

T08: Dispositivi elettronici (3.3.1)

Sommario

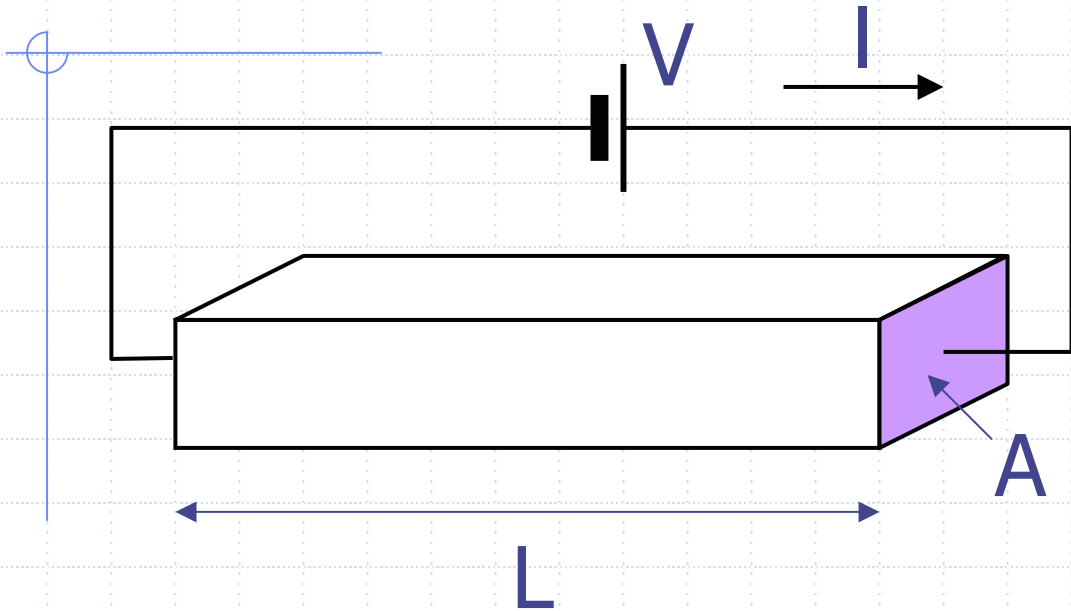
Richiami sui semiconduttori

conduttori, isolanti e semiconduttori
bande di energia
droganti nei semiconduttori
corrente di deriva e diffusione

Funzionamento della giunzione pn

elettrostatica della giunzione pn
dinamica dei portatori liberi
giunzione polarizzata
caratteristica I-V
Breakdown Zener e Valanga

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

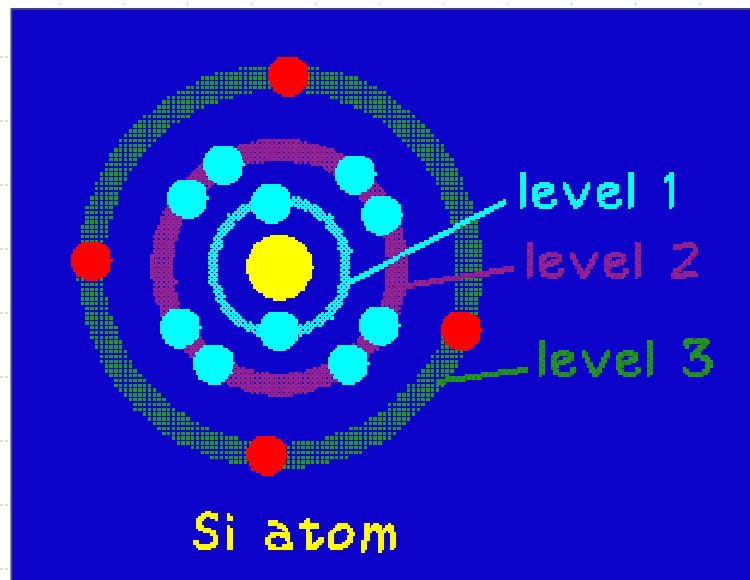
$$10^{-3} < \rho < 10^5 [\Omega \text{cm}]$$

CONDUTTORI

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

Proprietà del silicio

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



Periodic Table of the Elements

	IA																	0
1	H																	He
2	Li	Be										B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110								

* Lanthanide Series

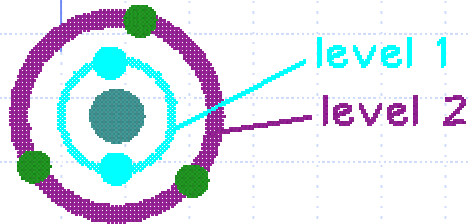
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

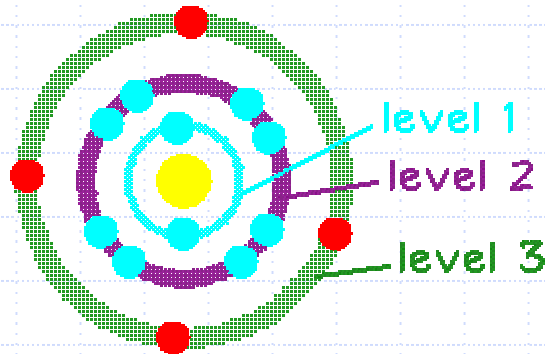
Elettroni di valenza

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.

