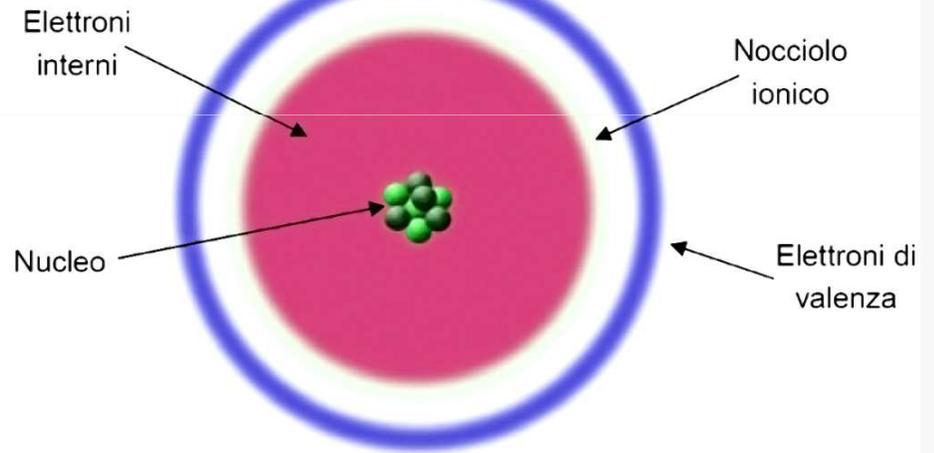
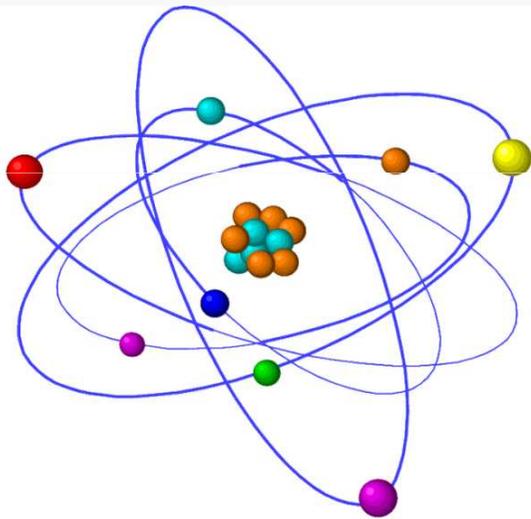


# PROGETTO LAUREE SCIENTIFICHE CELLE FOTOVOLTAICHE

# SEMICONDUCTORI

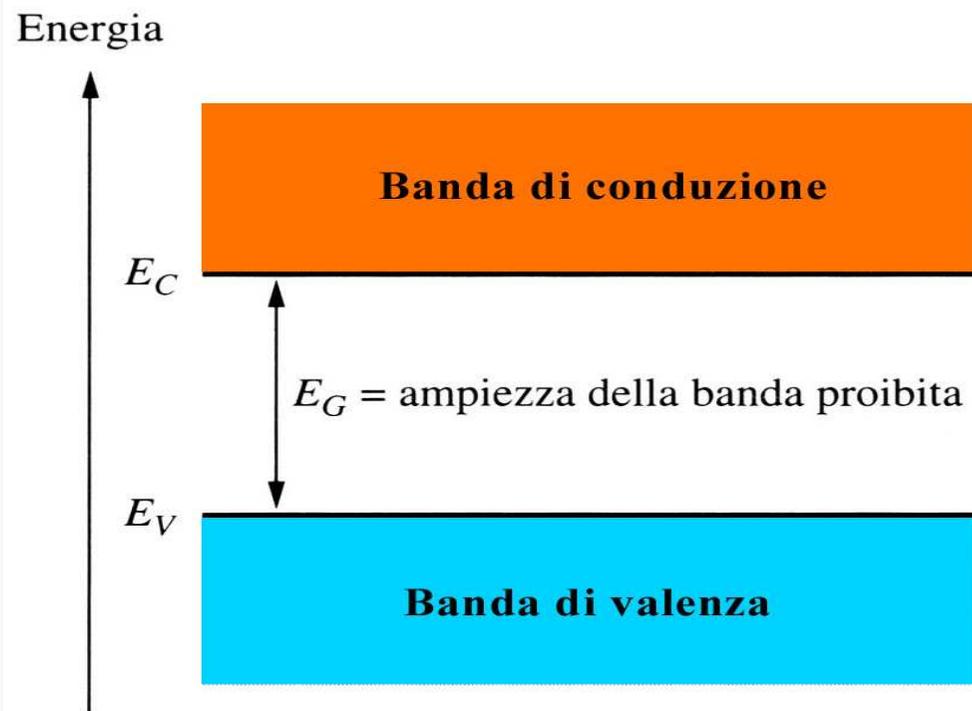
# Modello atomico



# Bande di energia in un cristallo

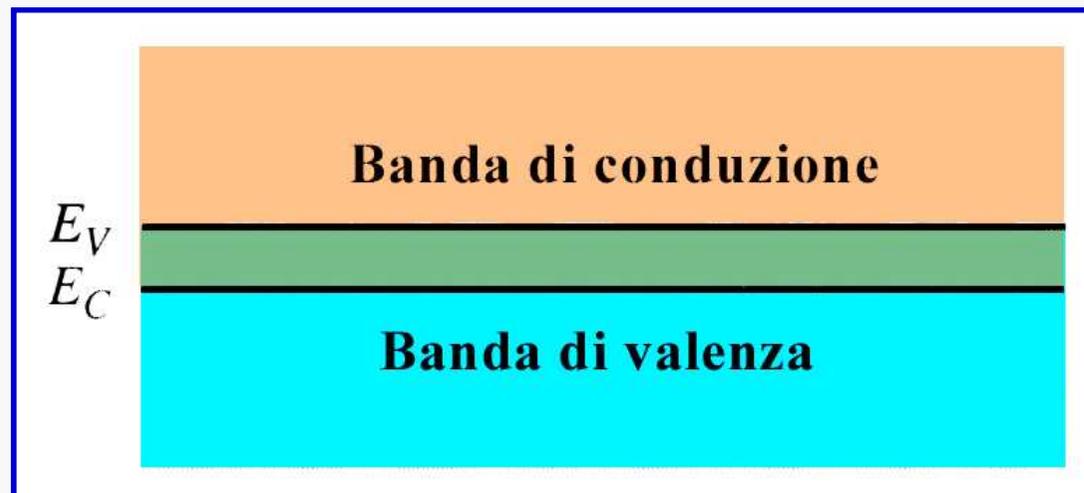
Le sostanze solide possono essere suddivise in tre categorie: **isolanti**, **conduttori** e **semiconduttori**.

I livelli energetici permessi agli elettroni si dispongono in bande di energia.



