



Dispositivi elettronici

I semiconduttori



Sommario

Richiami sui semiconduttori

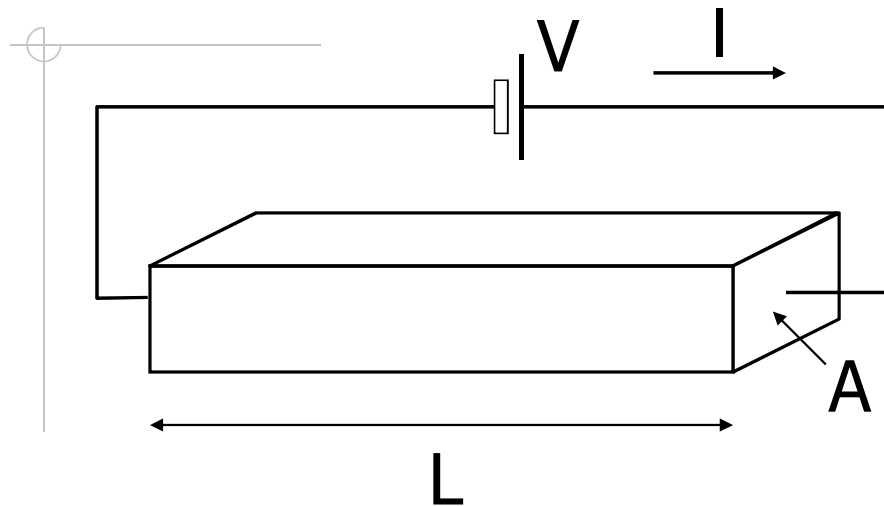
conduttori, isolanti e semiconduttori

bande di energia

droganti nei semiconduttori

corrente di deriva e diffusione

Conduttori, isolanti e semiconduttori



Resistenza

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

Resistività

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

Classificazione:

ISOLANTI

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

SEMICONDUTTORI

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

CONDUTTORI

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

L'atomo di Bohr

- ◆ Gli elettroni di un atomo non possono possedere un valore qualsiasi di energia (meccanica classica) ma soltanto valori discreti. Nel suo stato discreto di energia l'elettrone non emette radiazione (stato *stazionario* o *non radiativo*)
- ◆ Nella transizione tra due diversi stati stazionari, viene emessa una radiazione (fotone) di frequenza pari a:

$$f = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad [\text{Hz}]$$

$$h = \text{costante di Plank} \\ 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

- ◆ Uno stato stazionario è determinato dalla condizione che il momento angolare dell'elettrone assume i seguenti valori quantizzati:

$$mvr = \frac{nh}{2\pi}$$

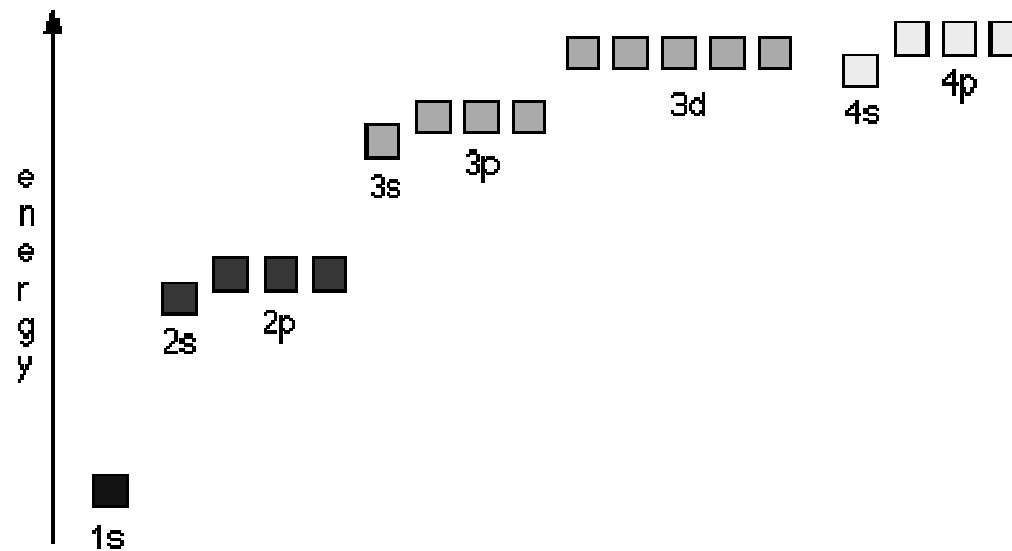
Numeri quantici

- ◆ L'intuizione di Bohr è stata confermata da Schrödinger, che ha sviluppato un'equazione d'onda che descrive la densità di probabilità di trovare, in un determinato punto nello spazio, un elettrone avente una determinata energia totale E
- ◆ La funzione d'onda che descrive ciascun elettrone di ogni atomo (orbitale) richiede 4 numeri detti numeri quantici: n, ℓ, m_ℓ, m_s
 - $n = 1, 2, 3, \dots$ (n.q. principale, indica il livello energetico dell'orbitale)
 - $\ell = 0$ (s), 1 (p), 2 (d), $\dots, (n-1)$ (n.q. azimutale, indica la forma dell'orbitale)
 - $m_\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$ (n.q. magnetico, indica l'orientamento)
 - $m_s = \pm 1/2$ (spin)

Numeri quantici

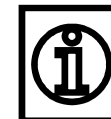
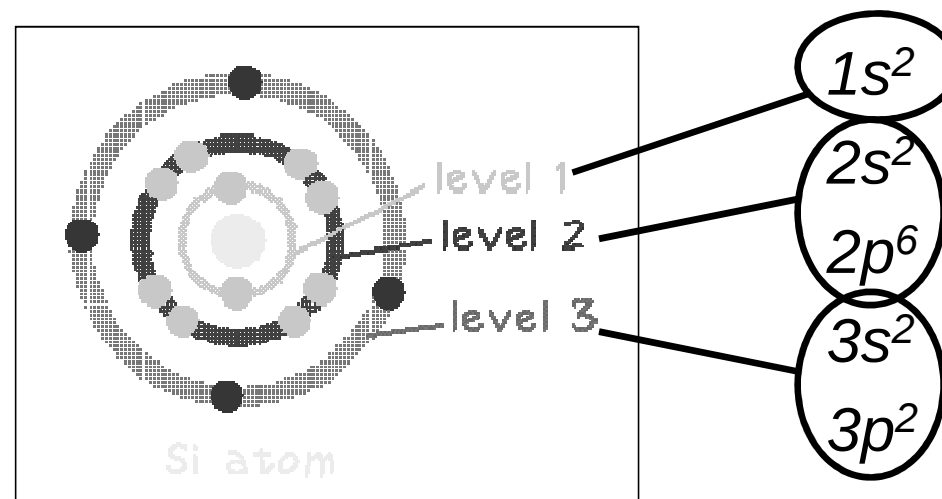
Principio di esclusione di Pauli:

“due elettroni non possono avere il medesimo set di numeri quantici”



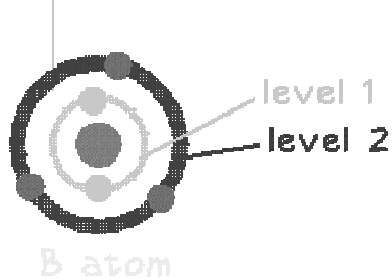
Proprietà del silicio (N° atomico = 14)

Il Silicio (come pure il Germanio, n.a. 32) forma reticoli cristallini le cui proprietà elettriche possono essere modificate sostanzialmente con una limitata sostituzione di atomi (drogaggio)

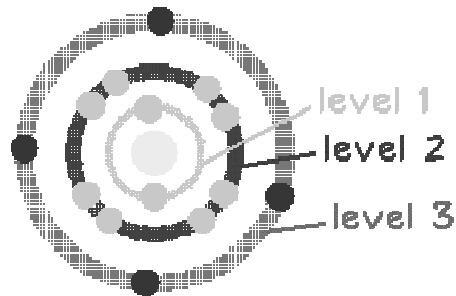


Elettroni di valenza

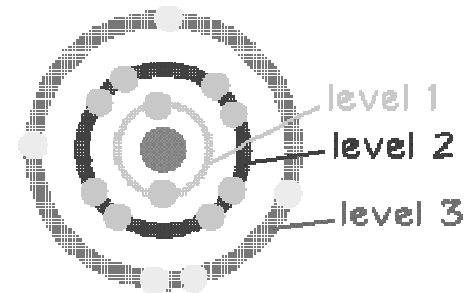
Gli elettroni nello strato esterno di un atomo sono detti elettroni di valenza. Tali elettroni hanno effetto sulle reazioni chimiche dell'atomo e determinano le proprietà elettriche dell'elemento.



**Atomo di
Boro
3e valenza**



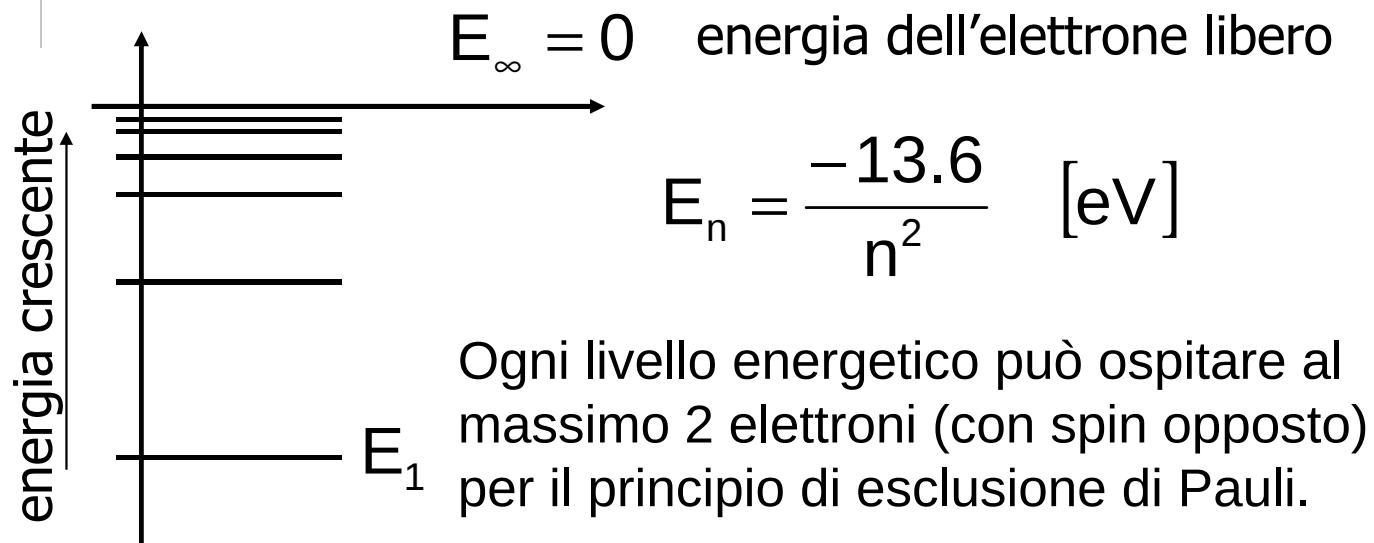
**Atomo di
Silicio
4e valenza**



**Atomo di
Fosforo
5e valenza**

Modello a Bande

Secondo la meccanica quantistica, i livelli energetici permessi agli elettroni sono:

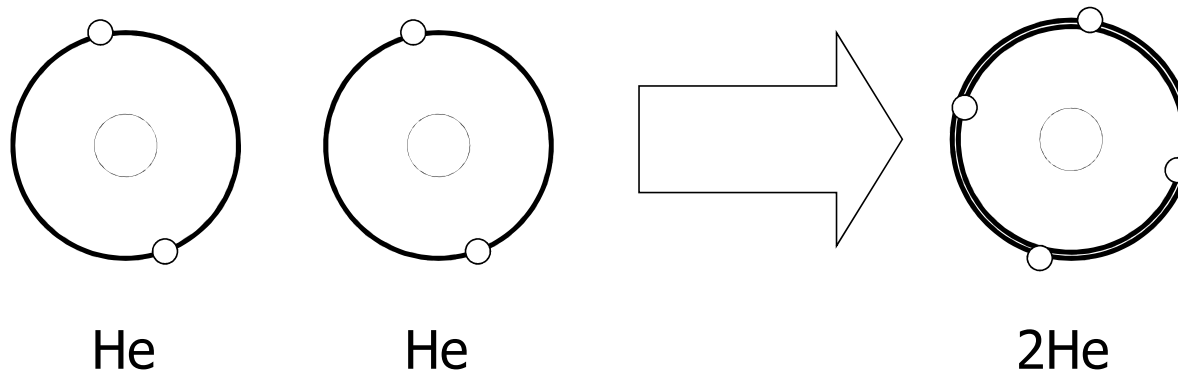


Modello a Bande

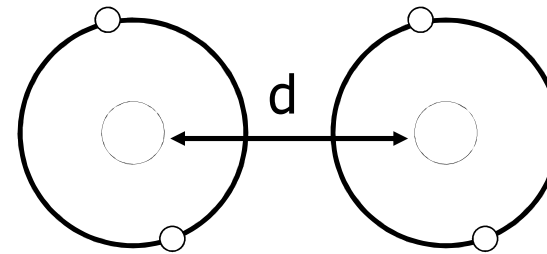
Pensiamo di avvicinare due atomi di He (2e, 2p, 2n).

