atomi donori andranno ad occupare le lacune associate agli atomi accettori; gli elettroni rimanenti, in concentrazione $N_D - N_A$, a temperatura ambiente si troveranno in banda di conduzione.

Carica fissa = donatori e accettori ionizzati

Oltre alla carica mobile, costituita da elettroni e lacune, nel semiconduttore c'è anche la **carica fissa dovuta alle impurezze** :

i **DONATORI** (atomi del gruppo V, come P, As) hanno perso un elettrone e **si sono caricati positivamente**, con una carica positiva pari in modulo a quella dell'elettrone

quindi N_D^+ donatori ionizzati per cm^3 hanno carica $+qN_D^+$ per cm^3

gli **ACCETTORI** (atomi del gruppo III, come B, Sb) hanno acquistato un elettrone (che equivale a cedere una lacuna) e **si sono caricati negativamente**, con una carica negativa pari a quella dell'elettrone

quindi N_A^- accettori ionizzati per cm^3 hanno carica $-qN_A^-$ per cm^3

Il drogaggio non altera la neutralità di carica del semiconduttore:

$$q(N_D + p - N_A - n) = 0$$

Inoltre, per la legge dell'azione di massa, all'equilibrio termodinamico, si ha:

$$pn = n_i^2$$



Concentrazione di elettroni in un semiconduttore di tipo n, drogato con $N_D > N_A$ impurezze (drogato sia con N_D che con N_A)

□ Sostituendo $p = n_i^2/n$ in $q(N_D + p - N_A - n) = 0$ si
ottiene: $n^2 - (N_D - N_A)n - n_i^2 = 0$.

□ Risolvendo in n :

$$n = \frac{(N_D - N_A) \pm \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{2} \quad \text{e} \quad p = \frac{n_i^2}{n}$$

□ Per $(N_D - N_A) \gg 2n_i$ si ha $n \approx (N_D - N_A)$ (maggioritari).

□ $p = n_i^2/(N_D - N_A)$ minoritari

□ quando $n_i \gg (N_D - N_A)$ (ad alta temperatura) si ha
 $n = p = n_i$ (comportamento intrinseco ad alta T)

Semiconduttore *tipo-p*

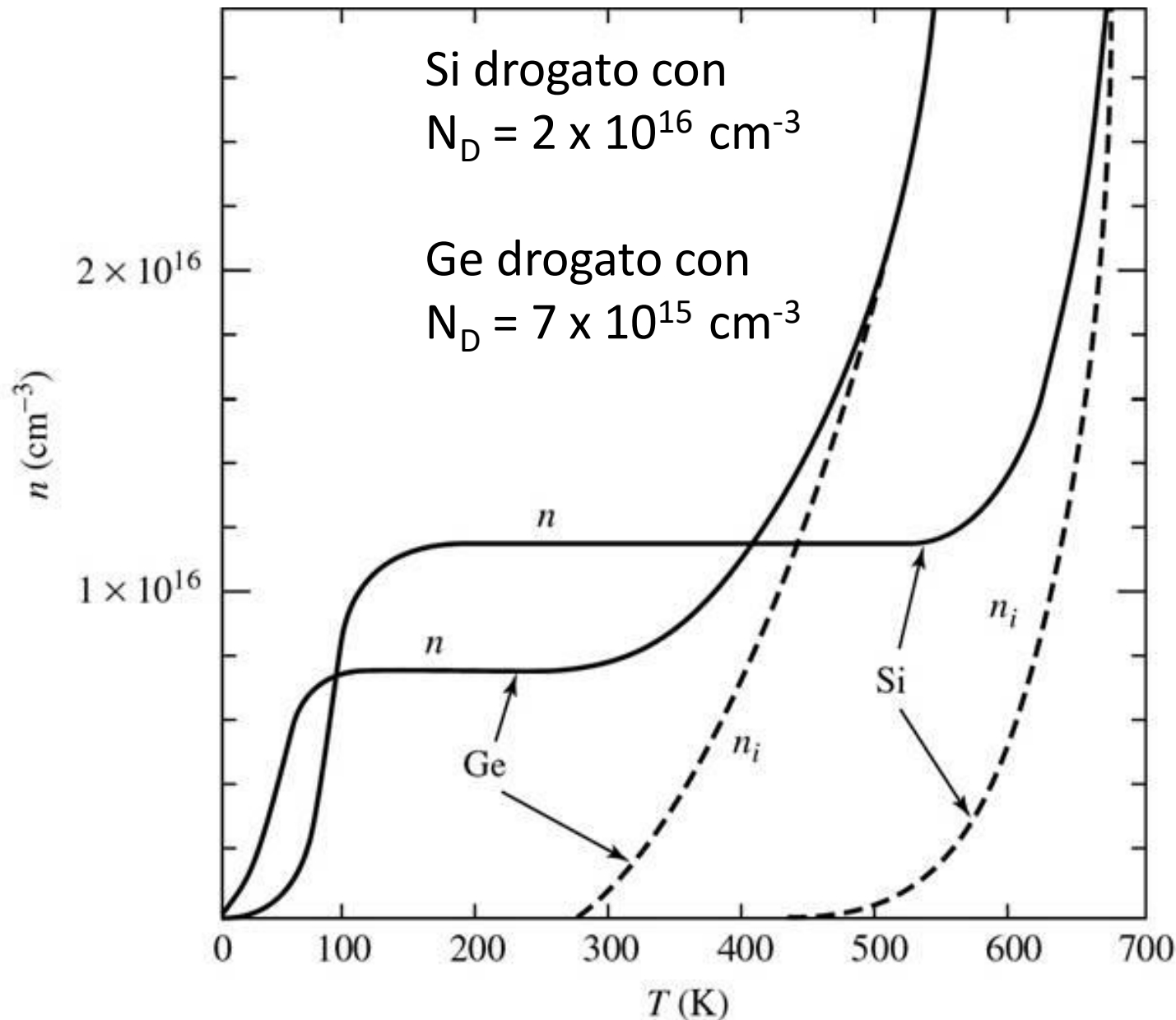
- In modo simile si può ottenere la concentrazione di lacune in un semiconduttore di tipo-p (in presenza di entrambe le specie droganti):