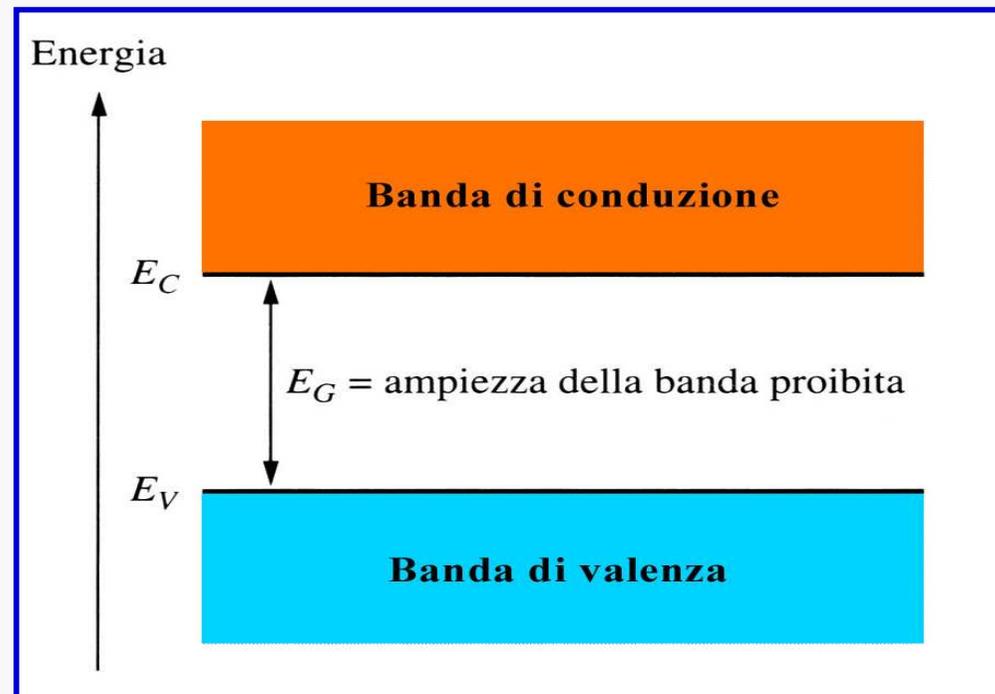
# Conduttori metallici

- La struttura a bande è molto utile per determinare le proprietà elettriche, perché fa vedere come gli elettroni si possono muovere nel cristallo.
- Nei metalli, la struttura cristallina è tale che le **bande di valenza e di conduzione si sovrappongono**; i conduttori sono sostanze cristalline per le quali l'ultima banda energetica è occupata solo parzialmente.

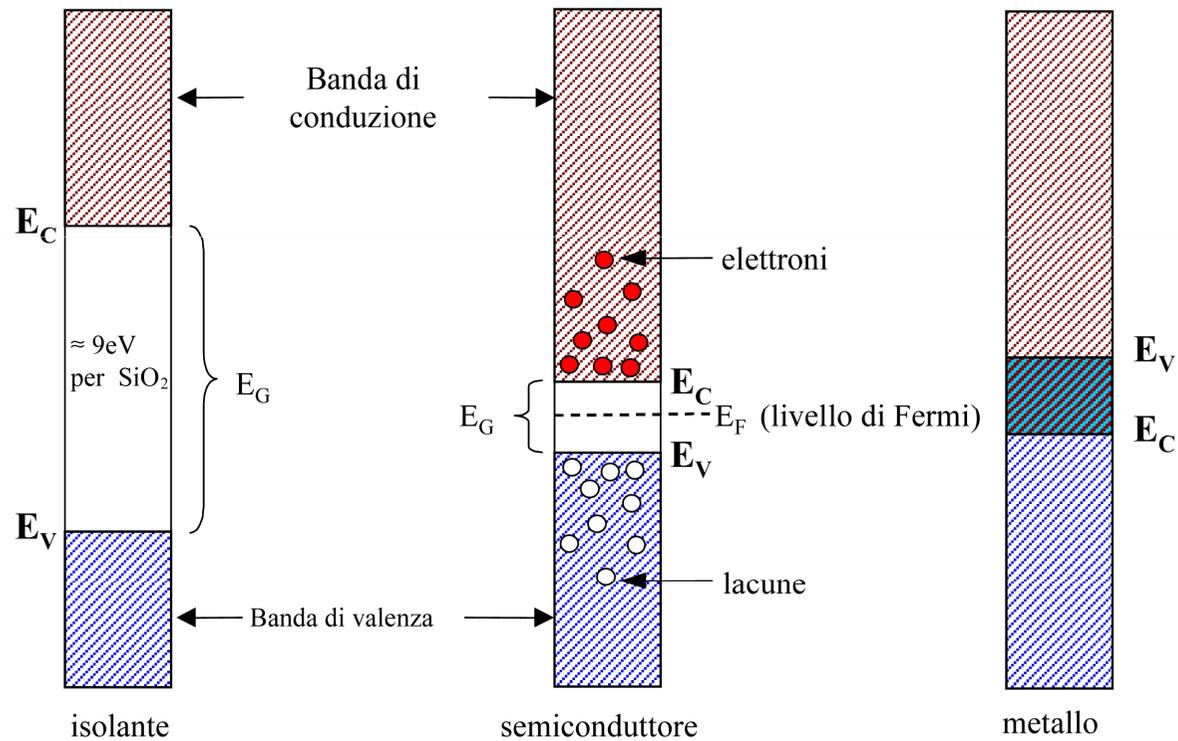


# Isolanti - Semiconduttori

Un cristallo isolante ha invece un'ampia gap di energia. La banda di valenza è completamente **piena** e quella di conduzione completamente **vuota**. Ovviamente in questo caso la banda superiore non può contribuire alla conducibilità elettrica dato che è priva di portatori.



# Modello a bande

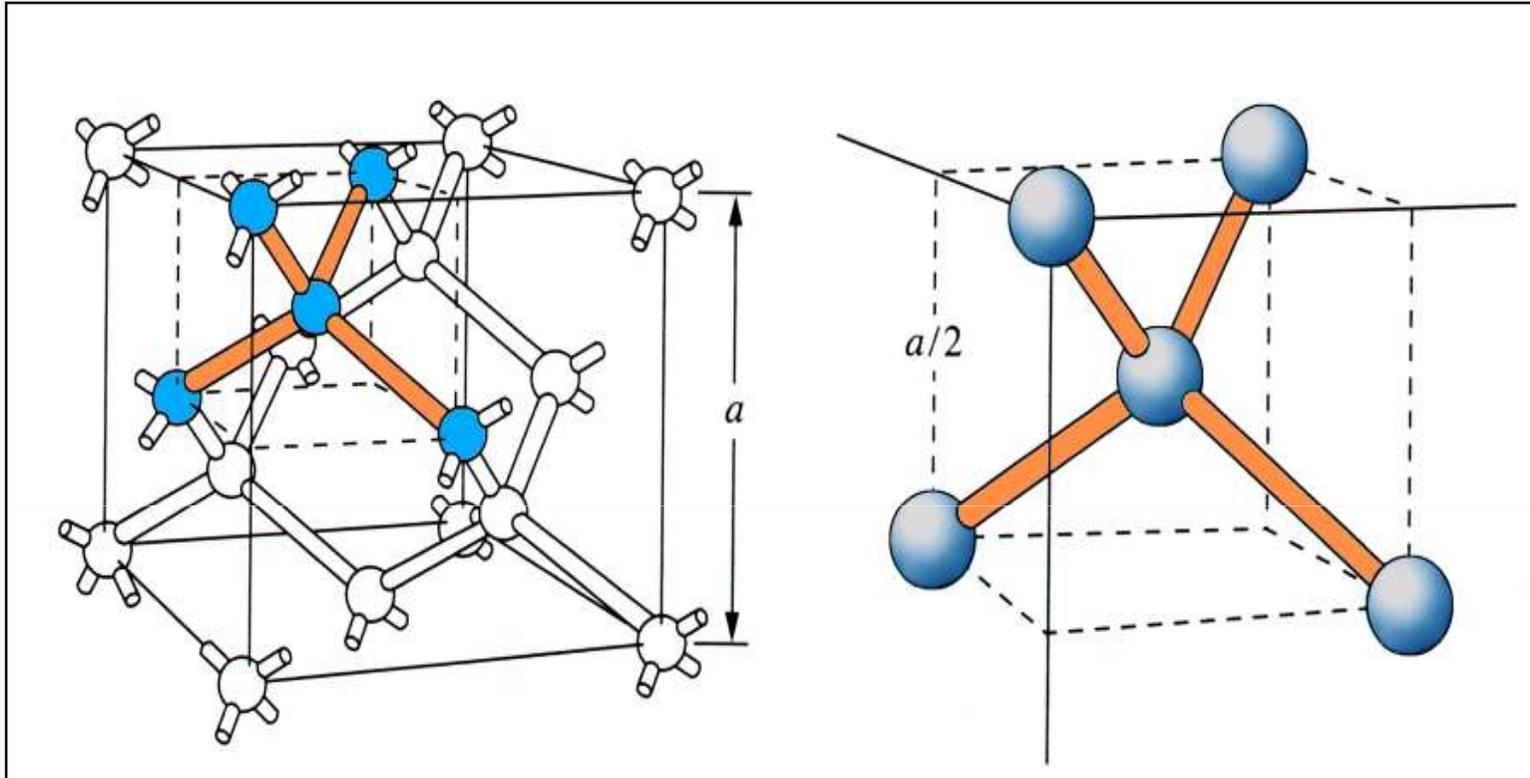


# Materiali semiconduttori

I semiconduttori elementari sono formati da atomi di un solo elemento (appartenente alla IV colonna della tavola periodica degli elementi)