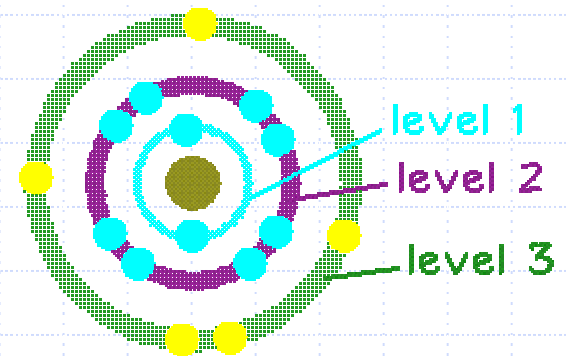


B atom

**Atomo di
Boro
3e valenza**

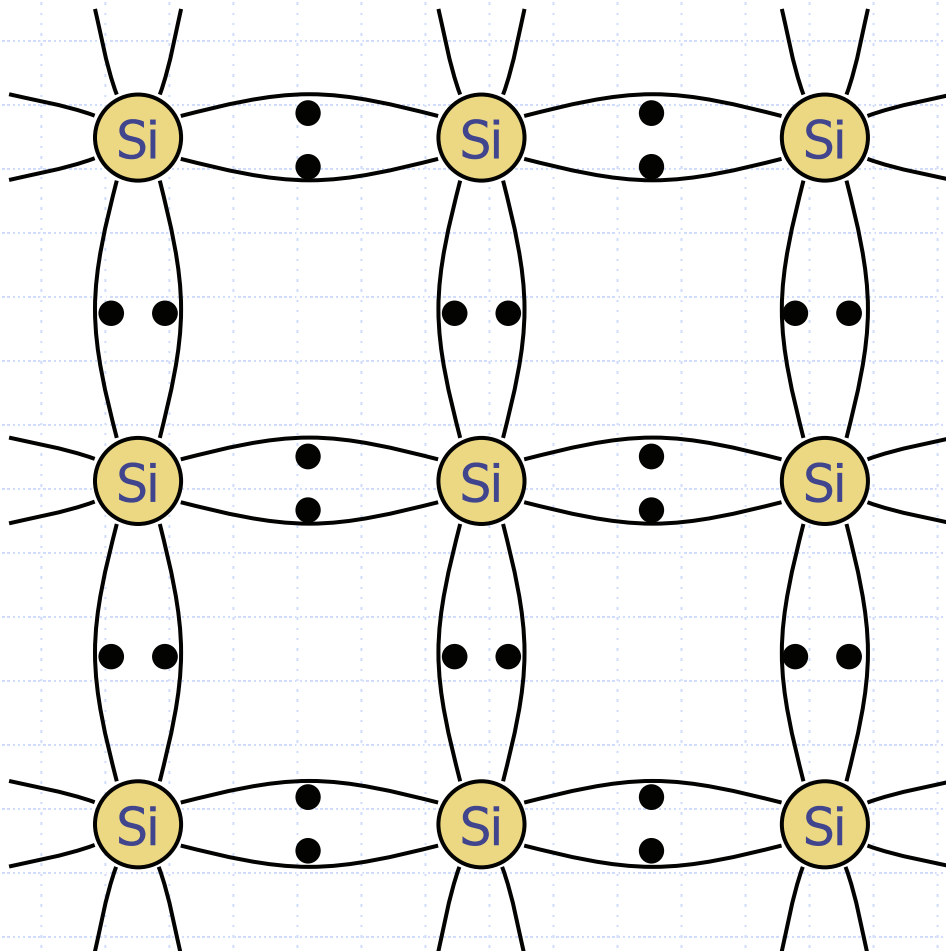


**Atomo di
Silicio
4e valenza**



**Atomo di
Fosforo
5e valenza**

Cristallo di silicio

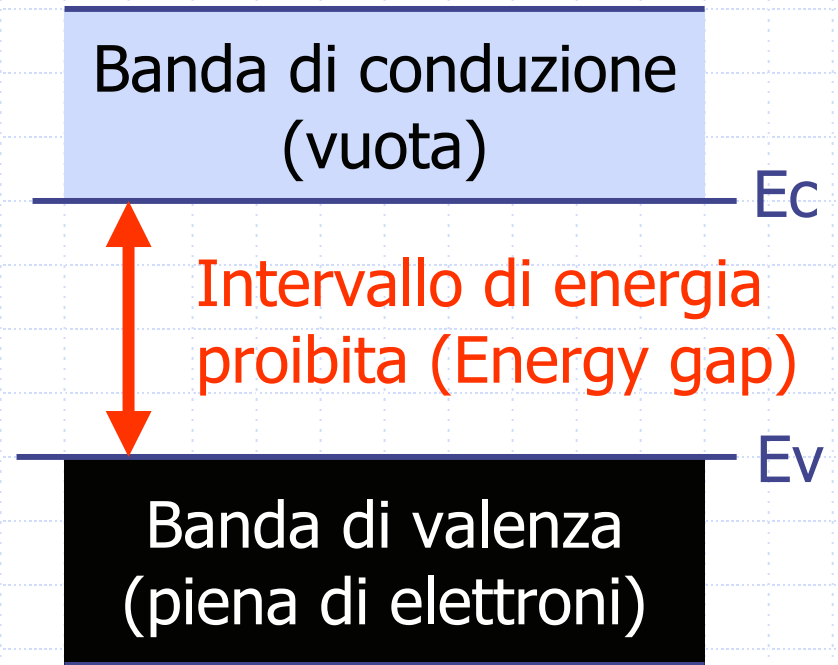
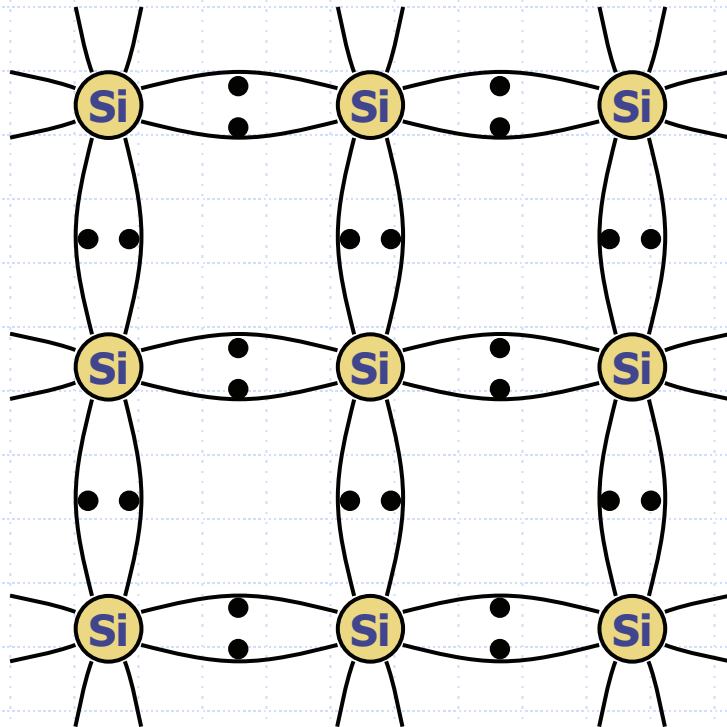


In un cristallo di silicio (o germanio) i 4 elettroni di valenza sono posti in comune tra atomi contigui nel cristallo.