Si avrà interazione tra gli atomi e la relazione: $E_n = \frac{-13.6}{n^2}$ [eV] non vale più.

Quando i due atomi si uniscono a formare un unico sistema, ci saranno 4 elettroni da sistemare nel livello E_1 . Per soddisfare il principio di esclusione di Pauli, il livello E_1 si sdoppia:

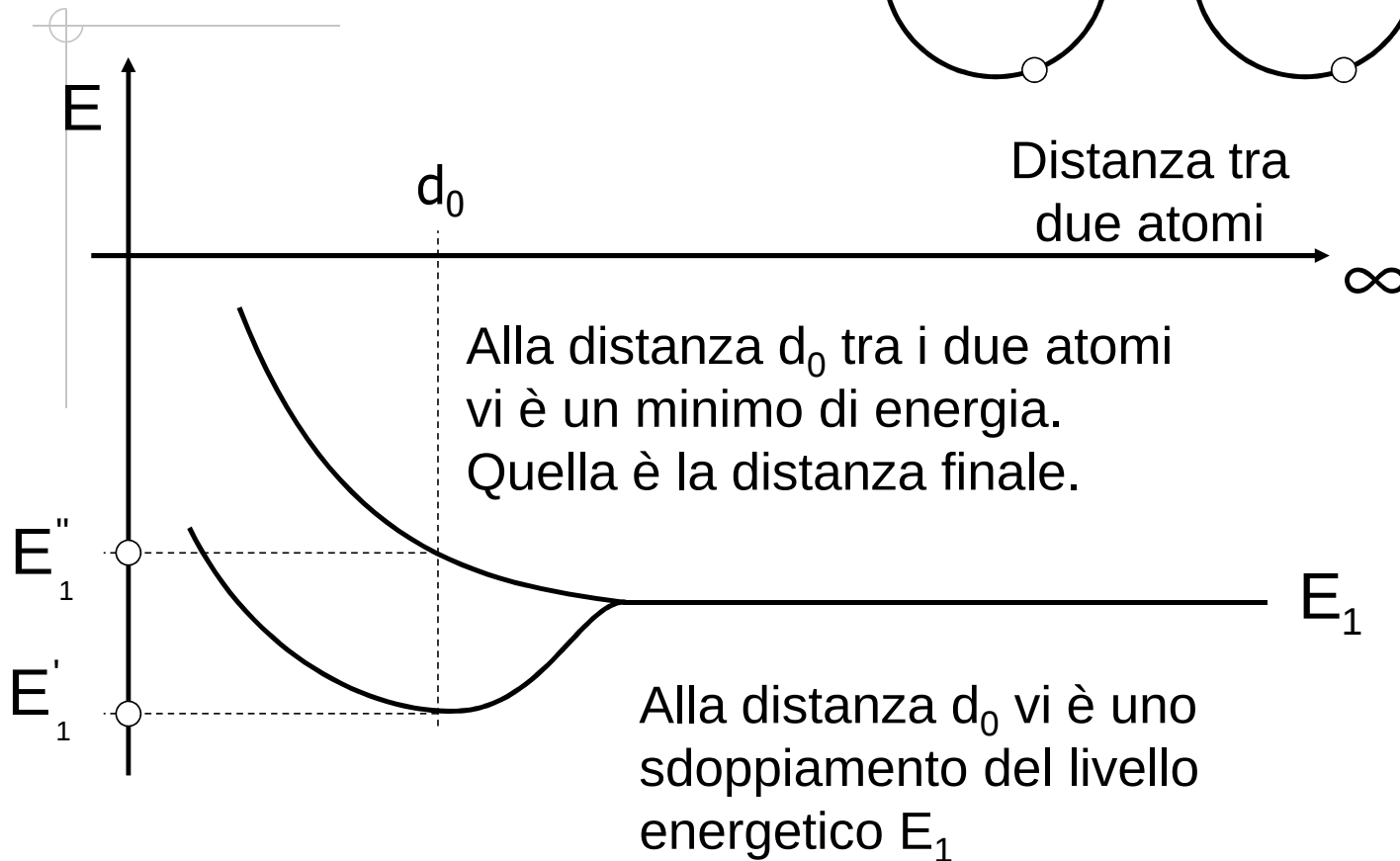


Modello a Bande



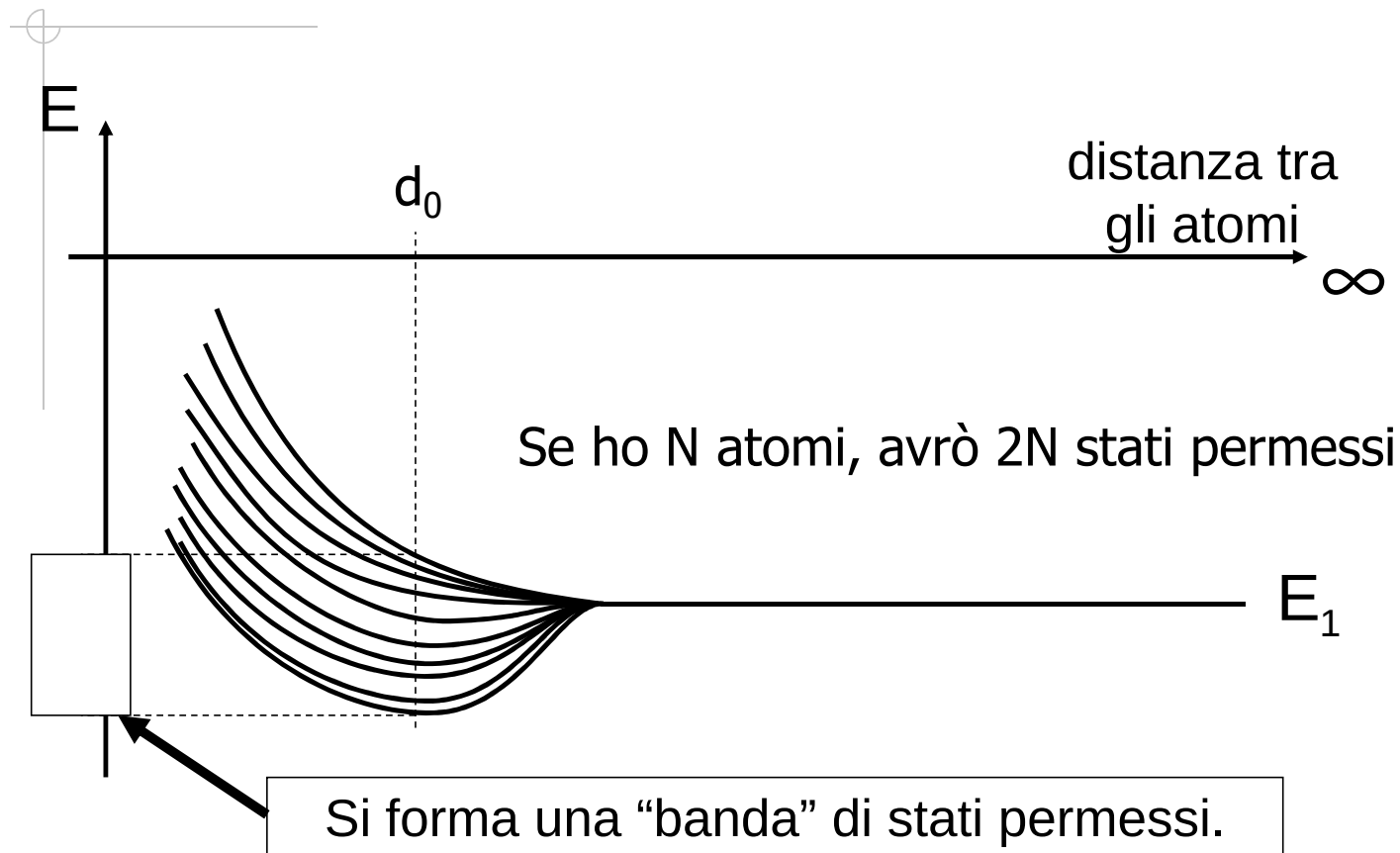
Distanza tra
due atomi

∞

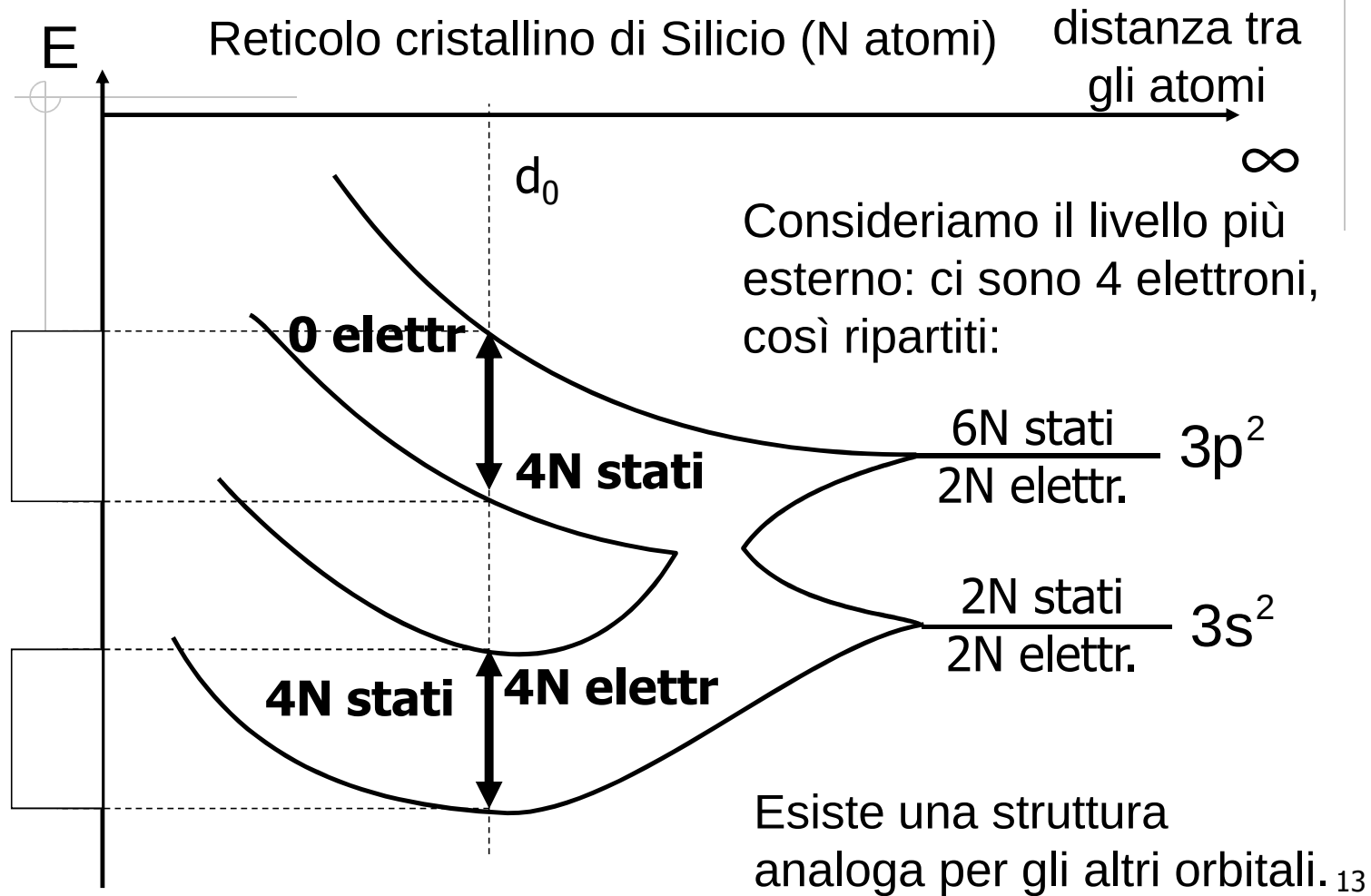


Modello a Bande

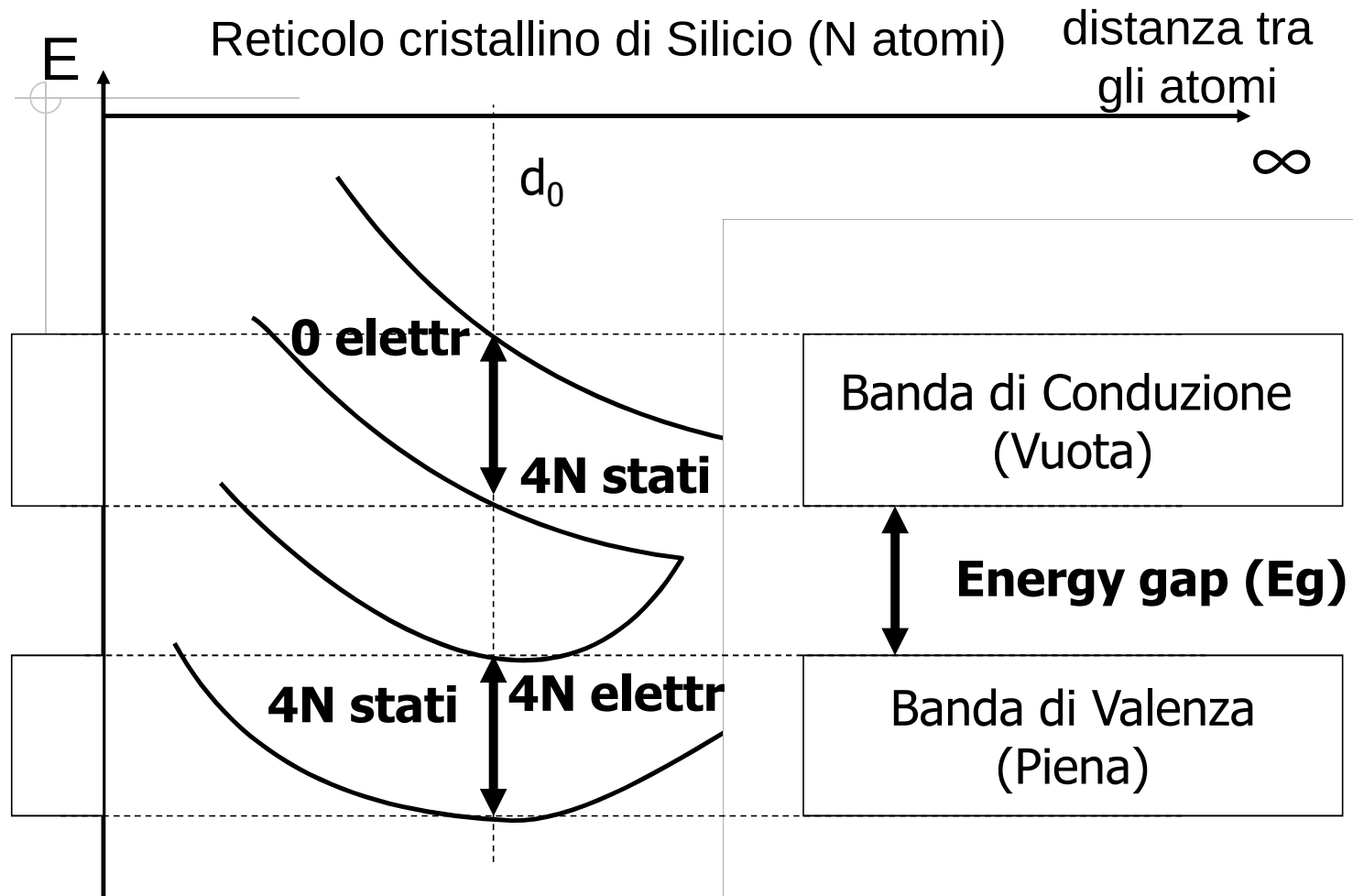
Avviciniamo ora N atomi:



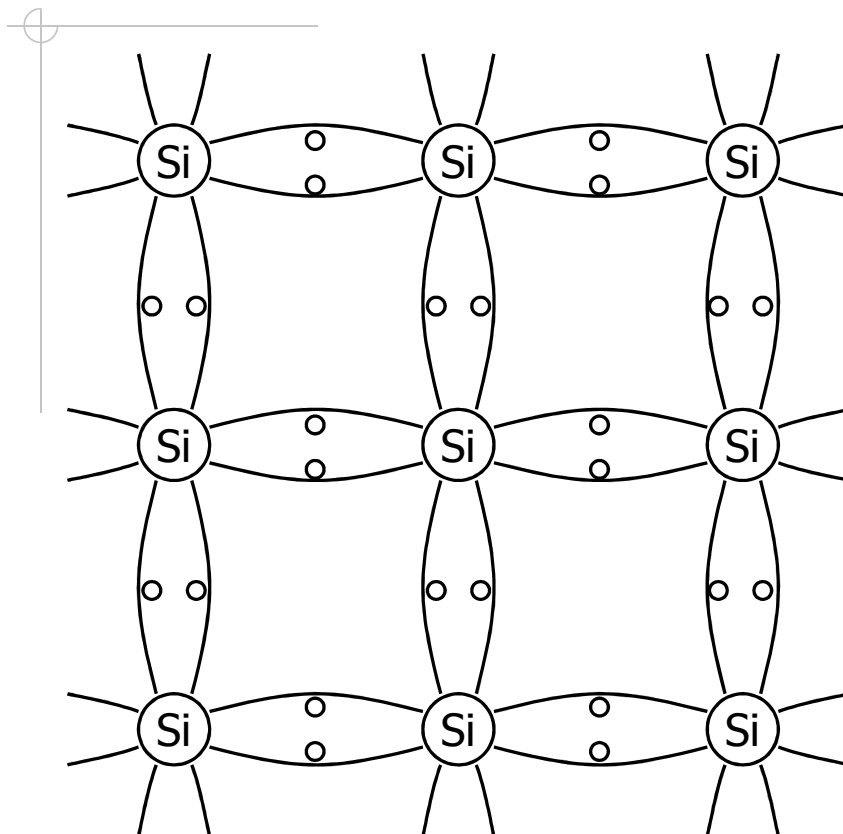
Modello a Bande



Modello a Bande



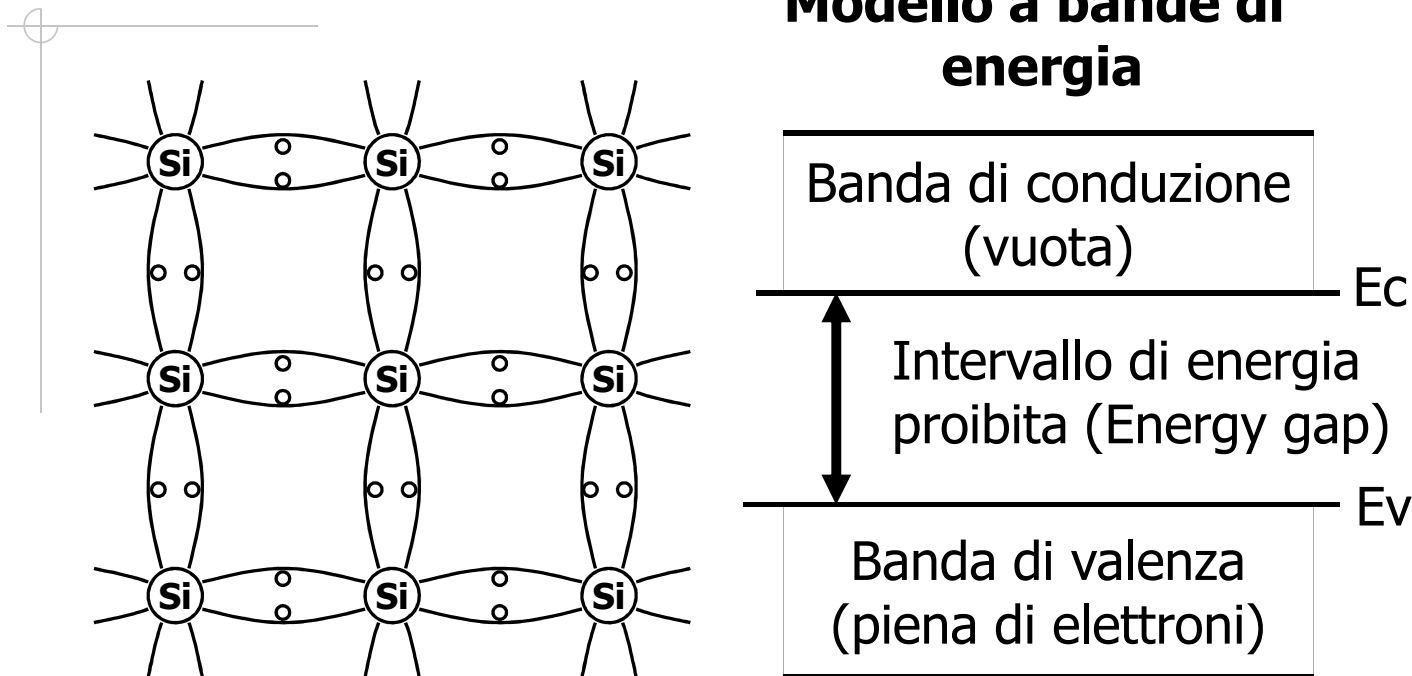
Cristallo di silicio (a $T=0$ K)



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

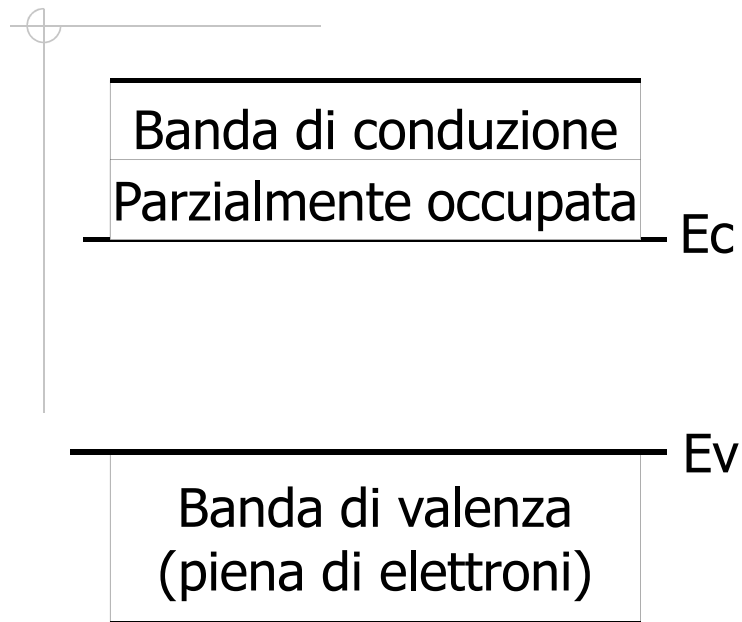
In questo modo ogni atomo completa l'orbitale esterno (con 8 elettroni)

Cristallo di silicio (a $T=0$ K)



In queste condizioni, applicando una piccola differenza di potenziale, non ci sarà movimento di elettroni in quanto questi sono saldamente vincolati agli atomi!