	IIIA	IVA	VA	VIA	
	5 10.811 <b>B</b> Boro	6 12.01115 <b>C</b> Carbonio	7 14.0067 <b>N</b> Azoto	8 18.9994 <b>O</b> Ossigeno	
	13 26.9815 <b>Al</b> Alluminio	14 28.086 <b>Si</b> Silicio	15 30.9738 <b>P</b> Fosforo	16 32.064 <b>S</b> Zolfo	
IIB	30 65.37 <b>Zn</b> Zinco	31 69.72 <b>Ga</b> Gallio	32 72.59 <b>Ge</b> Germanio	33 74.922 <b>As</b> Arsenico	34 78.96 <b>Se</b> Selenio
	48 112.40 <b>Cd</b> Cadmio	49 114.82 <b>In</b> Indio	50 118.69 <b>Sn</b> Stagno	51 121.75 <b>Sb</b> Antimonio	52 127.60 <b>Te</b> Tellurio
	80 200.59 <b>Hg</b> Mercurio	81 204.37 <b>Tl</b> Tallio	82 207.19 <b>Pb</b> Piombo	83 208.980 <b>Bi</b> Bismuto	84 (210) <b>Po</b> Polonio

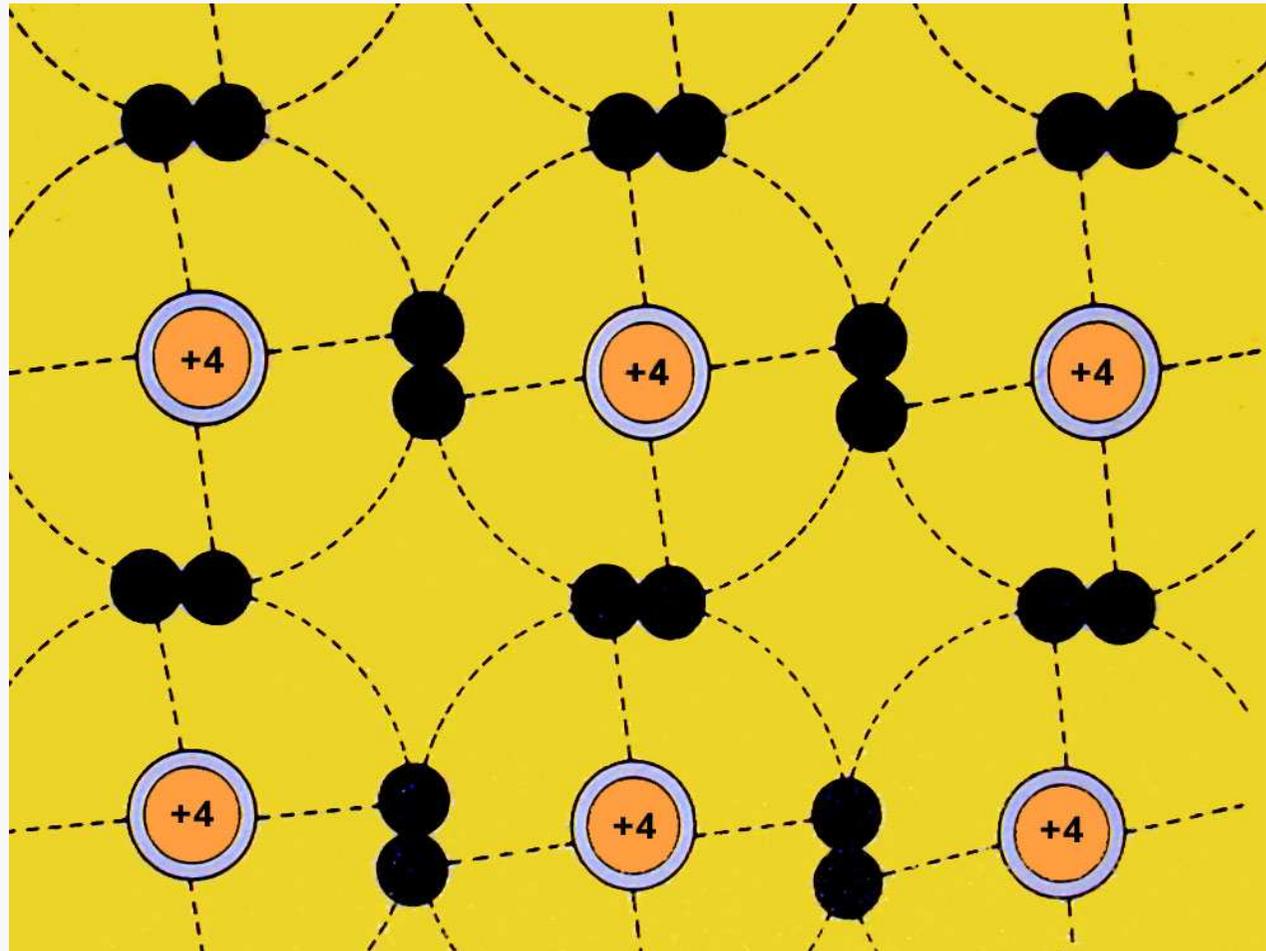
# Modello a legame covalente



Il **silicio** appartiene alla quarta colonna della tavola periodica, e quindi presenta quattro elettroni di valenza nell'orbitale più esterno. Nella forma cristallina ciascun atomo di silicio forma un legame **covalente** con i quattro atomi più vicini.

# Modello a legame covalente

Del modello a legame covalente si può dare una rappresentazione bidimensionale

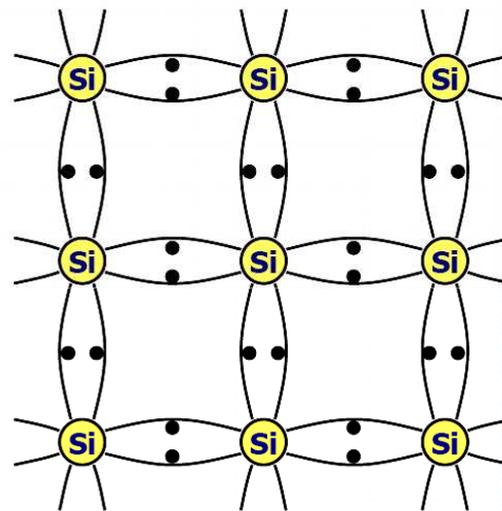


# Semiconduttori intrinseci o puri

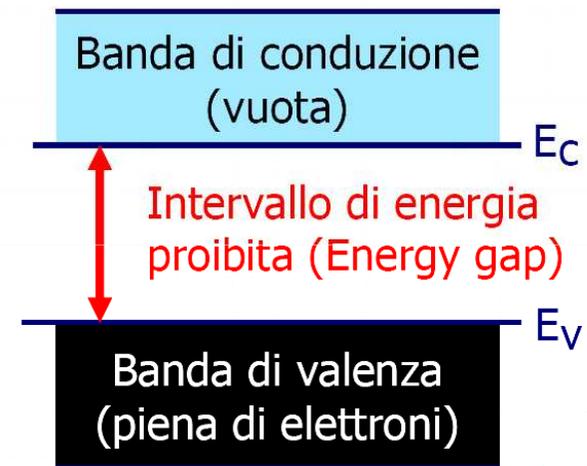
In un semiconduttore intrinseco, a temperature prossime allo zero assoluto tutti gli elettroni sono impegnati in legami covalenti con gli atomi adiacenti, sicché non vi è alcun elettrone disponibile per il processo di conduzione.