$$p = \frac{(N_A - N_D) \pm \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}}{2} \quad \text{e} \quad n = \frac{n_i^2}{p}$$

- Per $(N_A - N_D) \gg 2n_i$, $p \approx (N_A - N_D)$.

$$n = \frac{n_i^2}{N_A - N_D}$$

Concentrazione di elettroni vs T (Silicio e Germanio)



ad alta T prevale
la generazione
di coppie e-h
«intrinseca»

a bassissima T
neppure i
donatori sono
ionizzati: è come
se il drogaggio
non ci fosse

Trasporto di carica nei semiconduttori

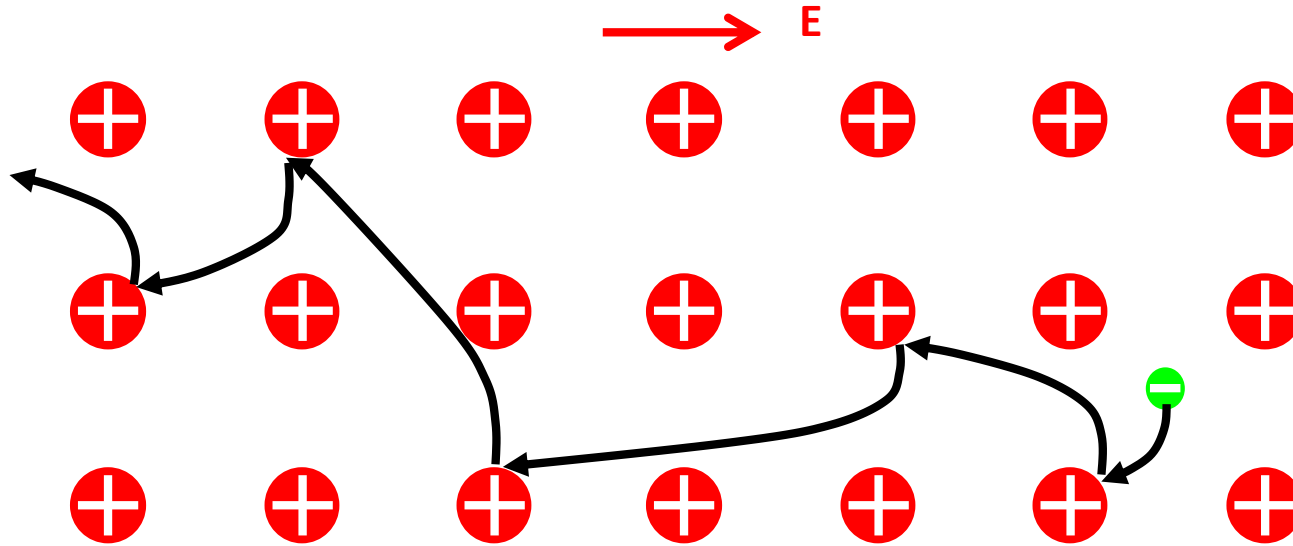
- ◆ I portatori di carica (elettroni in banda di conduzione, lacune in banda di valenza) sono debolmente legati agli ioni del reticolo cristallino
- ◆ A temperatura $T > 0$ K si muovono per agitazione termica in modo casuale \Rightarrow lo spostamento medio è nullo
- ◆ In presenza di un campo elettrico E , al moto termico casuale si sovrappone un moto di deriva nella direzione del campo (con verso opposto per gli elettroni, concorde per le lacune)