Metalli

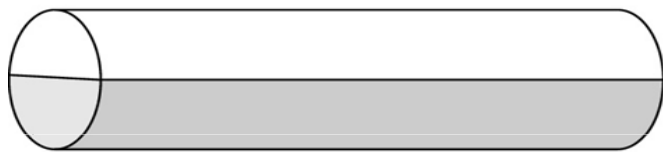


Per avere conduzione (movimento di cariche) ci devono essere livelli energetici liberi e la possibilità di raggiungerli.

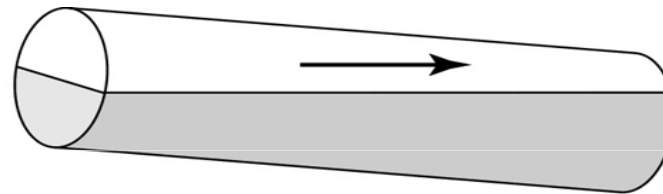
Nei metalli, gli elettroni dell'orbitale più esterno sono debolmente legati agli atomi e sono liberi di muoversi nel reticolo.

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

Equivalente idraulico: bottiglia mezza piena che, se inclinata, comporta spostamento di liquido! La bottiglia piena (o vuota), se inclinata, non comporta alcuno spostamento di liquido.



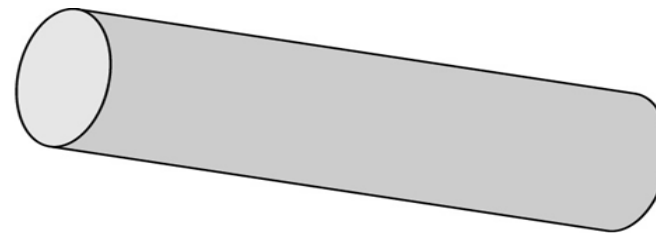
(a)



(b)

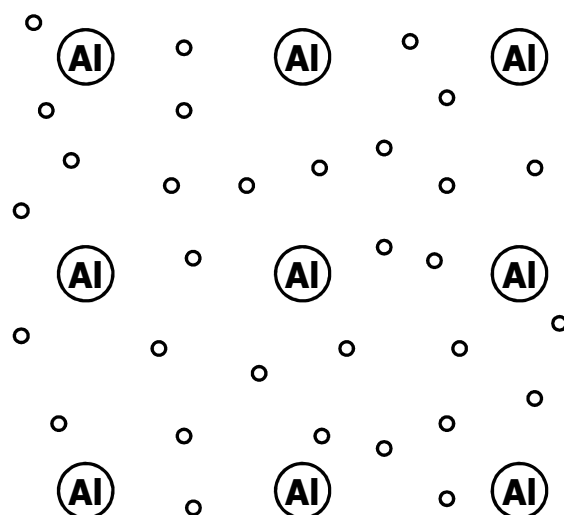


(a)



(b)

Metalli



Gli elettroni dell'orbitale più esterno sono debolmente legati agli atomi.

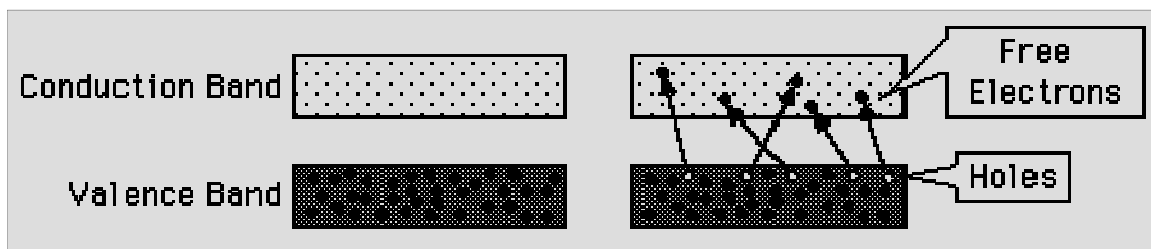
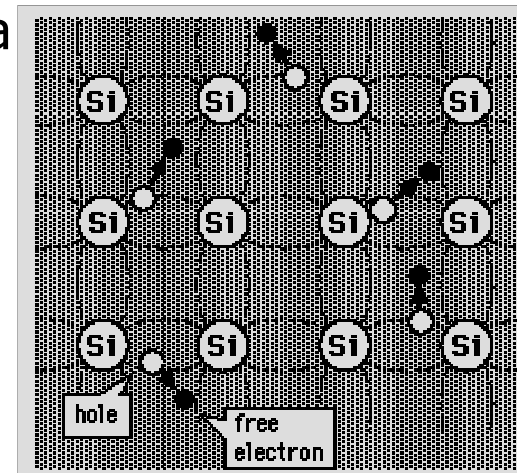
(Concetto di gas elettronico)

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

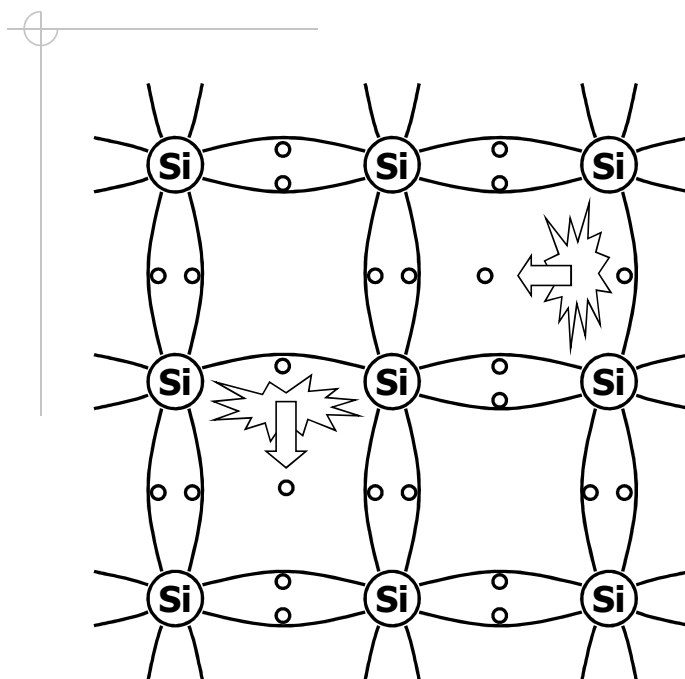
Semiconduttori intrinseci

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, passando dalla banda di conduzione.

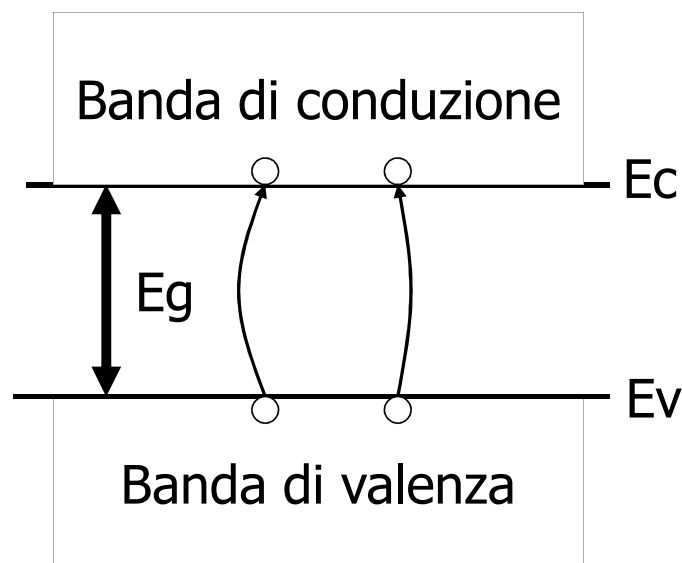
L'elettrone abbandona l'atomo relativo (che diventa uno ione carico positivamente) lasciandosi dietro un legame incompleto detto *lacuna*.



Cristallo di silicio



Modello a bande di energia



Per rompere il legame covalente (e originare una coppia elettrone/lacuna) serve una quantità minima di energia pari a E_g .

Semiconduttori intrinseci

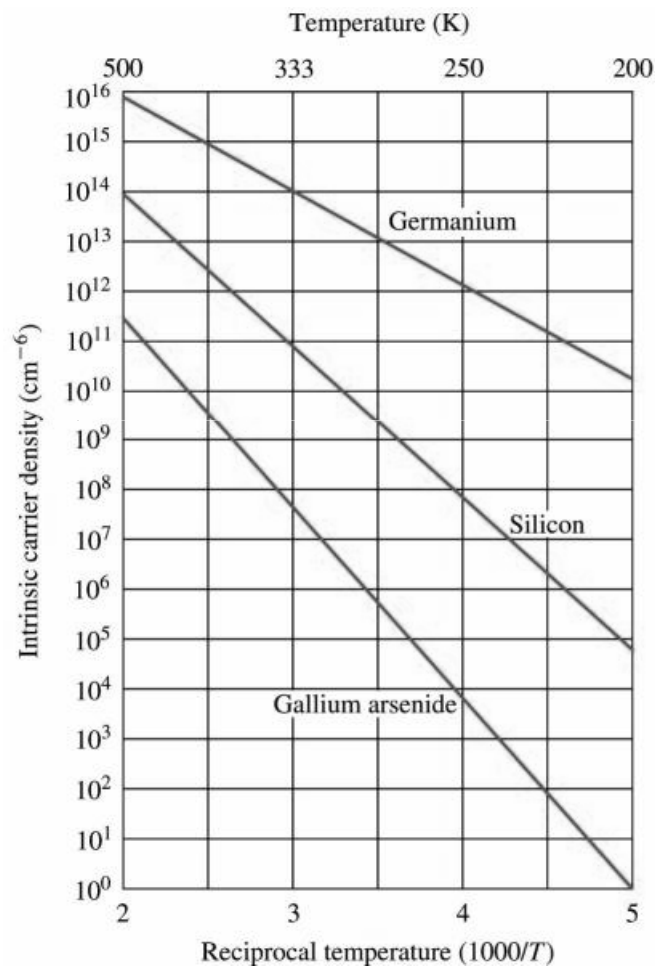
A temperatura ambiente (25° C) la densità di elettroni presenti in un semiconduttore intrinseco (n_i) che statisticamente (in un equilibrio dinamico) si trovano in banda di conduzione è dell'ordine di **10^{10} elettroni/cm³**.