Gli orbitali esterni degli atomi di silicio sono tutti occupati, e il materiale si comporta come un isolante.

## Cristallo di silicio a $T=0$ K



## Modello a bande di energia

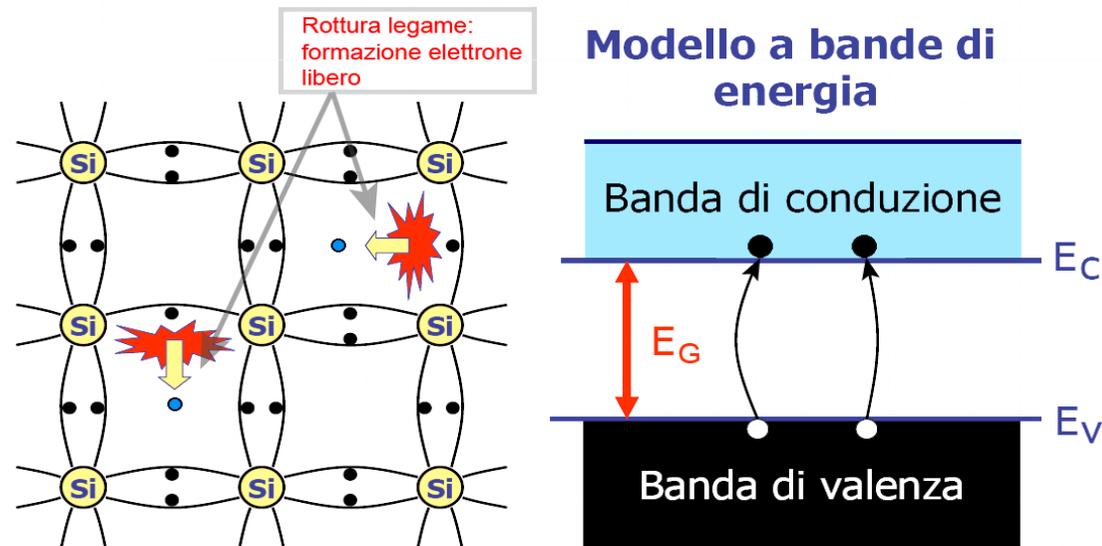


In queste condizioni, applicando una piccola differenza di potenziale, non ci sarà movimento di elettroni in quanto questi sono saldamente vincolati agli atomi!

# Semiconduttori intrinseci o puri

Al crescere della temperatura, viene fornita energia termica al reticolo cristallino, causando la rottura di alcuni legami covalenti, sicché qualche elettrone può partecipare alla conduzione. Gli elettroni non più legati al reticolo cristallino prendono il nome di elettroni liberi.

Cristallo di silicio a  $T > 0$  K



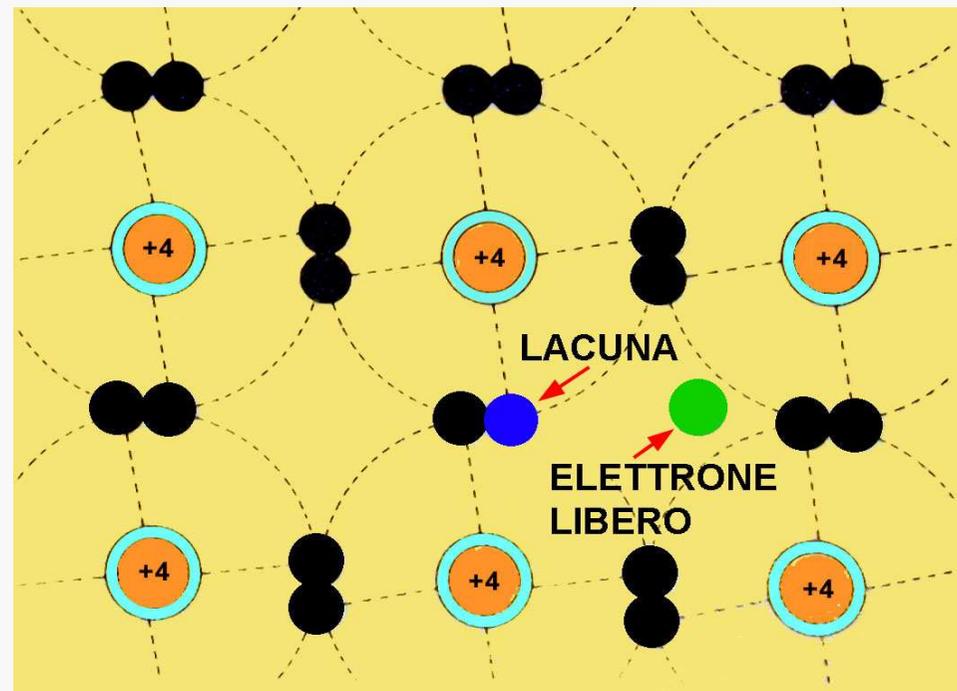
Per rompere il legame covalente (e originare una coppia elettrone/lacuna) serve una quantità minima di energia pari a  $E_G$ .

## Semiconduttori intrinseci o puri

L'elettrone "libero" ha lasciato un buco (un legame covalente incompleto). Tale legame covalente incompleto prende il nome di lacuna.

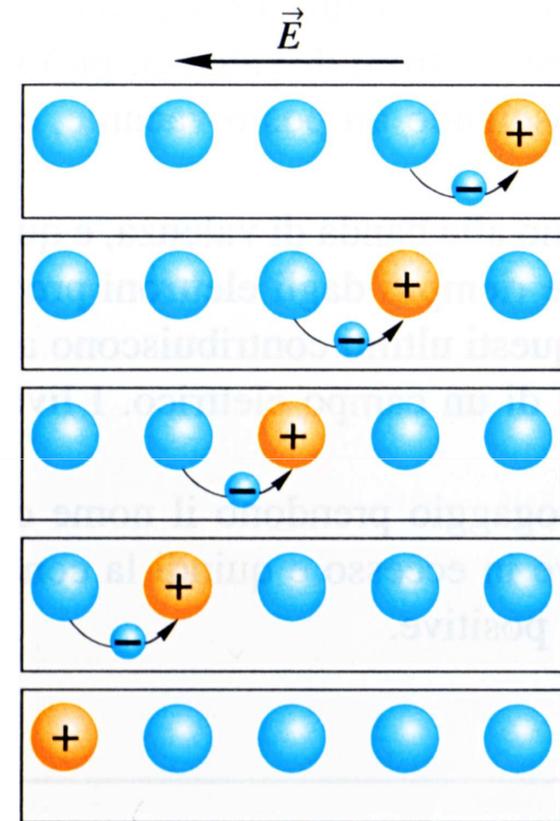
La rottura di un legame covalente determina la formazione di due particelle cariche: una lacuna e un elettrone.

La cosa interessante della lacuna è che ha la capacità di "trasportare" corrente.



# Mobilità nei semiconduttori intrinseci

- In presenza di un campo elettrico le particelle cariche libere (**elettroni + lacune**) si muovono e si genera **corrente elettrica**.
- Le cariche positive (**le lacune**) si muovono nello stesso verso del campo elettrico, mentre quelle negative (**gli elettroni**) si muovono in verso opposto.