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

Cristallo di silicio

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!

Metalli

Banda di conduzione
Parzialmente occupata

E_c

Nei metalli, gli elettroni di valenza sono debolmente legati agli atomi, questi sono liberi di muoversi nel reticolo.

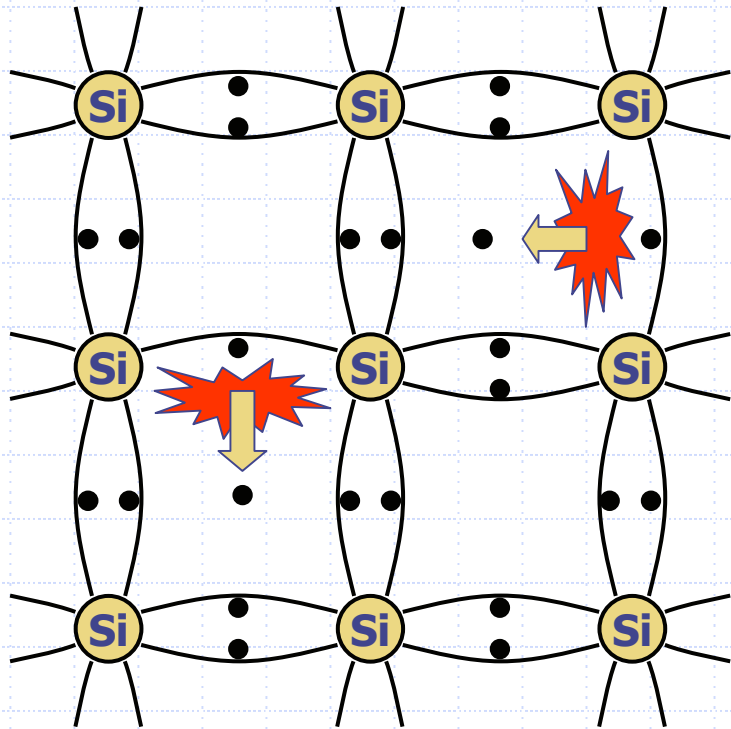
Banda di valenza
(piena di elettroni)

E_v

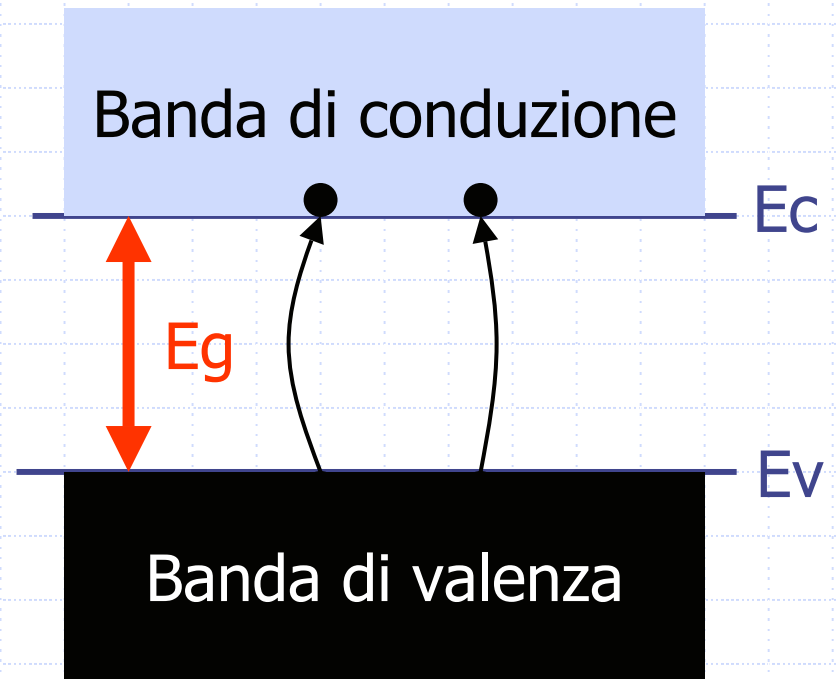
Se si applica una piccola differenza di potenziale, si ha circolazione di corrente.

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

Cristallo di silicio



Modello a bande di energia



In pratica, anche nei semiconduttori ci sono dei legami covalenti che si rompono liberando degli elettroni (e un ugual numero di lacune). **Serve E_g di energia.**

Conduttori, Semiconduttori e Isolanti

Gli elettroni di valenza, liberandosi dai relativi atomi, determinano la conduttività dei solidi.