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

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

$$n = p = n_i$$

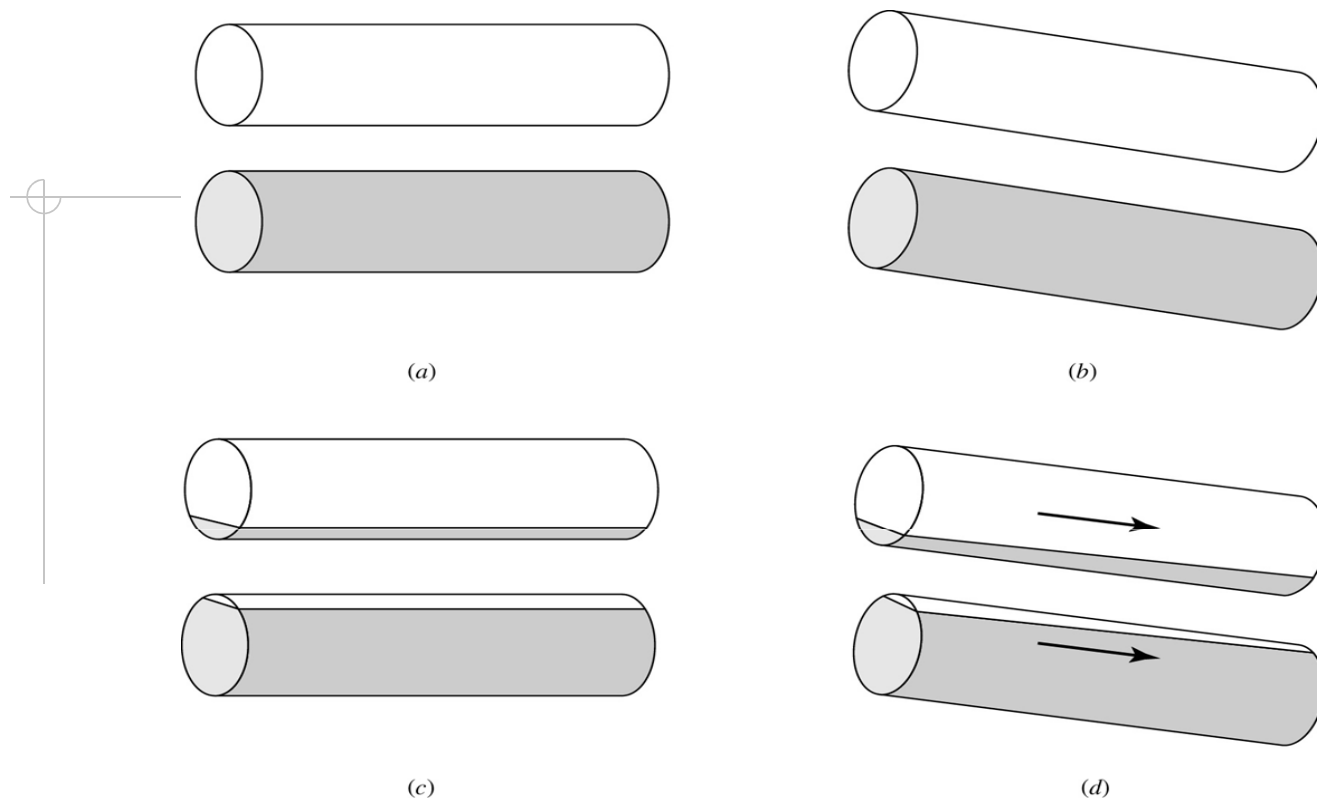


◆ $n = \text{densità di elettroni}$
(elettroni/ cm^3). $n = n_i$ per
un materiale intrinseco.

◆ $n_i^2 \approx 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ per Si

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

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



Analogia tra semiconduttore e fluido.

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

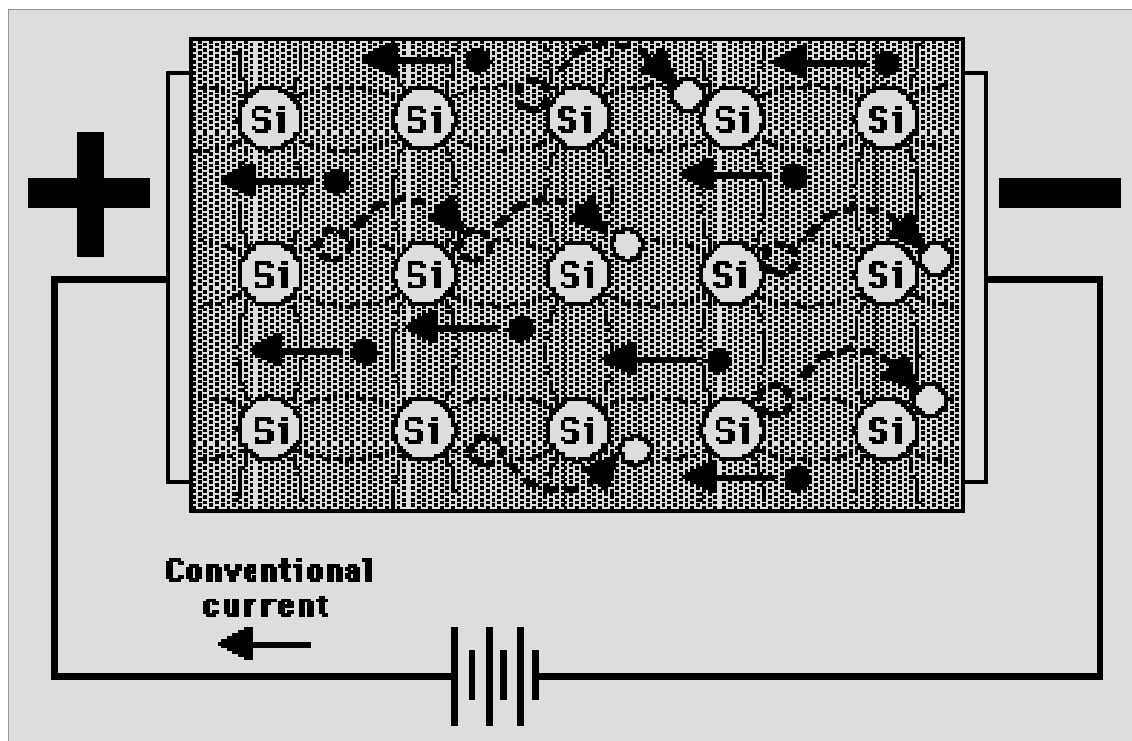
(c) e (d) Si ha movimento di fluido nel caso in cui una parte del fluido del contenitore inferiore sia stata spostata in quello superiore.

Materiali Semiconduttori

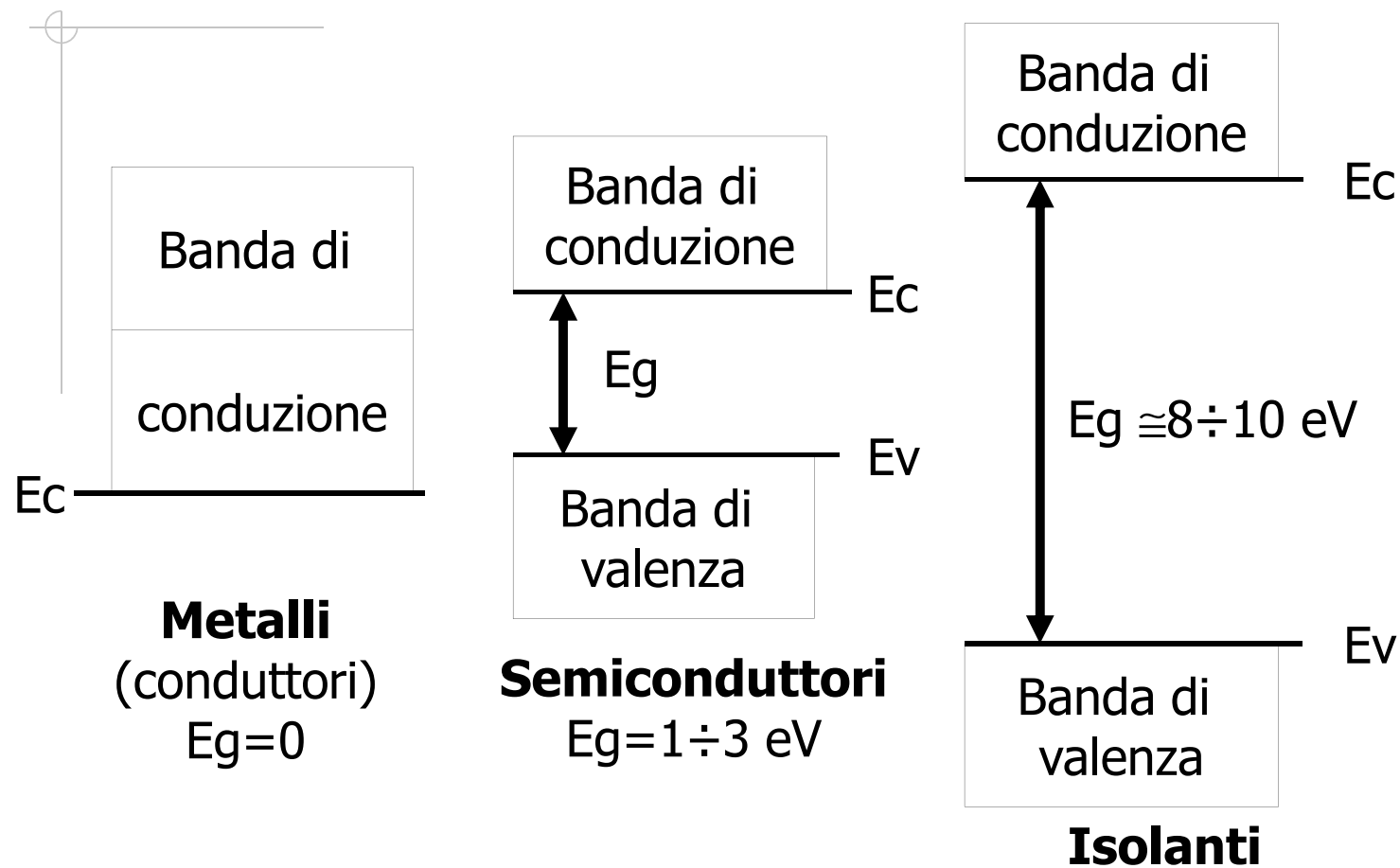
Semiconductor	Bandgap Energy E_G (eV)
Carbon (diamond)	5.47
Silicon	1.12
Germanium	0.66
Tin	0.082
Gallium arsenide	1.42
Gallium nitride	3.49
Indium phosphide	1.35
Boron nitride	7.50
Silicon carbide	3.26
Cadmium selenide	1.70

		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
IIB					
30 65.37 Zn Zinc	31 69.72 Ga Gallium	32 72.59 Ge Germanium	33 74.922 As Arsenic	34 78.96 Se Selenium	
48 112.40 Cd Cadmium	49 114.82 In Indium	50 118.69 Sn Tin	51 121.75 Sb Antimony	52 127.60 Te Tellurium	
80 200.59 Hg Mercury	81 204.37 Tl Thallium	82 207.19 Pb Lead	83 208.980 Bi Bismuth	84 (210) Po Polonium	

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

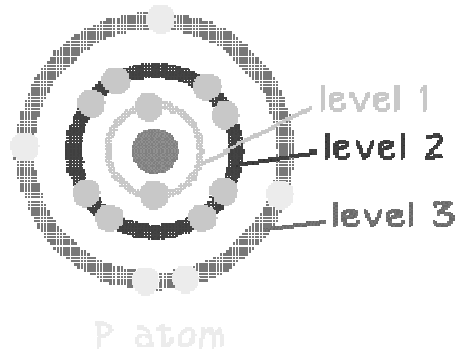


Conduttori, Semiconduttori e Isolanti



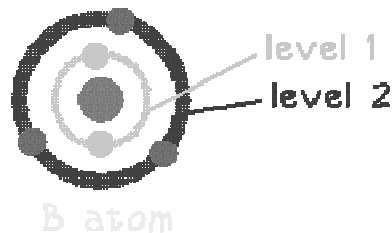
Semiconduttori drogati

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

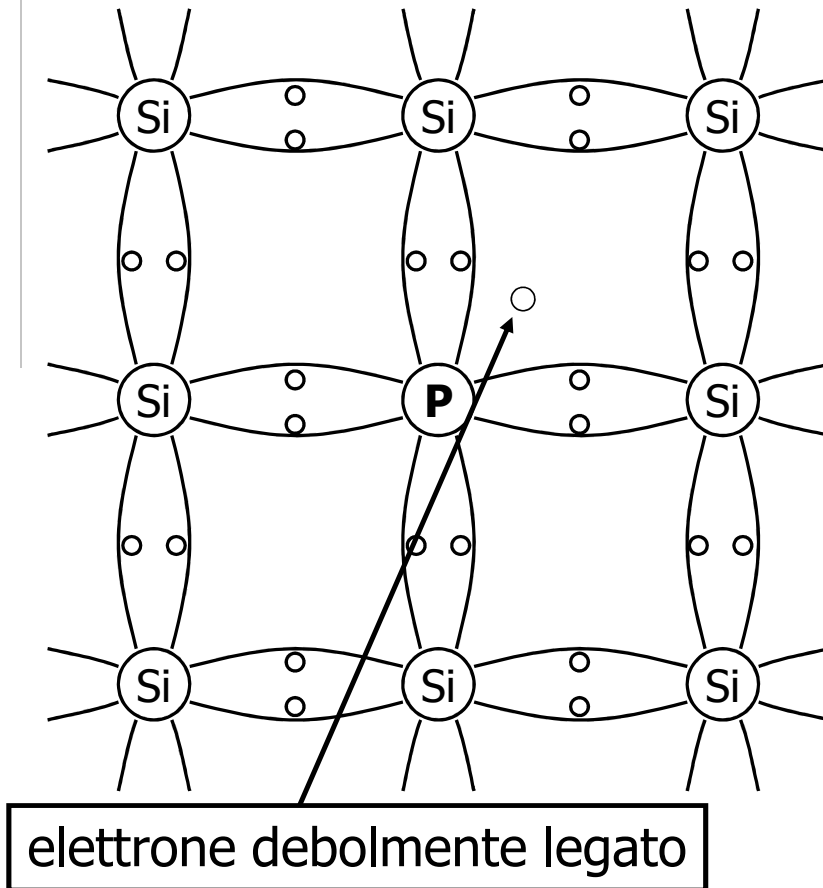
(5 elettroni di valenza)
fornisce 1 elettrone
aggiuntivo (**donatore**).
Drogaggio di tipo n