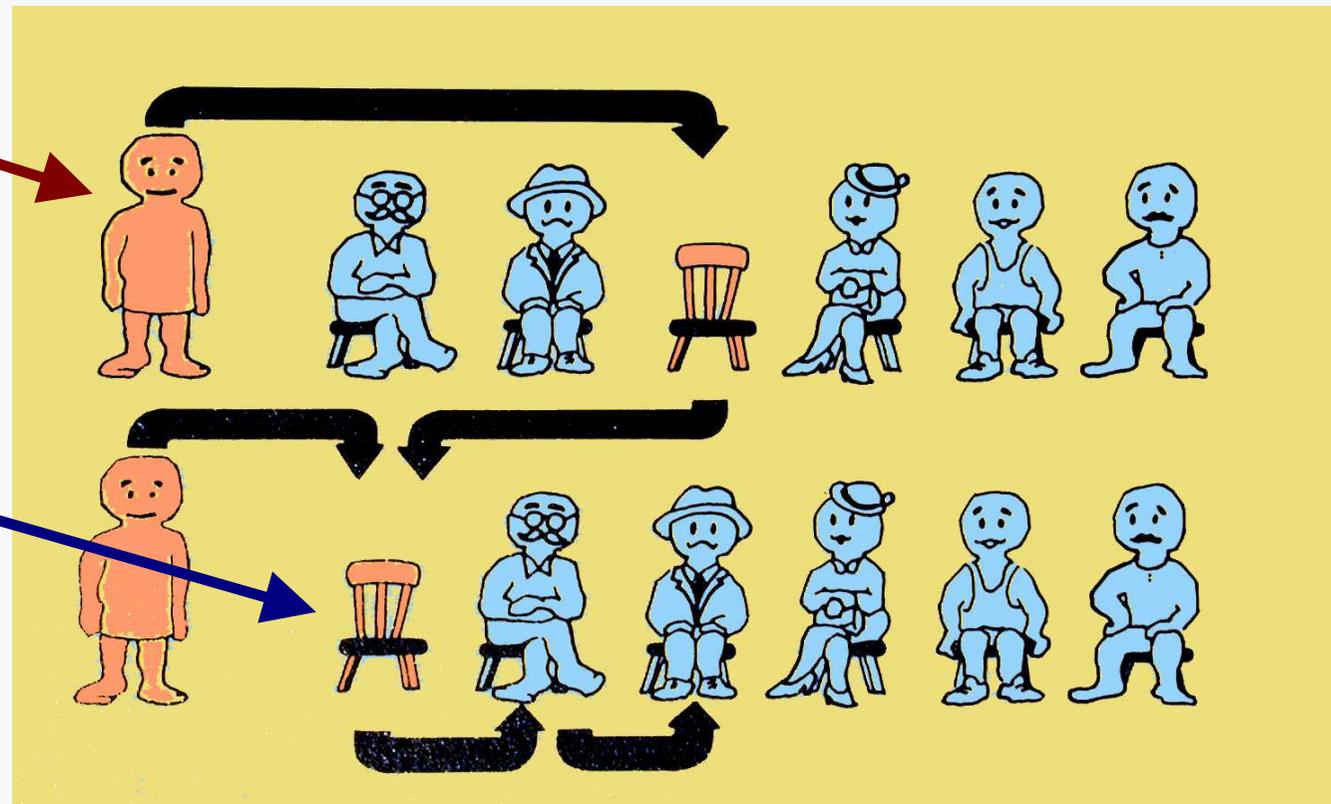


# Semiconduttori intrinseci o puri

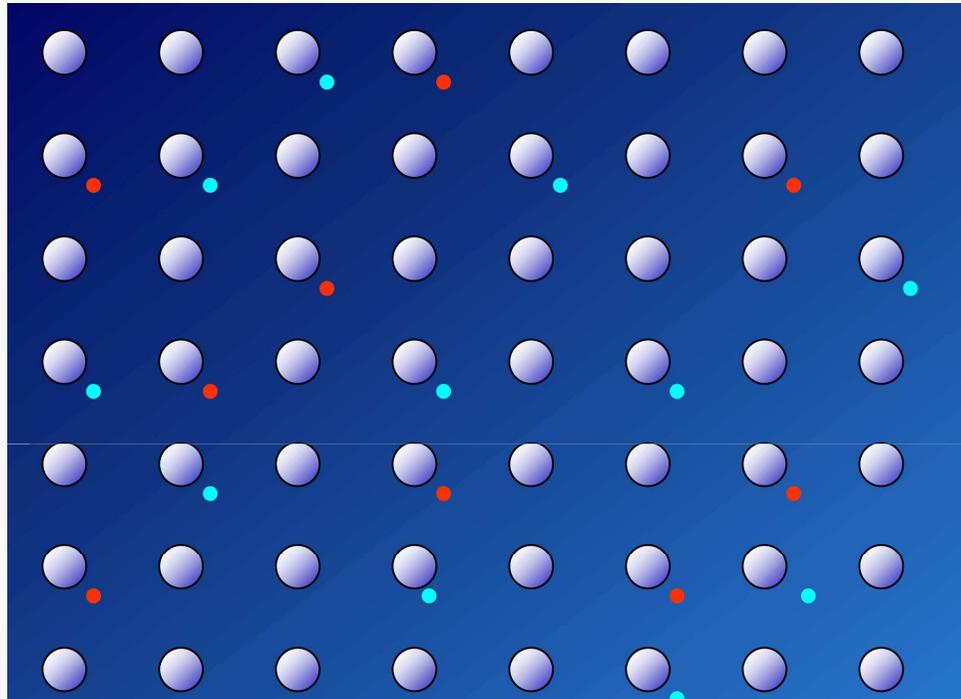
Se a causa della "fuga" di un elettrone si forma una lacuna nel punto A, un altro elettrone, proveniente da un atomo adiacente, può riempire questa "lacuna" dopo aver rotto, il proprio legame covalente, lasciando a sua volta una lacuna in B.

**Moto di elettrone libero**

**Moto di lacuna**



# Concentrazione degli elettroni e delle lacune in un semiconduttore intrinseco



ad alta temperatura  
il notevole aumento  
delle coppie elettrone-lacuna  
fa sì che il semiconduttore  
diventi un conduttore

a 400°C il Silicio presenta una conducibilità  
simile a quella della **grafite**

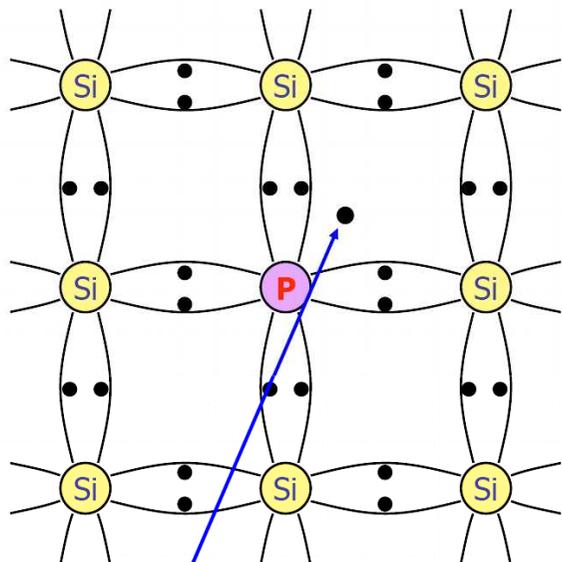
The diagram shows a 7x8 grid of light blue spheres representing atoms in a semiconductor lattice. Several small red and blue dots are scattered throughout the grid, representing electron-hole pairs. A large orange arrow points from the text above to a white box at the bottom.

# Impurità nei semiconduttori

Una delle proprietà più vantaggiose dei semiconduttori è costituita dal fatto che la conducibilità dei semiconduttori può essere modificata introducendo nel materiale degli atomi di **impurità** attraverso un processo chiamato drogaggio. In un **semiconduttore drogato** la resistività può assumere valori compresi in un intervallo molto ampio, e si può fare in modo che la resistività sia determinata dalla concentrazione degli atomi "droganti".