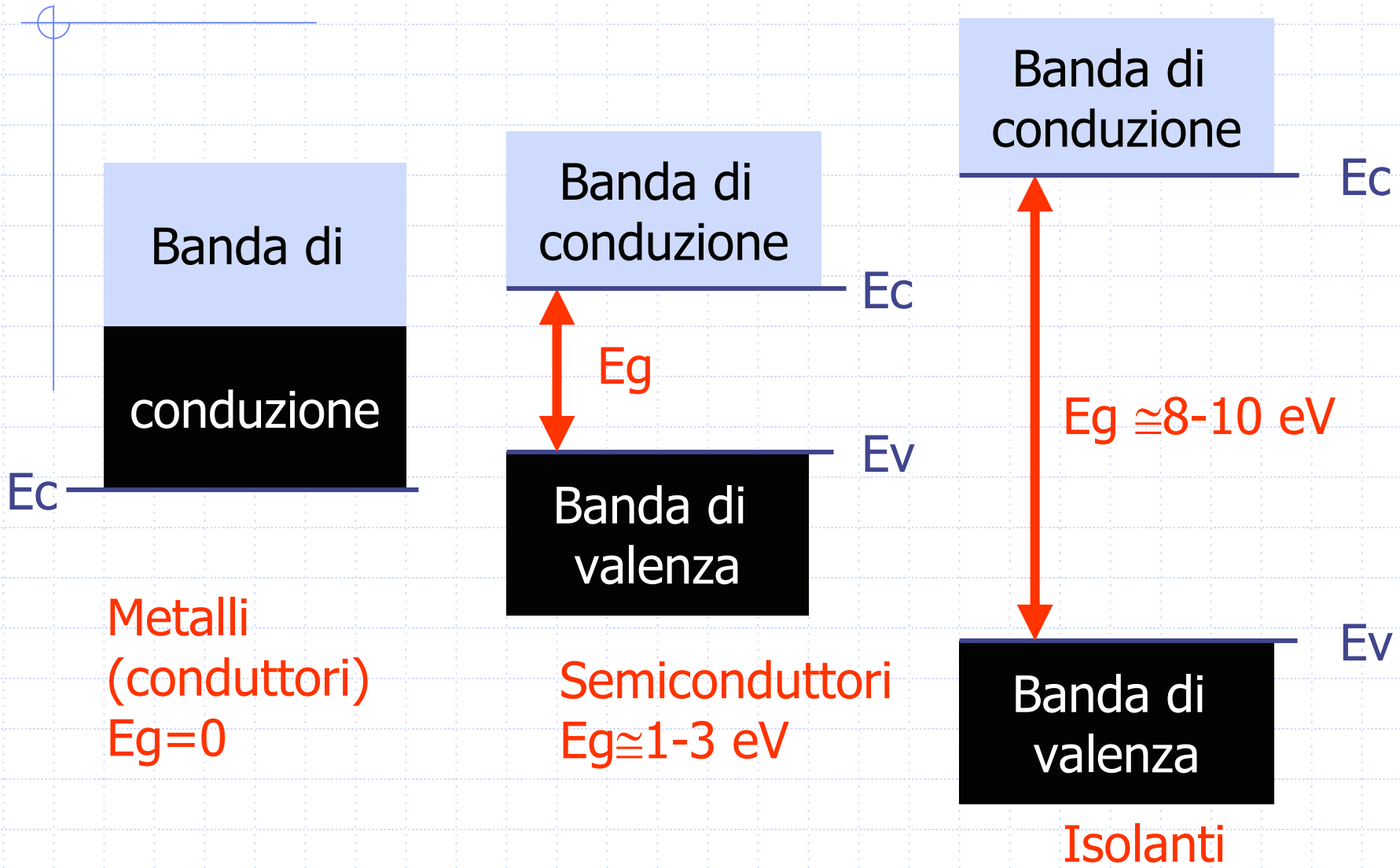
La corrente elettrica che attraversa il solido è costituita da flussi di elettroni di valenza liberati (nei conduttori).

Il numero di elettroni di valenza che in un solido riescono a liberarsi dipende fortemente da due elementi:

Energy gap e **Temperatura**.

A temperatura ambiente l'Energy gap è il parametro determinante.

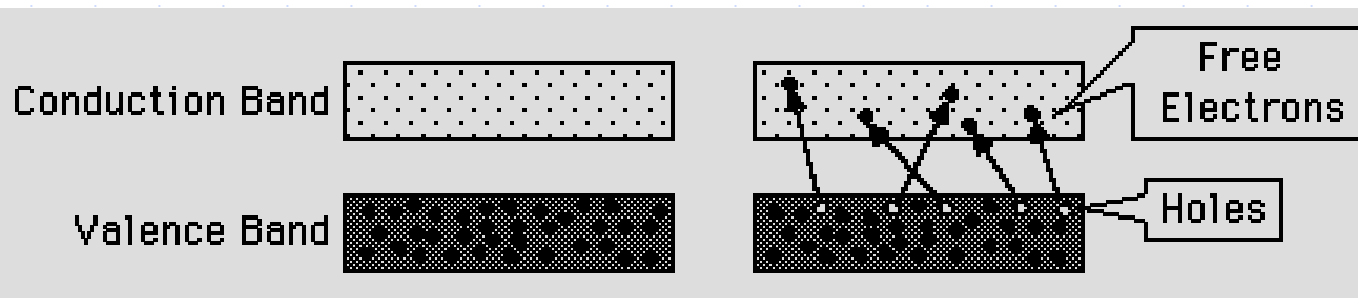
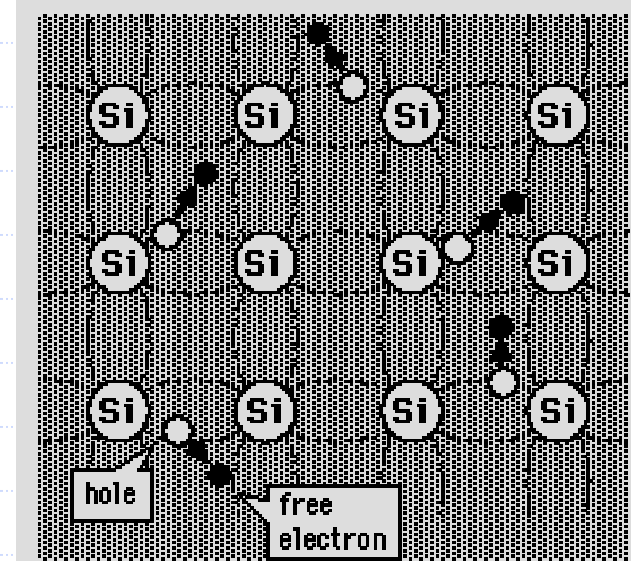
Conduttori, Semiconduttori e Isolanti



Semiconduttori intrinseci

In un cristallo di Si (o Ge) si ha, ad ogni temperatura al di sopra dello zero assoluto, una probabilità non nulla che un elettrone finisca in banda di conduzione.

L'elettrone abbandona l'atomo relativo (che diventa uno ione carico positivamente) lasciandosi dietro una lacuna.



Semiconduttori intrinseci

A temperatura ambiente (25° C) il numero n_i di elettroni che statisticamente (in un equilibrio dinamico) si trova in banda di conduzione è dell'ordine di

1.45×10^{10} elettroni/cm³.