BORO

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

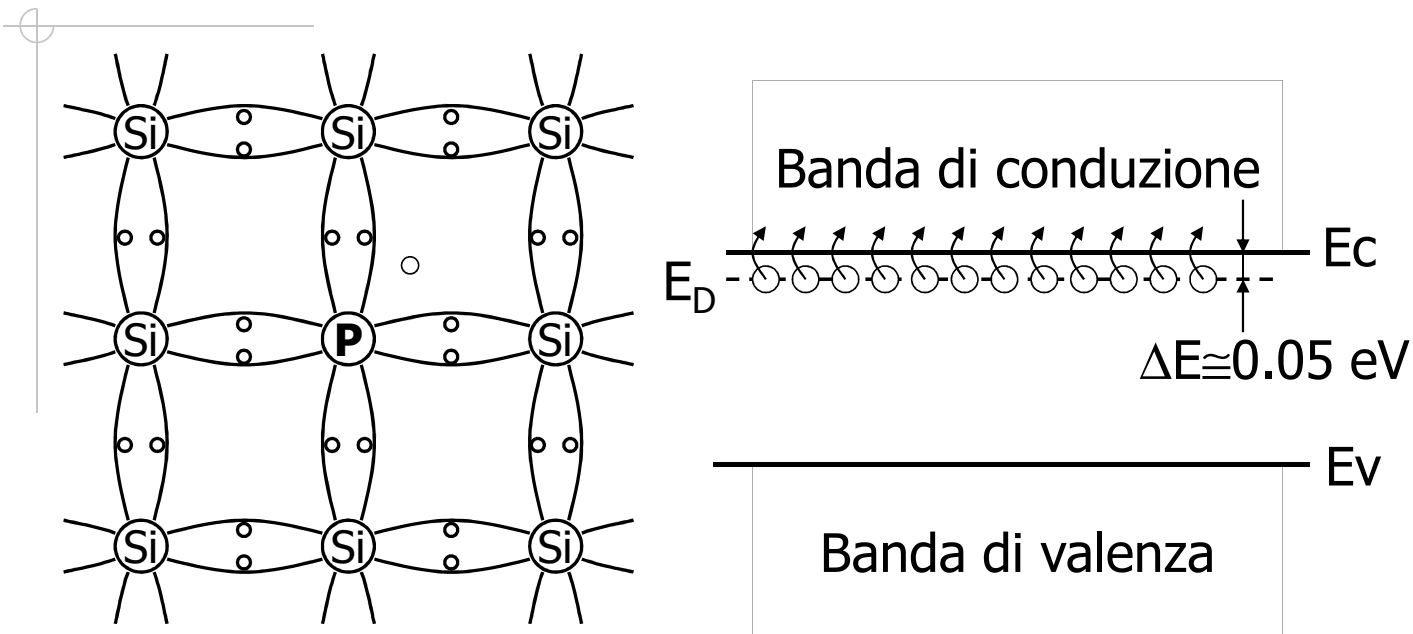
Silicio drogato “tipo n” Con atomi “donatori”



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),

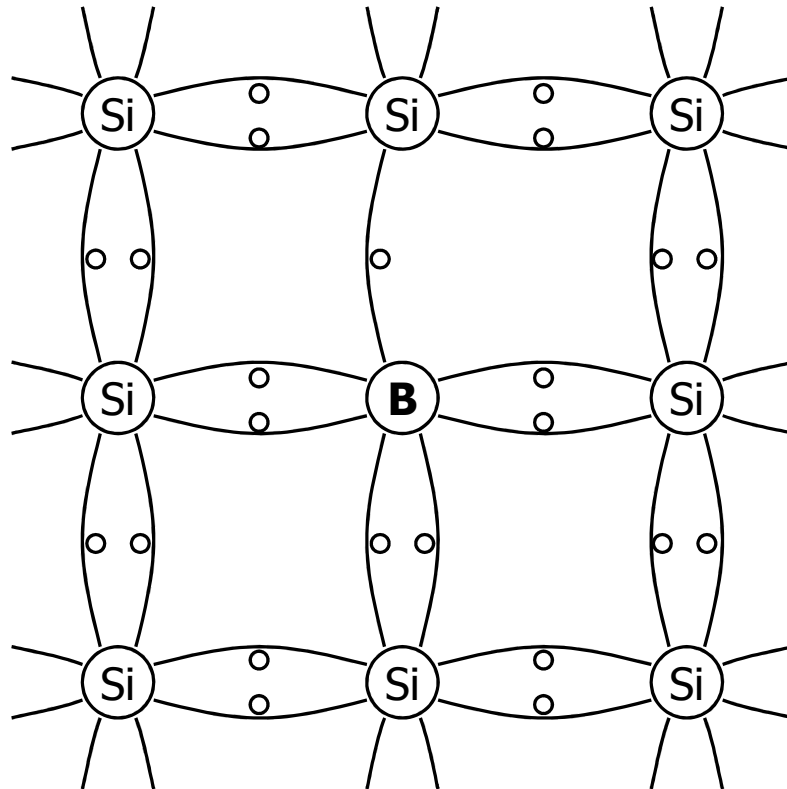
Gli atomi del **V** gruppo donano un elettrone e per questo vengono detti: “**donatori**”

Silicio drogato “tipo n” Con atomi “donatori”



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

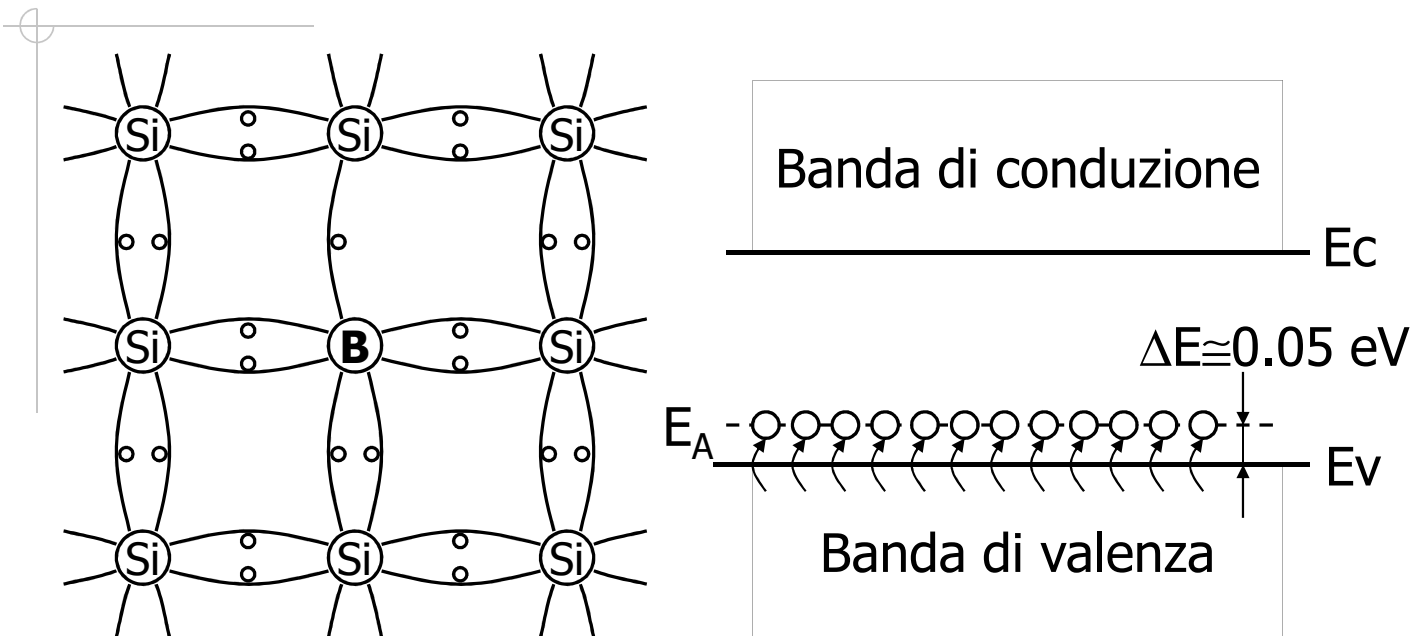
Silicio drogato “tipo p” Con atomi “accettori”



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 “tipo p” Con atomi “accettori”



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

Generazione/Ricombinazione

Legge dell'azione di massa

Definizione: electron/hole pair = EHP

Sia **G** il tasso di generazione delle EHP (numero di EHP che si generano nell'unità di tempo e nell'unità di volume). In prima approssimazione, **G** dipende solo dalla temperatura:

$$G = f_1(T)$$

Sia **R** il processo complementare di G: cioè il tasso di ricombinazione (processo mediante il quale un elettrone libero si lega ad un legame covalente "vacante").

In prima approssimazione, **R** può avvenire solo in presenza di elettroni e lacune. Quindi **R** dipende dal prodotto delle concentrazioni di elettroni e lacune:

$$R = n \cdot p \cdot f_2(T)$$

33

Generazione/Ricombinazione in equilibrio

All'equilibrio termodinamico, i tassi di generazione (**G**) e ricombinazione (**R**) si equivalgono

$$G = R \Rightarrow n \cdot p = \frac{f_1(T)}{f_2(T)} = f(T)$$

In un semiconduttore intrinseco $n_i = p_i$, quindi:

$$n_i \cdot p_i = n_i^2 = f(T)$$

Di conseguenza anche per i semiconduttori estrinseci (drogati) vale:

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

Legge dell'azione di massa

Silicio drogato

Semiconduttore tipo "n":

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

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":

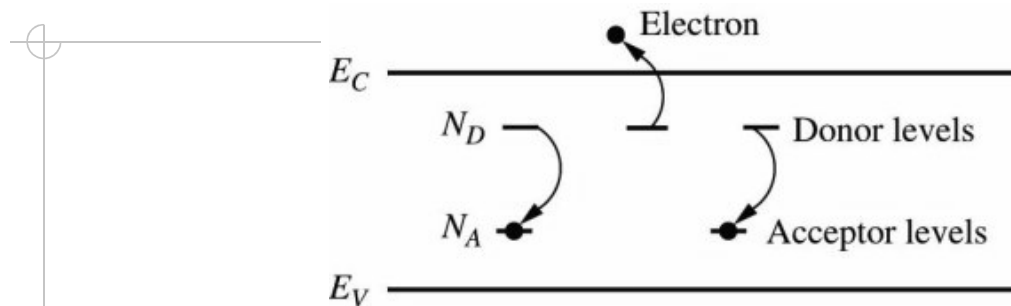
$$p \cong N_A$$
$$n = \frac{n_i^2}{p} \cong \frac{n_i^2}{N_A}$$

Esempio:

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

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

COMPENSAZIONE



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.