# Impurità di tipo "donatore" nei semiconduttori

## Silicio drogato "tipo 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**"

Per il silicio drogato tipo n, a temperatura ambiente, praticamente **tutti gli atomi donatori cedono un elettrone.**

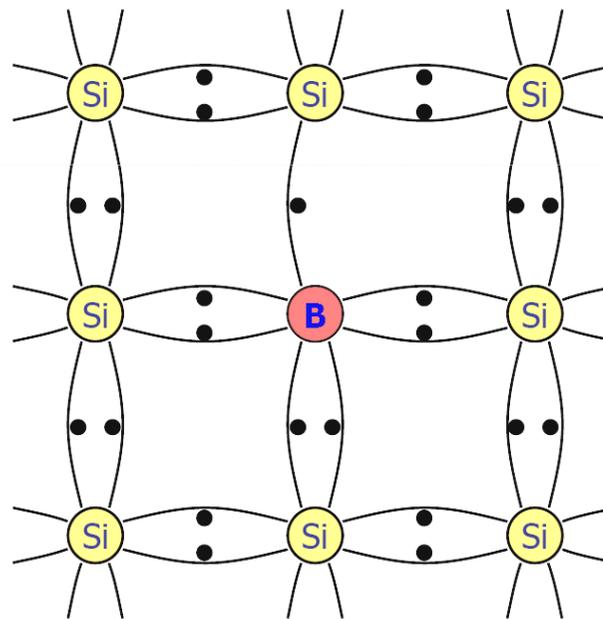
Quando un atomo donatore occupa il posto di un atomo di silicio nella struttura cristallina, quattro dei cinque elettroni dell'orbitale più esterno formano legami covalenti, sicché è sufficiente un'energia modesta per ionizzare il quinto elettrone, che diventa disponibile per il processo di conduzione.

# Impurità di tipo "accettore" nei semiconduttori

Quando un atomo appartenente alla terza colonna della tavola periodica degli elementi occupa il posto di un atomo di silicio nella struttura cristallina, poiché ha solo tre elettroni di valenza, uno dei quattro legami covalenti non potrà formarsi.

Un elettrone (formatosi per agitazione termica) che si trova nelle vicinanze dell'atomo d'impurità può essere facilmente "accettato" in modo che si possano formare i quattro legami covalenti. Questo processo, evidentemente, porta alla formazione di una lacuna.

## Silicio drogato con atomi "accettori" ["tipo p"]



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**"

## Concentrazione degli elettroni e delle lacune nei semiconduttori estrinseci

A differenza di quanto si verifica in un semiconduttore intrinseco, in un semiconduttore "drogato" la concentrazione di elettroni assume un valore diverso rispetto alla concentrazione di lacune.

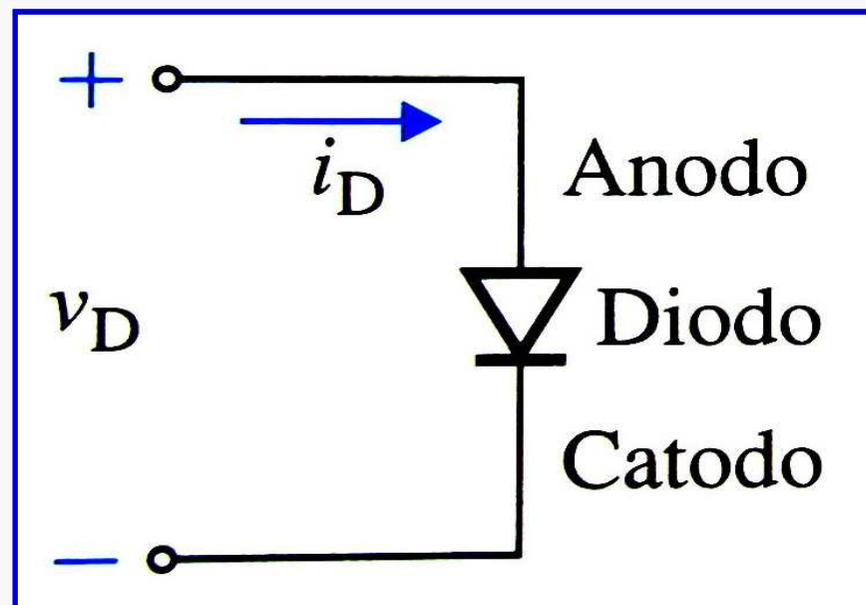
Nel caso in cui risulti  $n_e > n_h$  il semiconduttore è detto di **tipo n**, mentre è detto di **tipo p** se  $n_h > n_e$ .

Il portatore di carica che assume il valore maggiore di concentrazione è detto **portatore maggioritario**, mentre l'altro è detto **portatore minoritario**.

• DADOASEMCONDUITORE

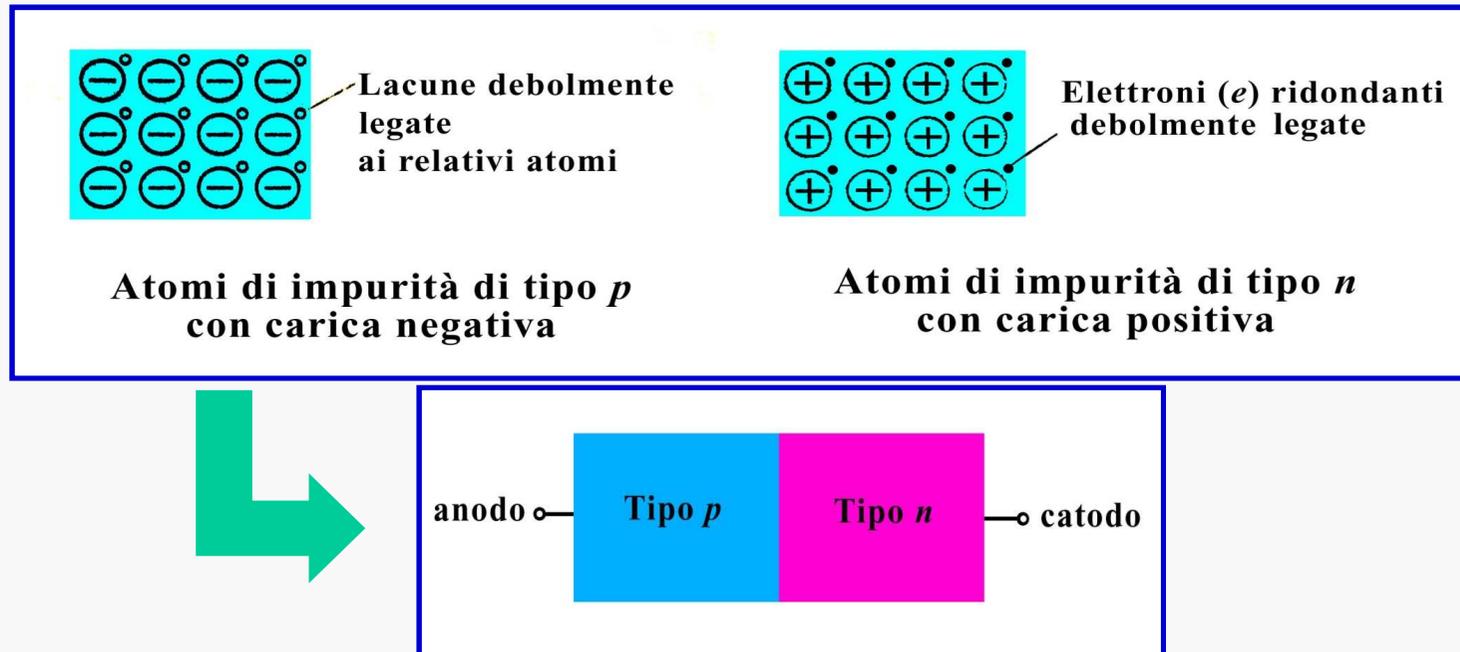
# Diodo ideale

Un diodo a semiconduttore è un dispositivo elettronico dotato di due terminali: *anodo* e *catodo*. Esso manifesta **bassa resistenza elettrica** in un verso (polarizzazione diretta) ed **elevata resistenza** nell'altro verso (polarizzazione inversa). Pertanto un diodo consente il passaggio della corrente in una sola direzione.



# Diode a semiconduttore

La zona di transizione tra una regione di tipo p ed una di tipo n, nello stesso semiconduttore monocristallo, rappresenta la struttura fondamentale di un gran numero di dispositivi allo stato solido e si chiama **giunzione p-n**.