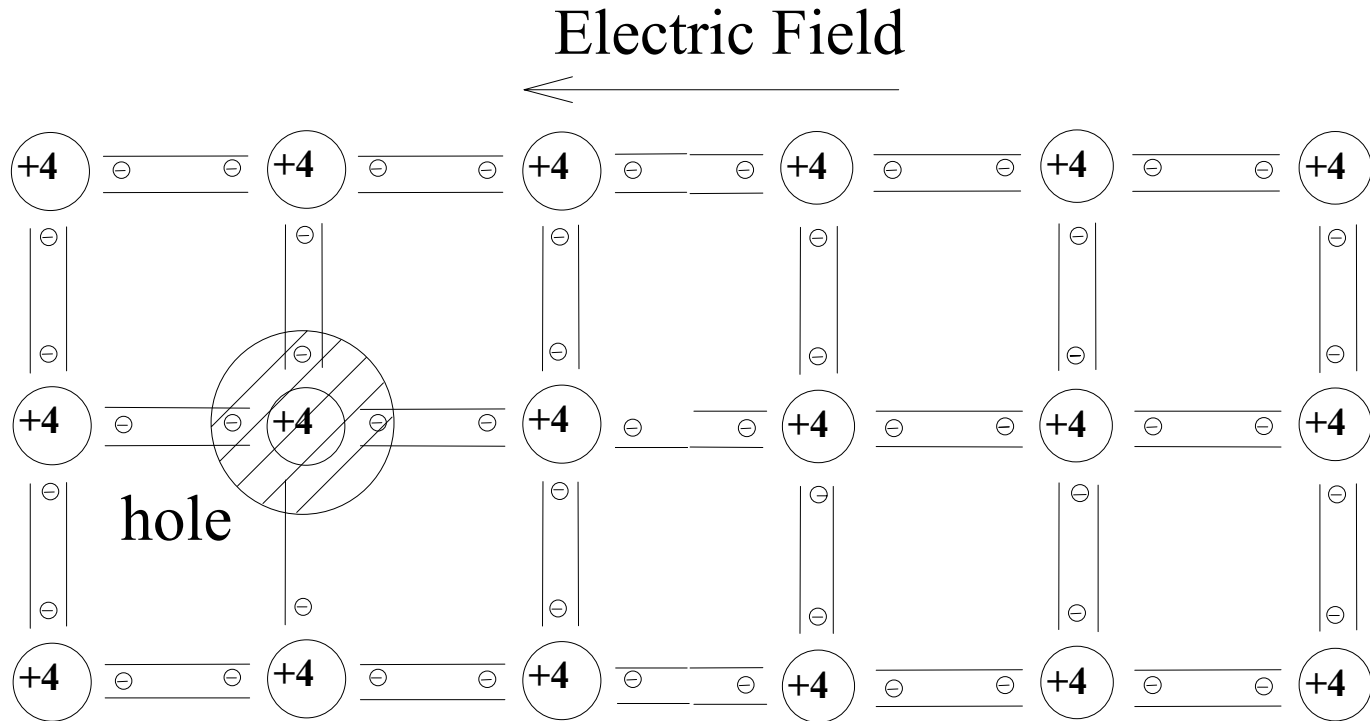
$$n_i^2 = BT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

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

$$n = p = n_i \quad np = n_i^2 \quad \text{Legge dell'azione di massa}$$

La Lacuna ovvero la carica positiva!

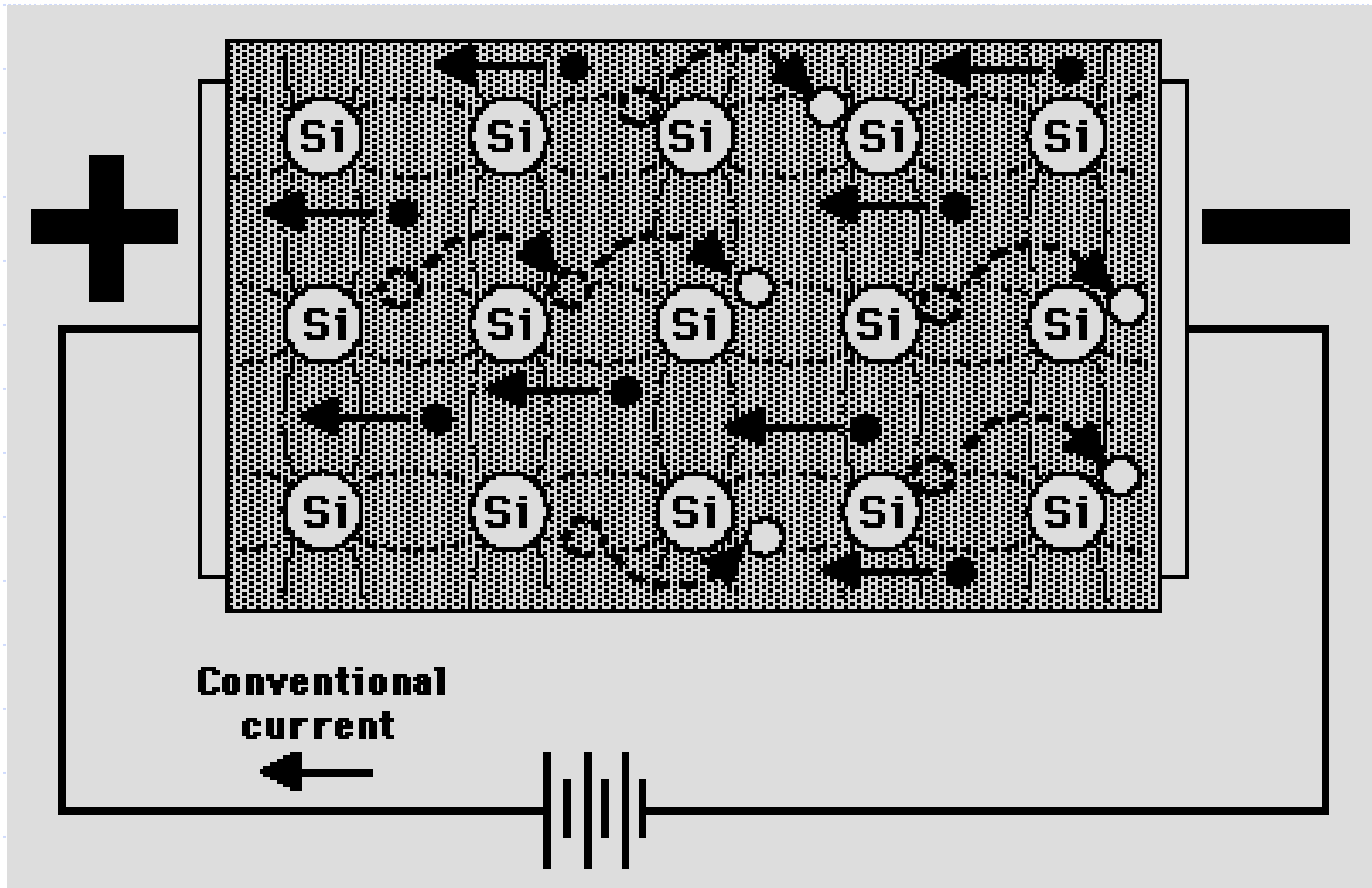


La Lacuna ovvero la carica positiva!