Teorema della massa efficace

- Il moto degli elettroni in un cristallo perfetto può essere descritto dalle leggi della meccanica classica riferite ad un elettrone che si muove nel vuoto se si sostituisce la massa dell'elettrone nel vuoto m_0 con una «massa efficace» m_n^* che tiene conto della natura del cristallo entro il quale si muove l'elettrone

Velocità di deriva = velocità dovuta al campo elettrico

Modello semplificato della velocità di deriva



Ipotesi:

- il moto degli elettroni ha una componente dovuta all'agitazione termica e una dovuta al campo elettrico
- il vettore velocità termica ha media nulla
- immediatamente dopo un urto con il reticolo, la velocità dell'elettrone ha solo la componente termica
- tra due urti, alla componente termica si sovrappone un moto uniformemente accelerato dovuto al campo E

Modello semplificato per la velocità di deriva

$$F\Delta t = m\Delta v \text{ (teorema dell'impulso)}$$

$$-qE\tau = m_n^* v_d$$

$$v_d = -(q\tau/m_n^*)E = -\mu_n E$$

dove

τ = tempo medio tra gli urti

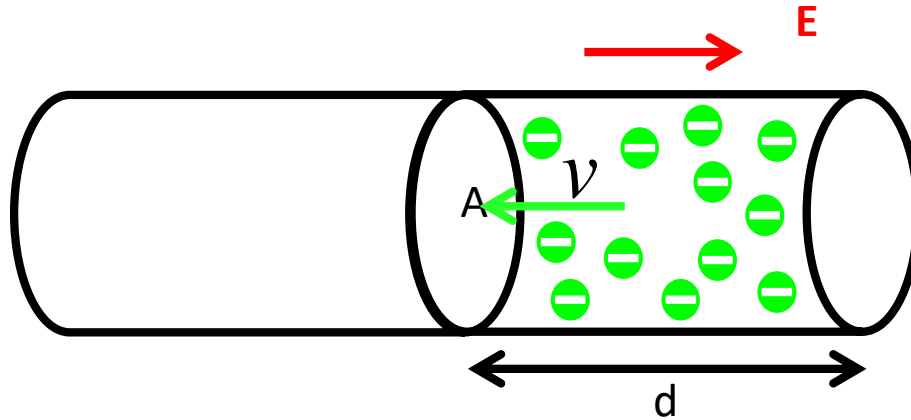
E = campo elettrico

q = carica dell'elettrone

m_n^* = massa efficace dell'elettrone

$\mu_n = (q\tau/m_n^*)$ = mobilità dell'elettrone [$\text{cm}^2/(\text{V}\times\text{s})$]

Corrente di deriva



A = area della sezione perpendicolare al moto degli elettroni

$A \cdot d$ = volume di semiconduttore preso in considerazione

v = velocità di deriva degli elettroni

$t = d/v$ = tempo che gli elettroni contenuti nel volume $A \cdot d$
impiegano ad attraversare la sezione A

N = numero medio di elettroni nel volume $A \cdot d$

I = corrente attraverso la sezione A

$$I = \frac{Q}{t} = -\frac{q \cdot N}{t} = -\frac{q \cdot N \cdot v}{d} = \frac{A \cdot q \cdot N \cdot \mu_n \cdot E}{A \cdot d} = A \cdot q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E$$

Corrente di deriva (dovuta al campo elettrico)

Velocita' $v \propto E$

Velocita' delle lacune

$$v = \mu_p E$$

Diagram showing the relationship between the variables in the equation $v = \mu_p E$:

- v : Velocita' (cm/s)
- μ_p : Mobilita'
- E : Campo E

Velocita' degli elettroni

$$v = -\mu_n E$$

Sono **velocita' medie**
Collisioni e urti!!!