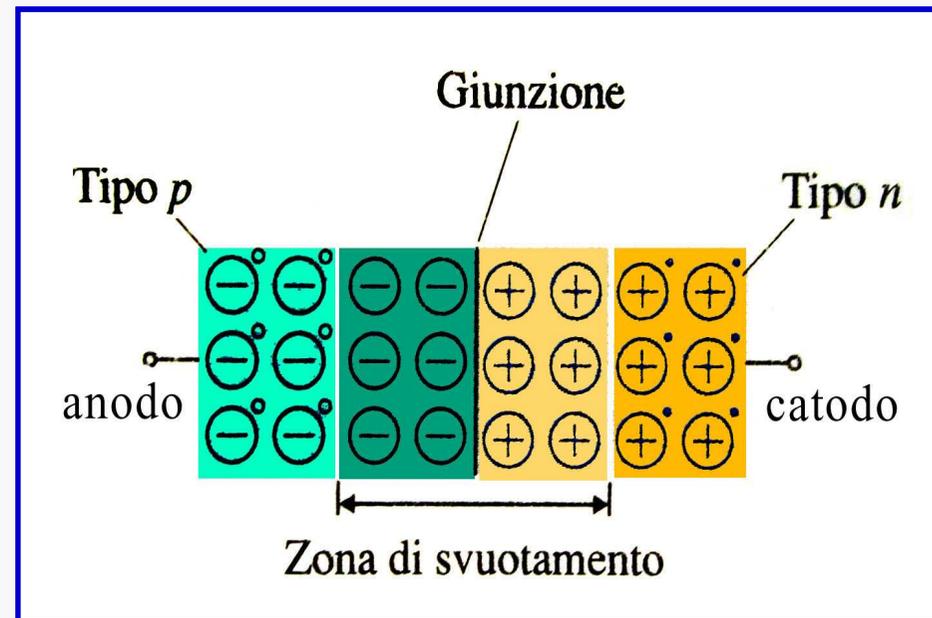


Prende il nome di **diode p-n** o semplicemente **diode a giunzione** (molto spesso chiamato soltanto diode) un dispositivo elettronico realizzato ponendo in contatto due campioni dello stesso semiconduttore uno **drogato di tipo p** e l'altro **drogato di tipo n**.

# Diodo a semiconduttore

A temperatura ambiente, gli elettroni, che sono le cariche maggioritarie nella zona  $n$ , diffondono dalla zona  $n$  alla zona  $p$ ; le lacune che sono le cariche maggioritarie nella zona  $p$ , diffondono dalla zona  $p$  alla zona  $n$ .

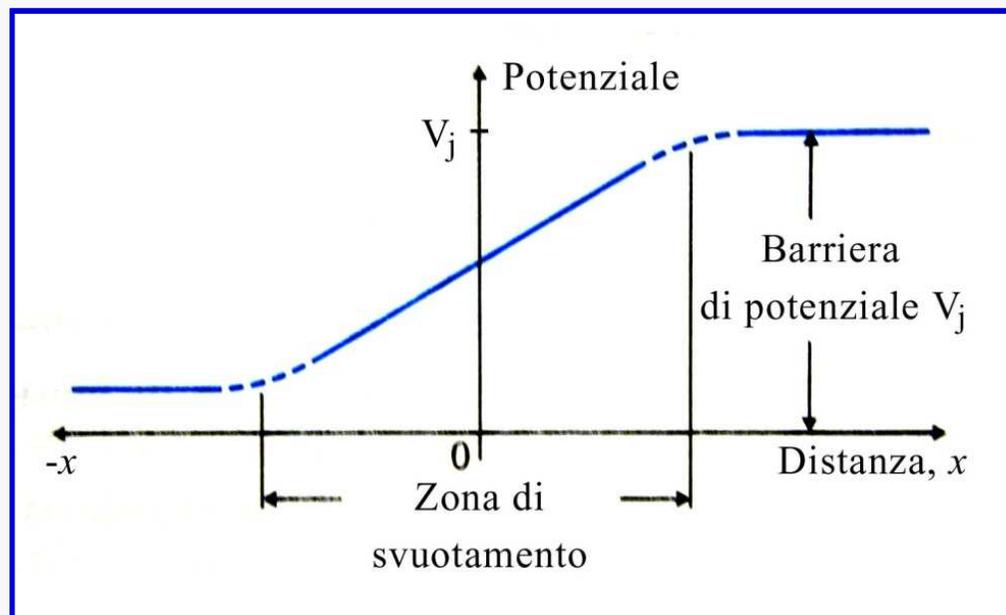
Man mano che le lacune "mobili" diffondono dalla regione  $p$  verso la regione  $n$ , lasciano nella regione  $p$  degli **atomi accettori immobili carichi negativamente**; analogamente, gli elettroni lasciano nella regione  $n$  degli **atomi donatori carichi positivamente**.



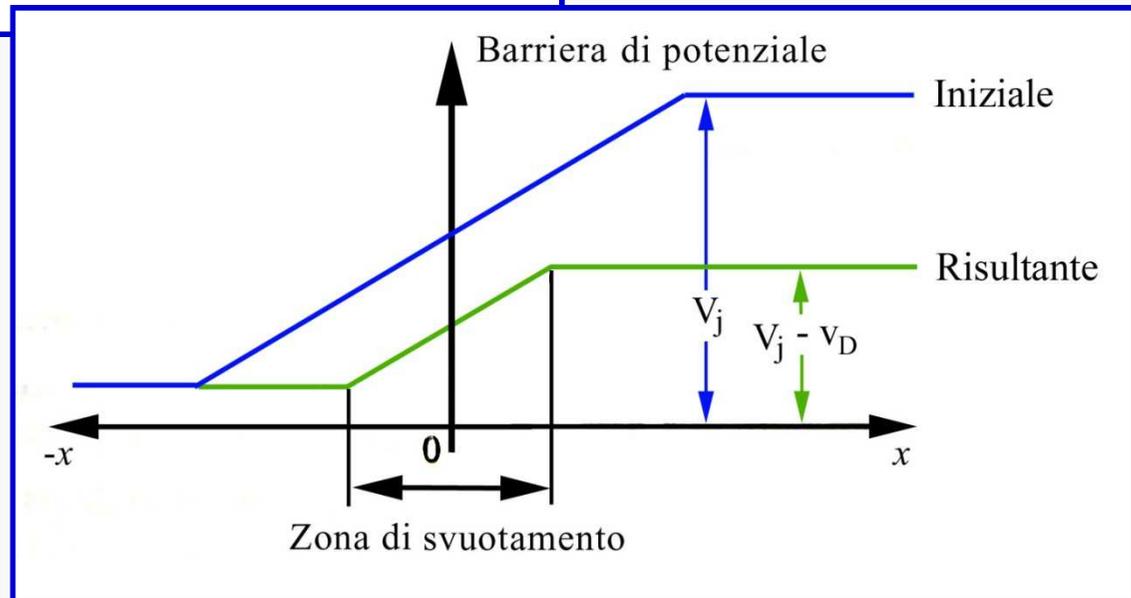
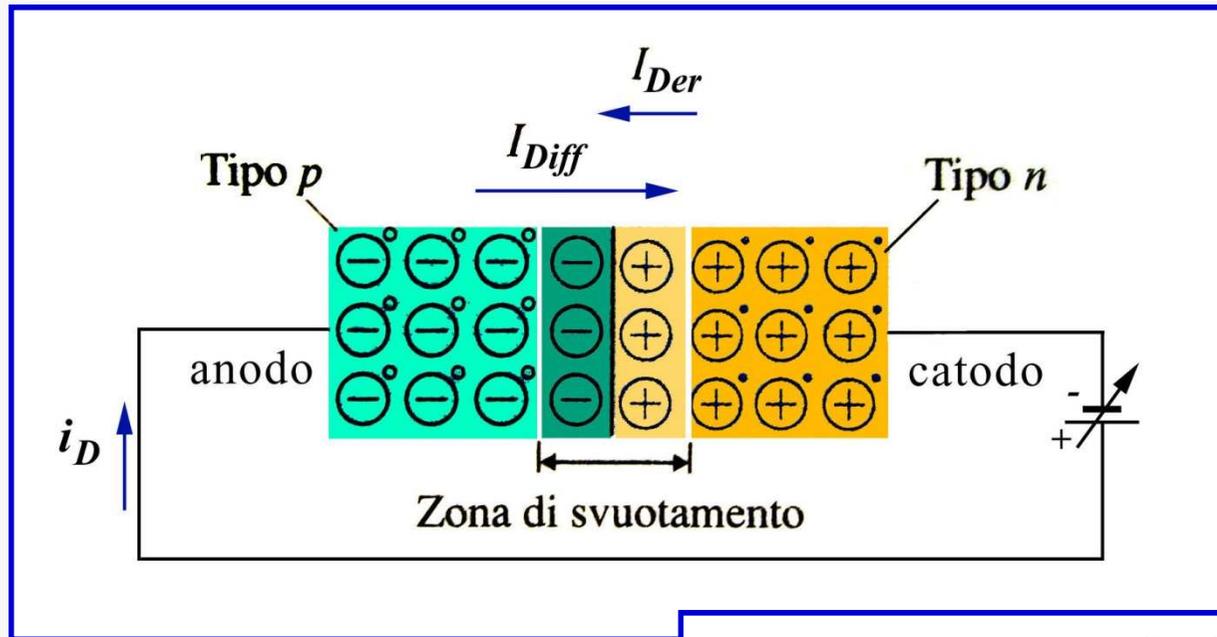
# Diodo a semiconduttore