Le lacune si comportano come una carica positiva!



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



Corrente di Deriva

(in presenza di un campo elettrico, E)

Velocità $v \propto E$

Velocità delle lacune

$$v = \mu_p E$$

Campo E

Mobilità

Velocità (cm/s)

Velocità degli elettroni

$$v = -\mu_n E$$

Sono velocità 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

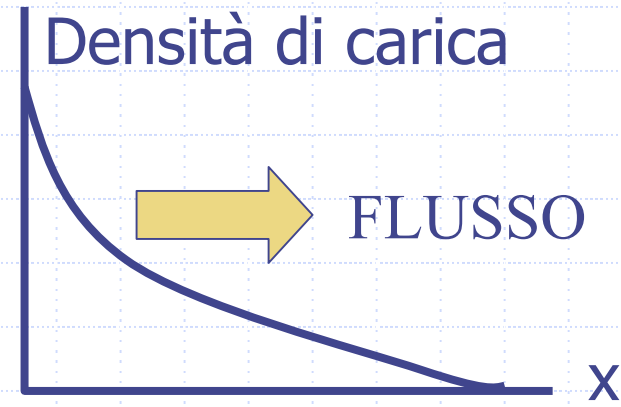
Corrente di Diffusione

(in presenza di un gradiente di concentrazione)

Corrente di lacune
"derivata negativa"
carica della lacuna
Diffusività della lacuna
Gradiente (derivata)

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$



Corrente di elettroni

Corrente di lacune

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

Corrente complessiva:

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

Deriva

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

Diffusione

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

Relazione di Einstein

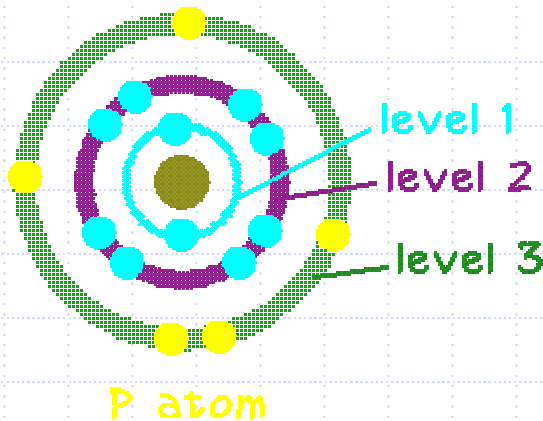
lega la diffusione con la deriva

A temperatura ambiente:

$$V_T \cong 25 \text{ mV}$$

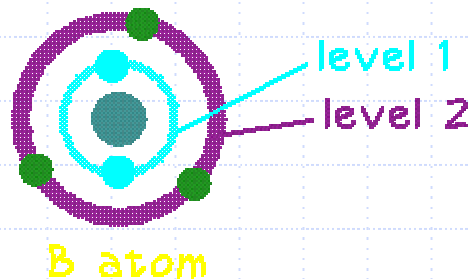
Semiconduttori drogati

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

accettori

donori

Periodic Table of the Elements

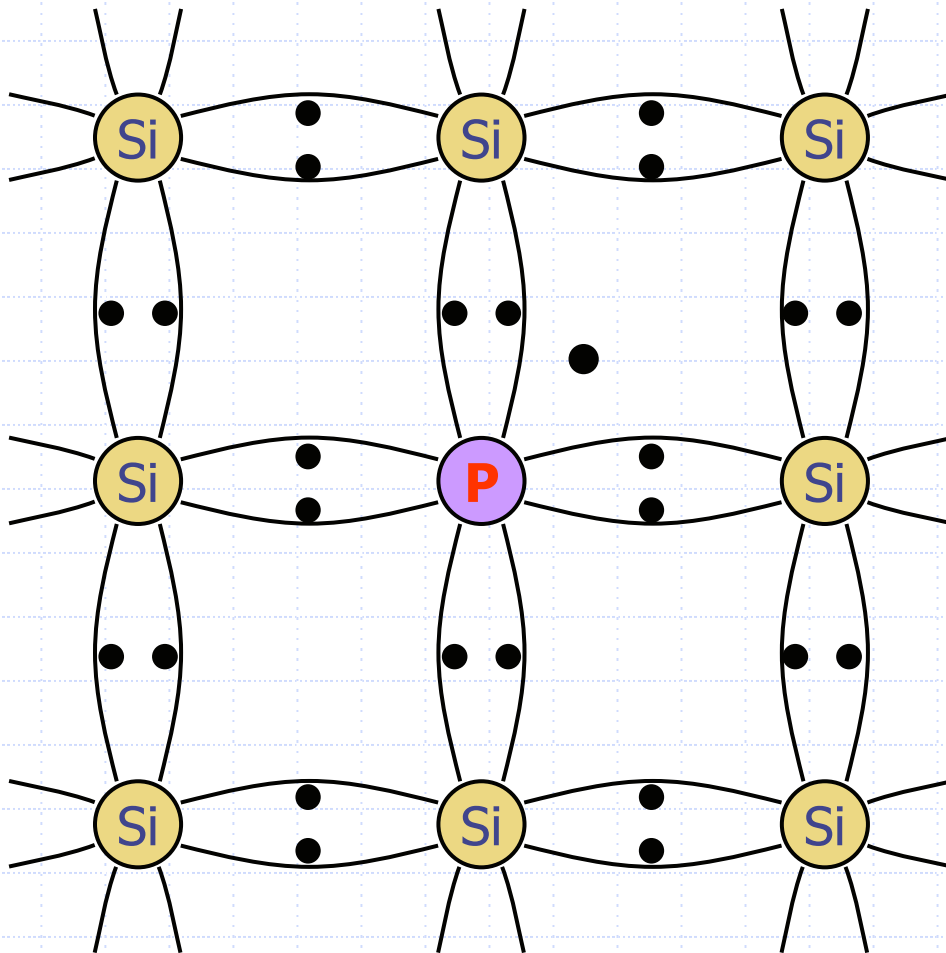
1	IA																2	0															
1	H																	He															
2	3	IIA																		10													
	Li	Be																	Ne														
3	11	12	IIIB		IVB		VB		VIB		VIIB		— VII —		IB		IB		18														
	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar																									
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36															
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr															
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54															
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe															
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86															
	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn															
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110																							
	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110																							