COMPENSAZIONE

- ◆ 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.
- ◆ Per la neutralità della carica si ha:
$$q(N_D + p - N_A - n) = 0$$
- ◆ Per la legge dell'azione di massa, all'equilibrio termodinamico, si ha: $pn = n_i^2$

Semiconduttore *tipo-n*

◆ 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 $(N_D - N_A) \gg 2n_i$, $n \approx (N_D - N_A)$.

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

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 $(N_A - N_D) \gg 2n_i$,

$$\begin{aligned} p &\approx (N_A - N_D) . \\ n &= \frac{n_i^2}{N_A - N_D} \end{aligned}$$

Corrente di Deriva (in presenza di un campo elettrico, E)

Velocita' $v \propto E$

Velocita' delle lacune

$$v = \mu_p E$$

μ_p Campo E
 Mobilita'
 Velocita' (cm/s)

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

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

Si intrinseco vs Si drogato

Silicio intrinseco:

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

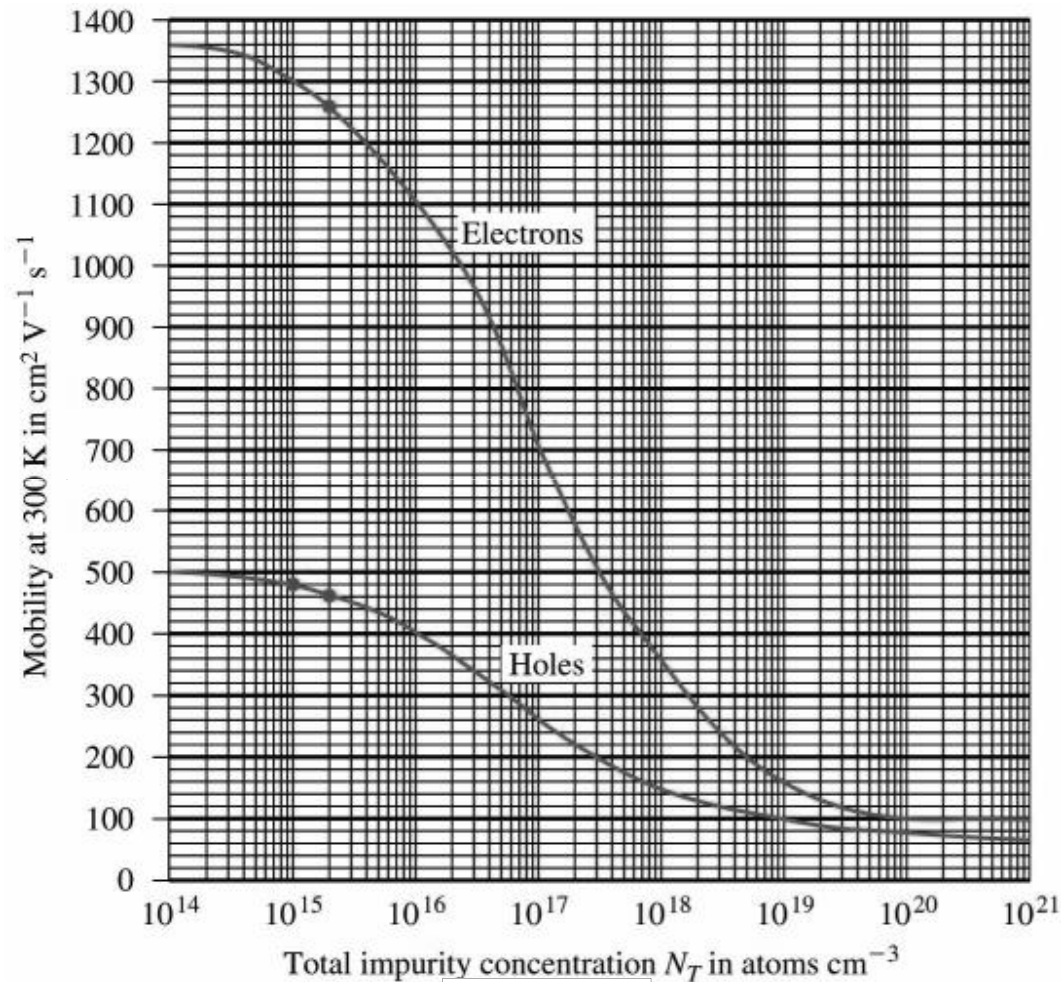
$$\rho_{i\text{-Si}} = \frac{1}{q(p\mu_p + n\mu_n)} \cong 2 \cdot 10^5 \left[\Omega \cdot \text{cm} \right]$$

Silicio tipo "n":

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

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

Mobilità



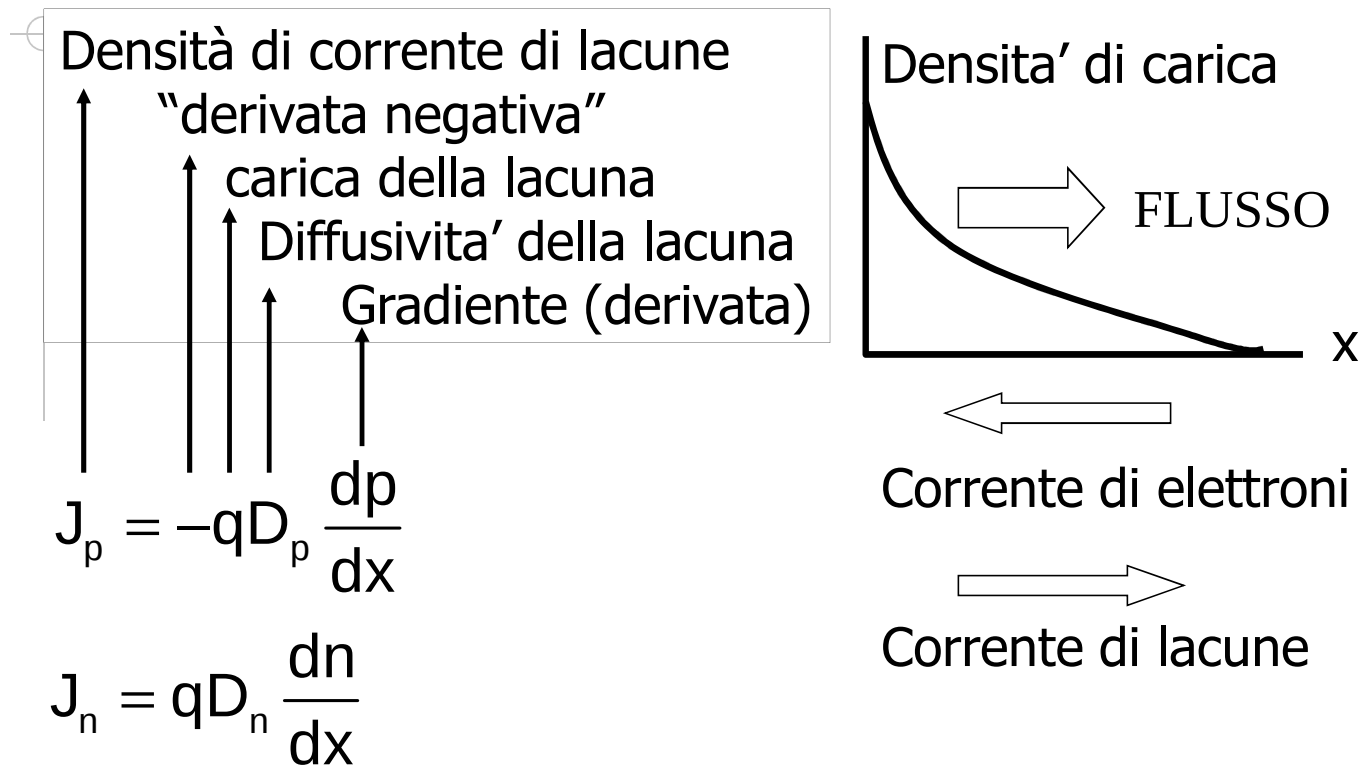
$$N_D + N_A$$

Mobility approximations

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

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

Corrente di Diffusione (in presenza di un gradiente di concentrazione)



Nel caso degli elettroni, il segno è diverso perché la corrente di elettroni ha verso opposto rispetto al loro flusso

3

Corrente complessiva (1)

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

$$J_{\text{diffusion}} = q\left(-D_p \frac{dp}{dx} + D_n \frac{dn}{dx}\right) \quad \textbf{Diffusione}$$

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} = V_T \quad \textbf{Relazione di Einstein}$$

lega la diffusione con la deriva
A temperatura ambiente
 $V_T \cong 25 \text{ mV}$

Corrente complessiva (2):

$$J_{nx}(x) = q\mu_n n(x)E(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

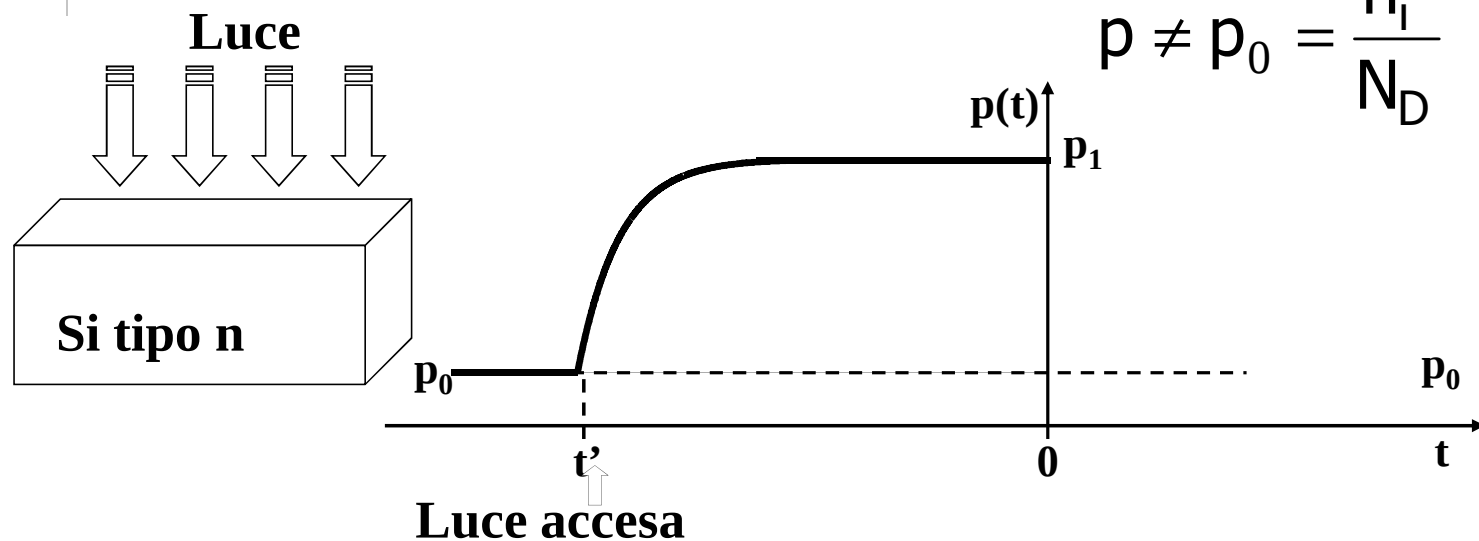
Densità di corrente complessiva di elettroni

$$J_{px}(x) = q\mu_p p(x)E(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Densità di corrente complessiva di lacune