$$J_{\text{drift}} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$$

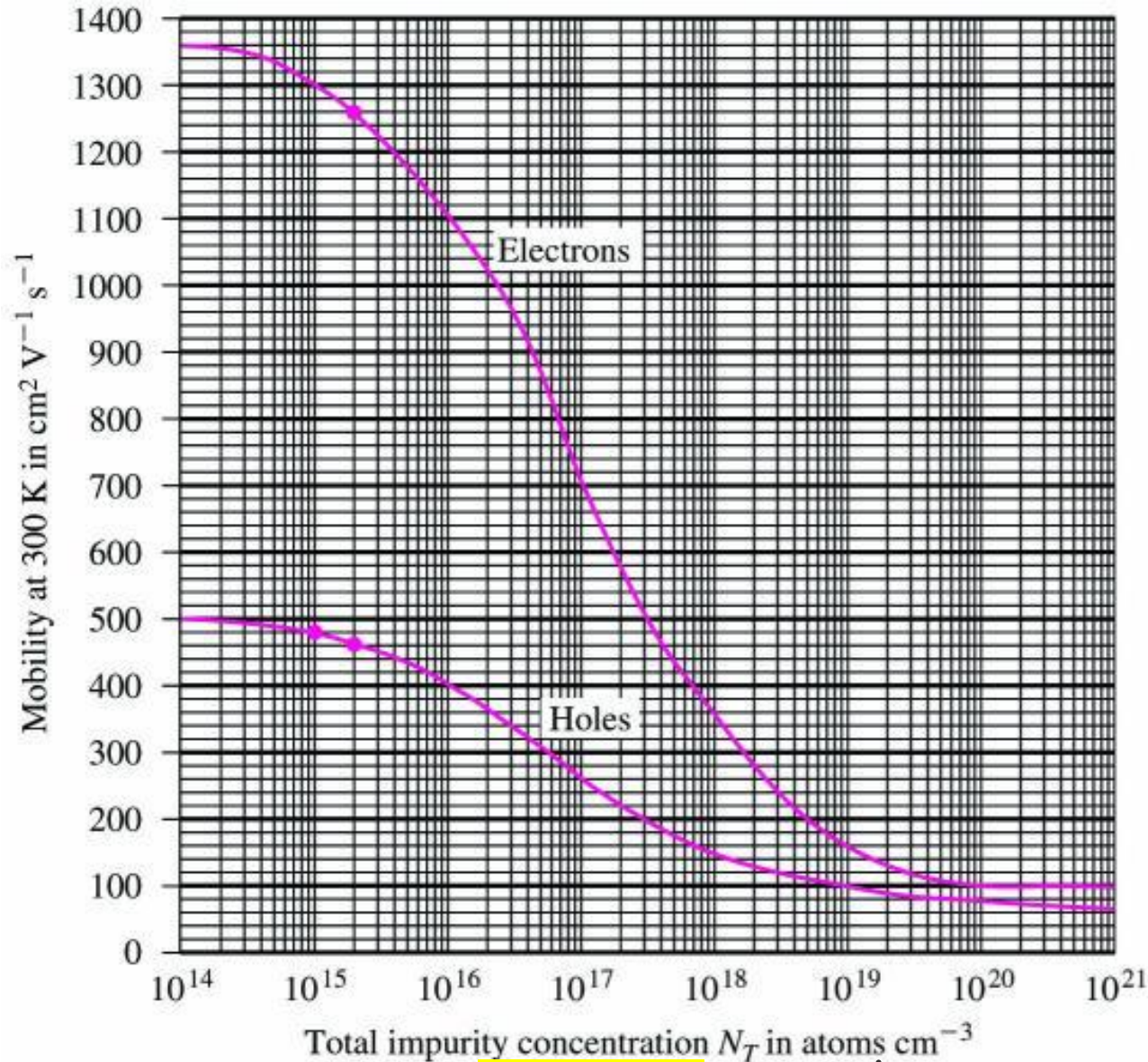
$$J_{\text{drift}} = \sigma E$$

Conducibilità

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(p\mu_p + n\mu_n)}$$

Resistività

La mobilità dipende dal drogaggio e dalla temperatura



$$N_D + N_A$$

→ Aumentando la impurezza, deformato il reticolo, diminuendo la mobilità

Mobility approximations

$$\mu_n = 92 + \frac{1270}{1 + \left(\frac{N_T}{1.3 \times 10^{17}} \right)^{0.91}}$$

$$\mu_p = 48 + \frac{447}{1 + \left(\frac{N_T}{6.3 \times 10^{16}} \right)^{0.76}}$$

Si intrinseco vs Si drogato

(Puro)

Silicio intrinseco:

$$n = p = n_i = 1.45 \cdot 10^{10} [\text{cm}^{-3}]$$

$$\rho_{i\text{-Si}} = \frac{1}{q(p\mu_p + n\mu_n)} \cong 2 \cdot 10^5 [\Omega \cdot \text{cm}]$$

Silicio tipo “n”:

$$N_D = 10^{18} [\text{cm}^{-3}], \quad n = 10^{18}, p = 2.1 \cdot 10^2 [\text{cm}^{-3}]$$

$$\rho_{n\text{-Si}} \cong \frac{1}{qn\mu_n} \cong 1.6 \cdot 10^{-2} [\Omega \cdot \text{cm}]$$