* Lanthanide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
+ Actinide Series													
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Silicio drogato “tipo n”

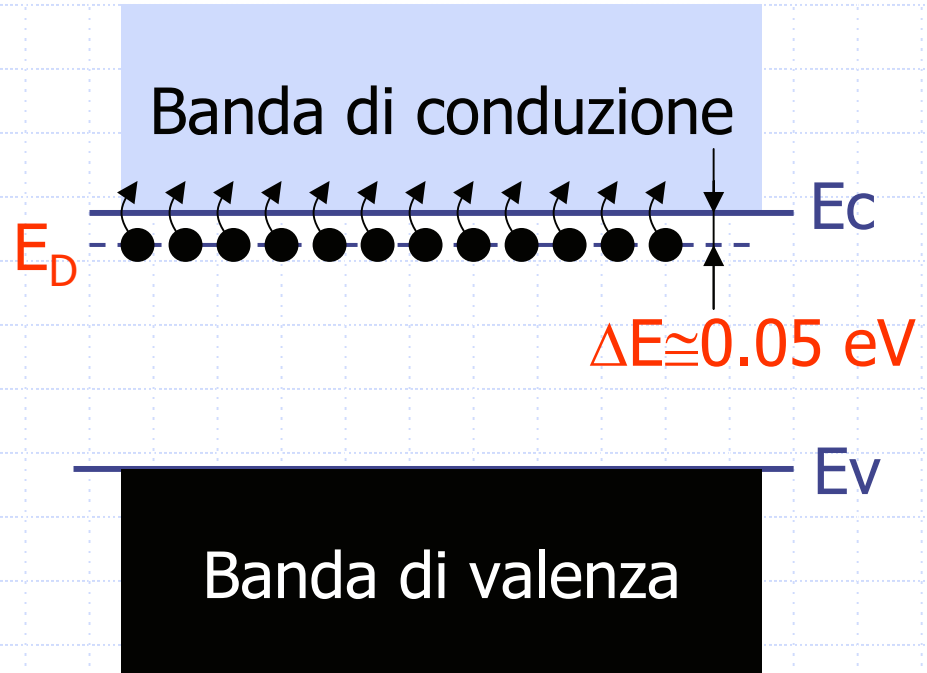
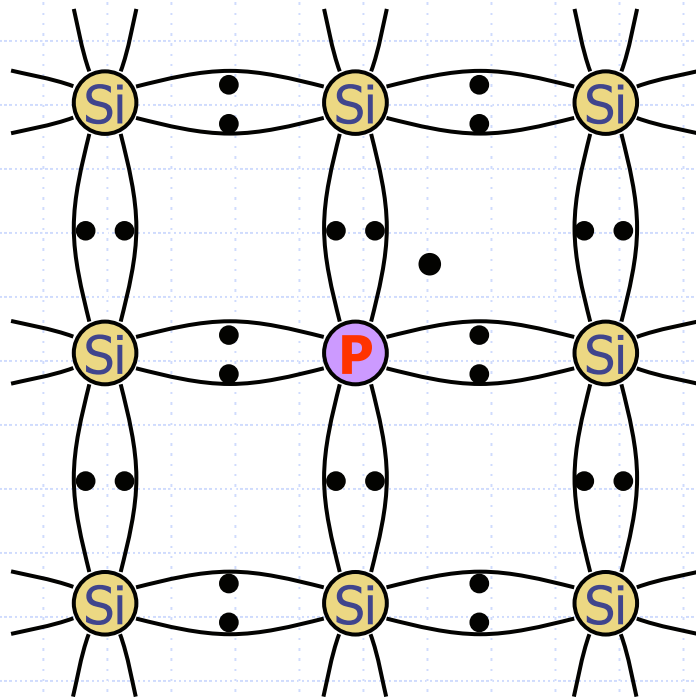
Con atomi “donatori”



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**”

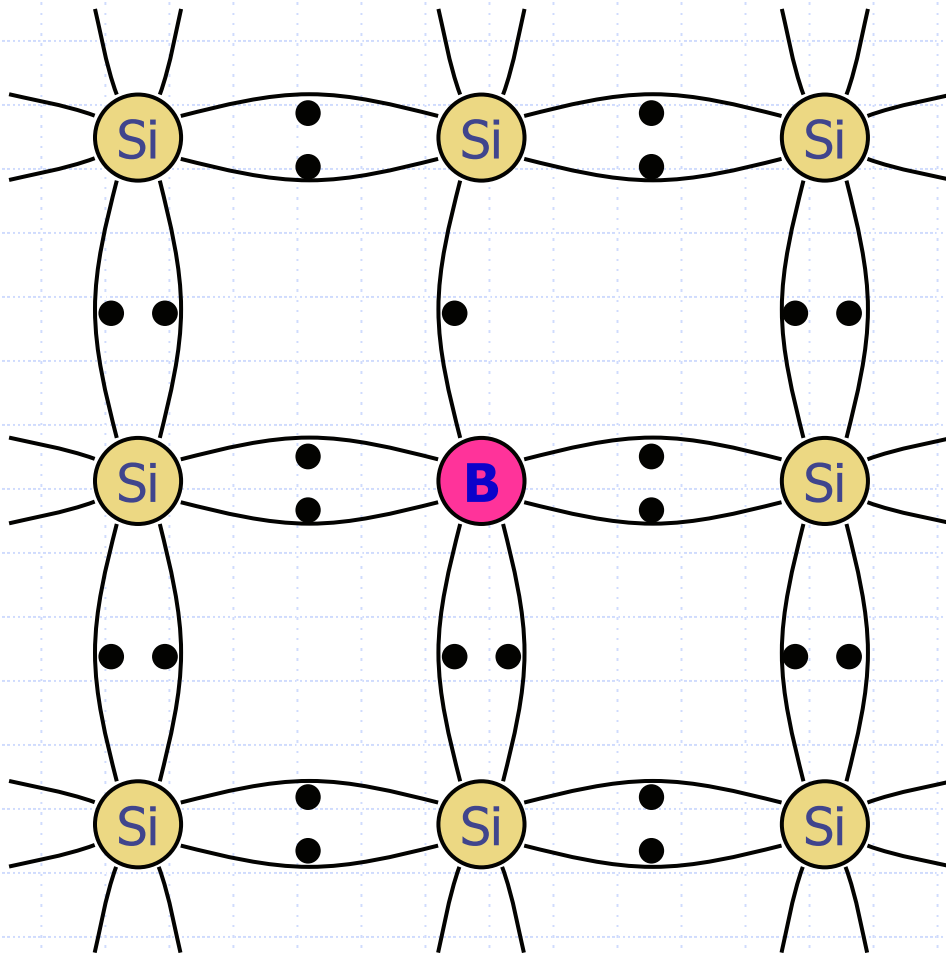
Silicio drogato “tipo n” Con atomi “donatori”