Generazione/Ricombinazione non in equilibrio

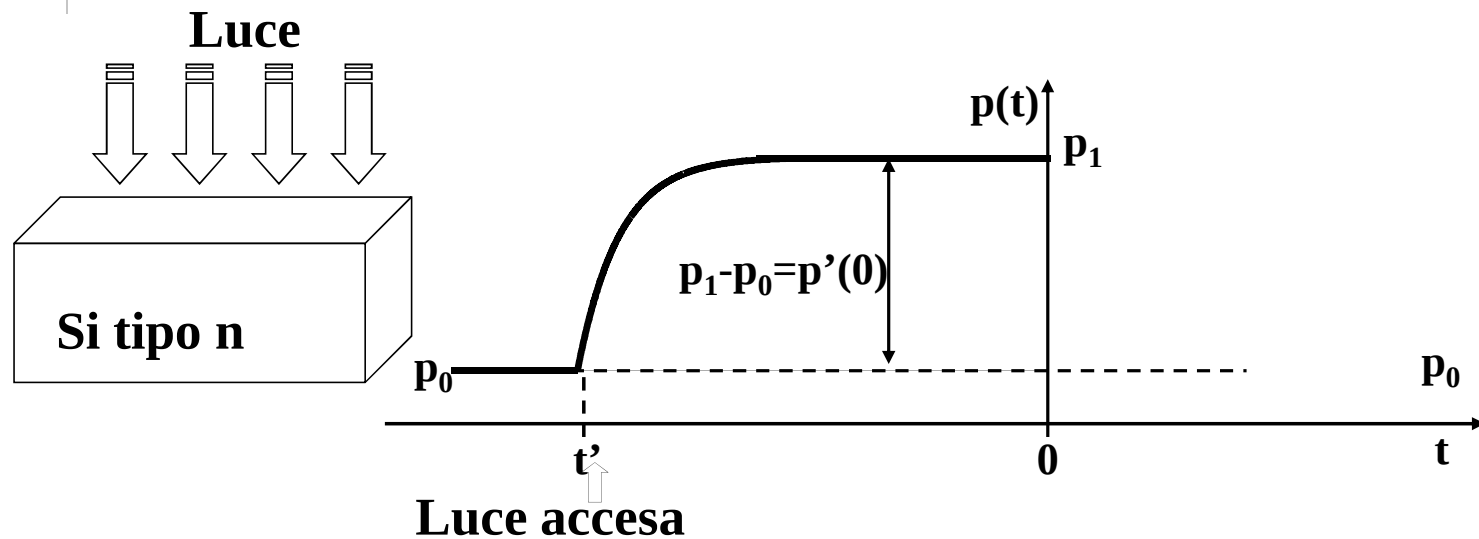
L'illuminazione del semiconduttore di **tipo n** causa la rottura di alcuni legami covalenti con conseguente generazione di coppie elettrone-lacuna. Mentre l'aumento percentuale di cariche maggioritarie (elettroni) è trascurabile (condizione di bassa iniezione, $n \approx n_0 = N_D$), l'aumento di cariche minoritarie (lacune) $p - p_0$ è molto più rilevante:



Generazione/Ricombinazione non in equilibrio

Dopo un tempo sufficientemente lungo il sistema si trova all'equilibrio con una concentrazione di lacune pari a p_1 . Il tasso di ricombinazione **R** sarà approssimativamente:

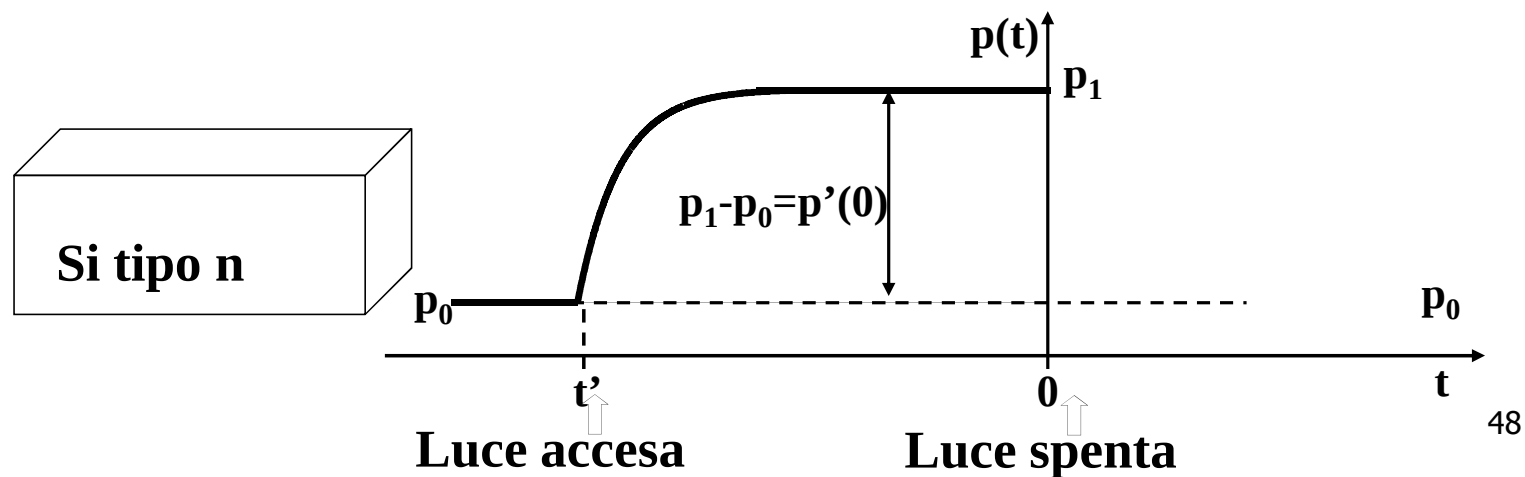
$$R = n \cdot p \cdot f_2(T) \approx N_D \cdot p \cdot f_2(T)$$



Generazione/Ricombinazione non in equilibrio

All'istante $t=0$ la luce viene spenta: pertanto, il tasso di generazione G torna ad essere funzione solamente della temperatura e pari al valore $\mathbf{G_0}$, che era in equilibrio con il tasso di ricombinazione R_0 in condizioni normali :

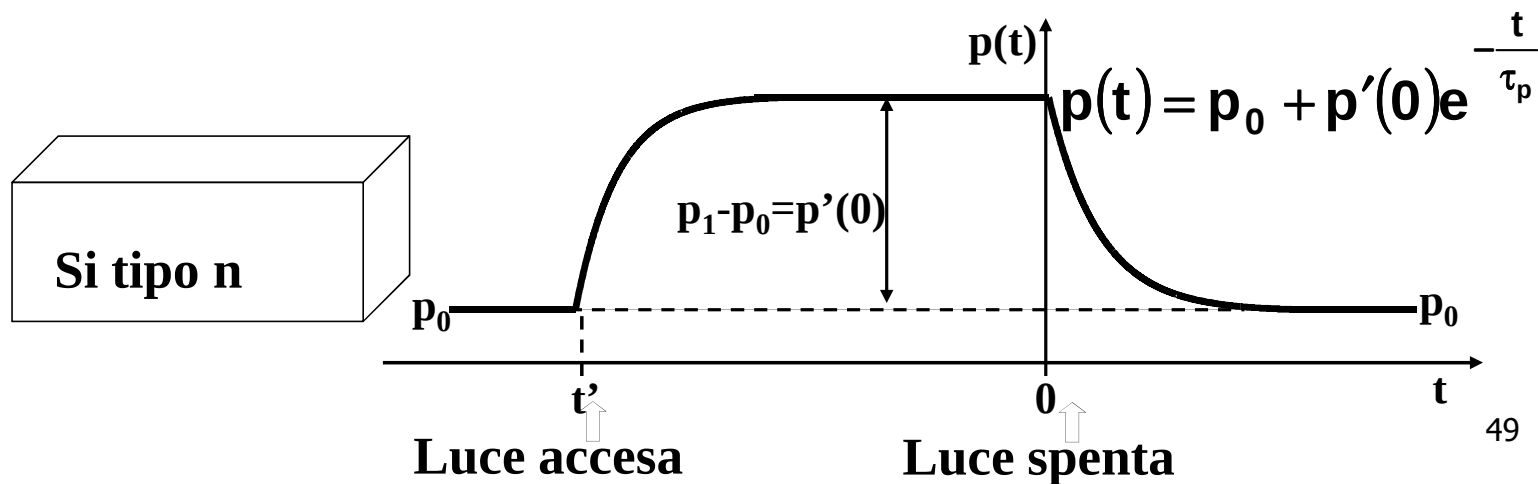
$$G = G_0 = f_1(T) = R_0 = N_D \cdot p_0 \cdot f_2(T)$$



Generazione/Ricombinazione non in equilibrio

L'evoluzione temporale **p(t)** della concentrazione di lacune a partire dall'istante t=0 è determinata dalla differenza tra i tassi di generazione e ricombinazione:

$$G - R = \frac{dp}{dt} = -N_D \cdot f_2(T) \cdot (p - p_0) = -\frac{p - p_0}{\tau_p}$$



Generazione/Ricombinazione non in equilibrio

Dove si è posto:

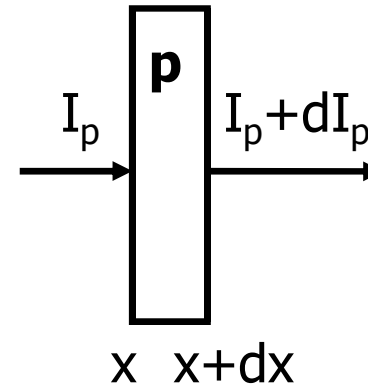
$$\tau_p = \frac{1}{N_D \cdot f_2(T)}$$

che è la **costante di tempo** di vita delle lacune nel semiconduttore di tipo **n** drogato con **N_D** donatori.

Analoga definizione si può dare per gli elettroni in un semiconduttore di tipo **p** drogato con **N_A** accettori.

Equazione di Continuità

Si consideri una regione di semiconduttore di tipo **n** di lunghezza **dx** e sezione **A**, con concentrazione **p** di cariche di minoranza. La differenza tra ricombinazione **G** e generazione **R** è:



$$\frac{dp'}{dt} = G - R = -\frac{p - p_0}{\tau_p}$$

Se si considera anche una corrente **I_p** di lacune entrante in **x** ed una corrente **I_p + dI_p** uscente da **x + dx**, si ha una variazione di concentrazione **p** di lacune dovuto alla corrente data da:

$$\frac{dp''}{dt} = \frac{1}{Adx} \frac{[I_p - (I_p + dI_p)]}{q} = -\frac{1}{Adx} \frac{dI_p}{q} \quad 51$$

Equazione di Continuità

La corrente $\mathbf{I_p}$ è dovuta alla diffusione e alla deriva:

$$\mathbf{I_p} = -AqD_p \frac{dp}{dx} + Aqp\mu_p E$$

e differenziando:

$$d\mathbf{I_p} = -A dx q D_p \frac{d^2 p}{dx^2} + A dx q p \mu_p \frac{dE}{dx} + A dx q E \mu_p \frac{dp}{dx}$$

Sostituendo e sommando gli effetti di $\mathbf{R}$, $\mathbf{G}$ e $\mathbf{I_p}$, il tasso di variazione di $\mathbf{p}$ risulta:

$$\frac{dp}{dt} = D_p \frac{d^2 p}{dx^2} - p \mu_p \frac{dE}{dx} - E \mu_p \frac{dp}{dx} - \frac{p - p_0}{\tau_p}$$

Equazione di Continuità

52

Equazione di Continuità

Analoga equazione vale per le cariche **n** in un semiconduttore di tipo **p**.

Si considerano due casi importanti:

A – Concentrazione uniforme senza campo elettrico

In questo caso **dE/dx=0** e **d² p /dx²=0**. L'equazione di continuità si riduce a:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p - p_0}{\tau_p}$$

L'integrale è:

$$p - p_0 = (p_1 - p_0)e^{-t/\tau_p}$$

Una concentrazione iniziale **p₁** si porta verso l'equilibrio con una costante di tempo **τ_p**.

Equazione di Continuità

B – Concentrazione indipendente da t e campo elettrico nullo

In questo caso $\mathbf{dp/dt=0}$ e $\mathbf{dE/dx=0}$. L'equazione di continuità si riduce a:

$$\frac{d^2p}{dx^2} = \frac{p - p_0}{D_p \tau_p}$$

L'integrale è:

$$p - p_0 = A_1 e^{-x/L_p} + A_2 e^{x/L_p}$$

Dove $\mathbf{A_1}$ e $\mathbf{A_2}$ dipendono dalle condizioni al contorno e si definisce la **lunghezza di diffusione**:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$