In prossimità della giunzione, si vengono così a formare delle cariche opposte creando una regione di svuotamento, o regione di carica spaziale. Tali cariche sono quelle degli ioni donatori (nel cristallo  $n$ ) e degli ioni accettori (nel cristallo  $p$ ) che restano nel reticolo non neutralizzate rispettivamente dagli elettroni e dalle lacune.

A tale distribuzione di cariche è associato un campo elettrico  $E_j$ , localizzato nella regione di transizione. Il campo elettrico  $E_j$ , genera una barriera di potenziale  $V_j$ .



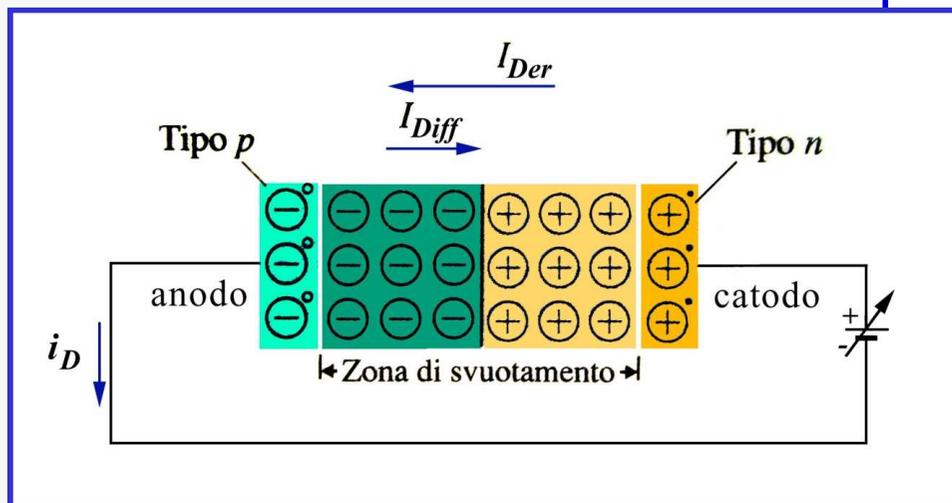
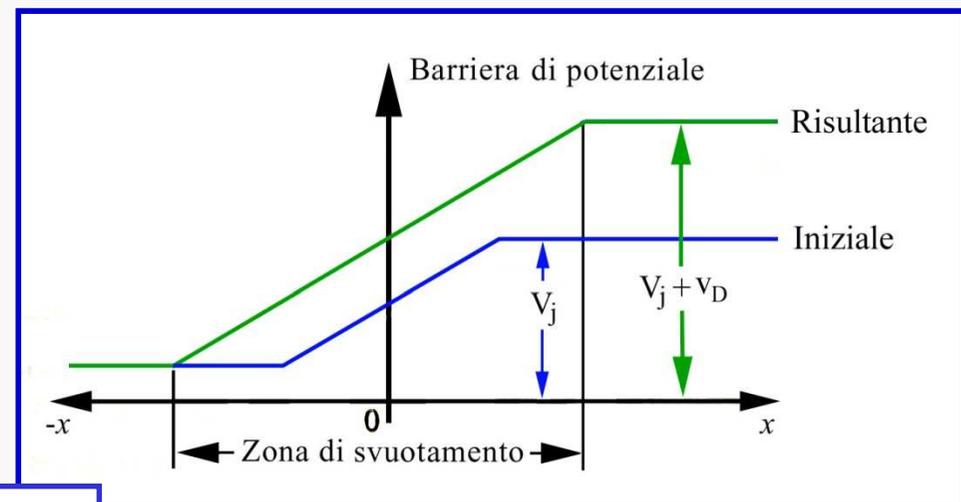
# Polarizzazione diretta



# Polarizzazione inversa

Se la zona  $n$  è a potenziale positivo rispetto alla zona  $p$  la giunzione è polarizzata inversa. Se si aumenta la tensione inversa  $v_D$  la barriera di potenziale sale a  $V_j + v_D$ .

Le lacune dalla zona  $p$  e gli elettroni dalla zona  $n$  non possono attraversare la giunzione e la corrente  $I_{Diff}$  dovuta alle cariche maggioritarie è trascurabile.

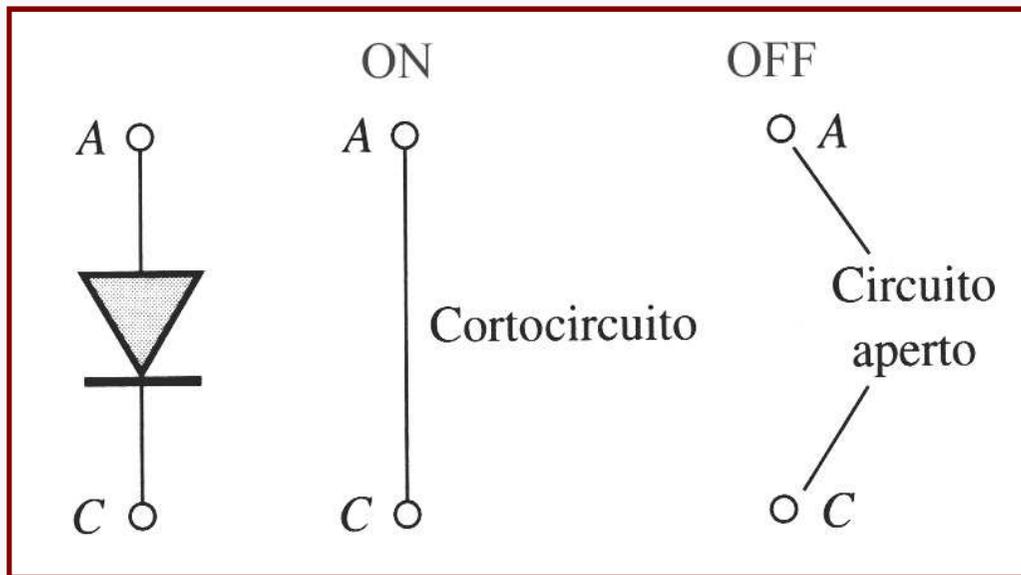


# Modello del diodo ideale

Al modello di diodo ideale è possibile associare due stati.

- Stato di conduzione (ON)
- Stato di interdizione (OFF)

Pertanto, ai fini dell'analisi del circuito possiamo utilizzare i seguenti modelli:



Se il diodo si trova nello stato di conduzione, sarà rappresentato da un corto circuito; se si trova nello stato di interdizione sarà invece rappresentato da un circuito aperto.