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

Silicio drogato “tipo p”

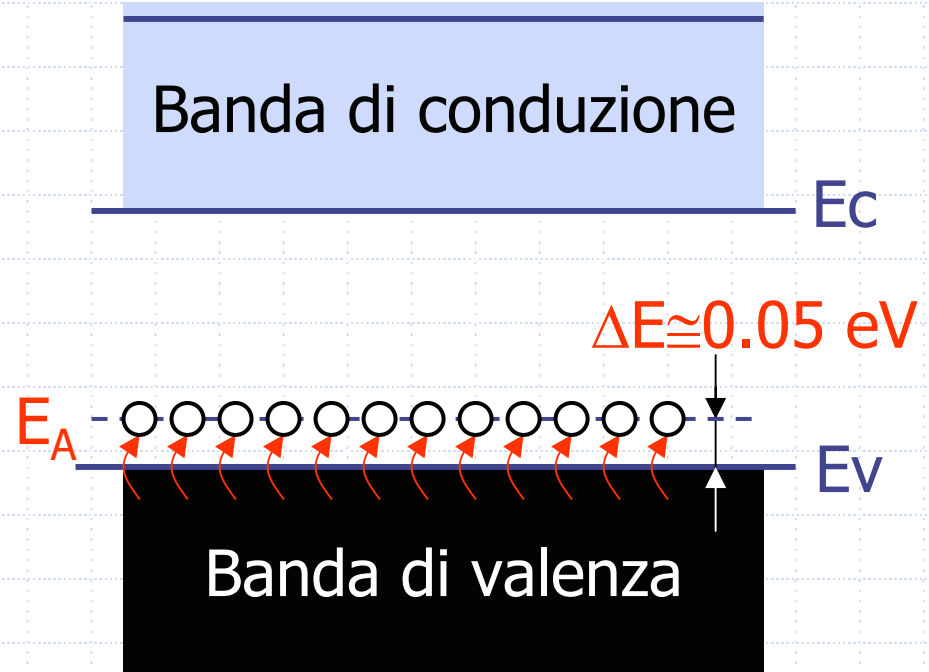
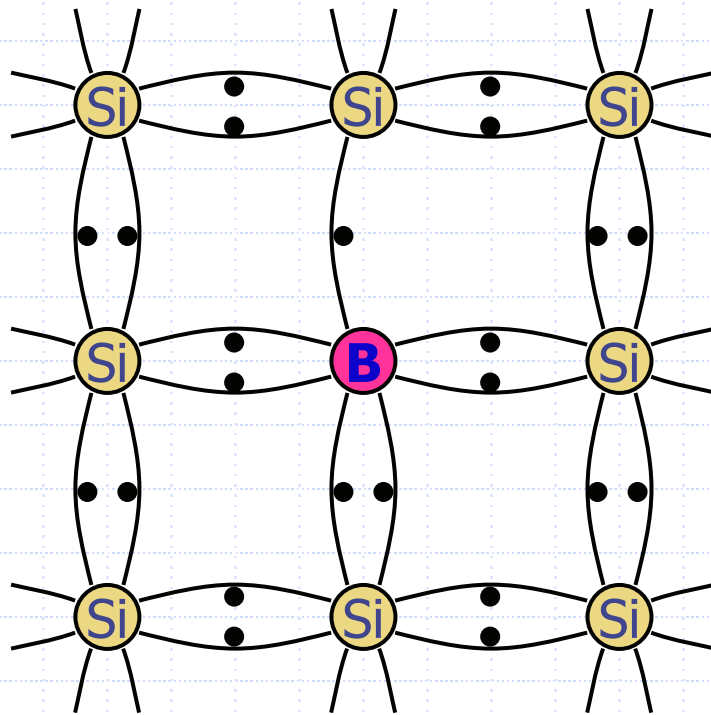
Con atomi “accettori”



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 $N_A [\text{cm}^{-3}]$ donatori allora $p = p_i + N_A \cong N_A$

Silicio drogato

Drogaggio tipicamente dell'ordine di $10^{15} - 10^{18}$ atomi/cm³ (un atomo drogato ogni $10^7 - 10^4$).

Numero n_n di elettroni in Silicio drogato n

(o p_p di lacune in cristallo drogato p) dell'ordine di $10^{15} - 10^{18}$ particelle/cm³, **dovuti quindi in pratica al solo drogaggio.**

In generale, si può mostrare che il prodotto tra le concentrazioni di elettroni e lacune è indipendente dal drogaggio: $n_n p_n = n_i p_i = n_p p_p$, e dell'ordine di 10^{20} .

Legge dell'azione di massa:

$$np = n_i p_i = n_i^2 \approx 2.1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-6}$$

Silicio drogato

Semiconduttore tipo "n":

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

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":

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

Esempio:

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

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

Si intrinseco vs Si drogato

Silicio intrinseco:

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

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

Silicio tipo "n":

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

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

Mobilità funzione della concentrazione dei droganti

