

# I MATERIALI SEMICONDUCTORI PER L'ELETTRONICA

Fondamenti di elettronica

# SOMMARIO

- come è fatto un **crystallo** semiconduttore di Silicio
- **che cosa significhi "materiale semiconduttore"**
- **quali proprietà** manifestino questi materiali
- in quali modi e sotto quali condizioni è possibile un passaggio di **corrente** al loro interno.

# IL SILICIO

- E' il materiale principe dell'elettronica contemporanea.

1	IA	1	H	$1s$	13.5984	2	VIII	2	He	$1s^2$	4.00260
2	IIA	3	Li	$2s_{1/2}$	6.941	3	IB	13	B	$2p_{1/2}^2$	10.811
		4	Be	$1s_0$	9.01218			14	C	$2p_0^2$	12.0107
		11	Na	$3s_{1/2}$	22.98977			15	N	$2s_{1/2}^2 2p_1^2$	14.00674
		12	Mg	$1s_0$	24.3050			16	O	$2s_{1/2}^2 2p_2^2$	15.99940
		19	K	$4s_{1/2}$	39.0983			17	F	$2s_{1/2}^2 2p_3^2$	18.99840
		20	Ca	$1s_0$	40.078			18	Ne	$2s_{1/2}^2 2p_3^2$	20.1797
		21	Sc	$3d_{3/2}$	44.95591			35	Br	$4s_{1/2}^2 4p_3^5$	79.904
		22	Ti	$3d_{5/2}$	47.867			36	Kr	$4s_{1/2}^2 4p_3^6$	83.80
		23	V	$4s_{1/2}$	50.9415			51	Sb	$5s_{1/2}^2 5p_3^3$	121.760
		24	Cr	$3d_{5/2}$	51.9961			52	Te	$5s_{1/2}^2 5p_3^4$	127.60
		25	Mn	$4s_{1/2}$	54.93805			53	I	$5s_{1/2}^2 5p_3^5$	126.90447
		26	Fe	$3d_{5/2}$	55.845			54	Xe	$5s_{1/2}^2 5p_3^6$	131.29
		27	Co	$4s_{1/2}$	58.93320						
		28	Ni	$3d_{8/2}$	58.6934						
		29	Cu	$4s_{1/2}$	63.546						
		30	Zn	$1s_0$	65.39						
		31	Ga	$4p_{1/2}$	69.723						
		32	Ge	$3p_0$	72.61						
		33	As	$4s_{3/2}$	74.92160						
		34	Se	$3p_2$	78.96						
		35	Br	$4s_{3/2}$	79.904						
		36	Kr	$1s_0$	83.80						
		37	Rb	$5s_{1/2}$	85.4678						
		38	Sr	$1s_0$	87.62						
		39	Y	$5d_{3/2}$	88.90585						
		40	Zr	$3d_{5/2}$	91.224						
		41	Nb	$5d_{3/2}$	92.90638						
		42	Mo	$4d_{5/2}$	95.94						
		43	Tc	$5s_{1/2}$	(98)						
		44	Ru	$4d_5$	101.07						
		45	Rh	$5d_{5/2}$	102.90550						
		46	Pd	$1s_0$	106.42						
		47	Ag	$5s_{1/2}$	107.8682						
		48	Cd	$1s_0$	112.411						
		49	In	$5p_{1/2}$	114.818						
		50	Sn	$3p_0$	118.710						
		51	Sb	$4s_{3/2}$	121.760						
		52	Te	$3p_2$	127.60						
		53	I	$4s_{3/2}$	126.90447						
		54	Xe	$1s_0$	131.29						

IV gruppo

- Numero atomico  $Z=14$

⇒ 14 protoni nel nucleo e 14 elettroni all'esterno

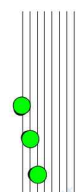
- Se vuoi saperne di più sulla tabella periodica degli elementi, consulta <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Elements/index.html>

Fondamenti di elettronica

# MODELLO DEL SILICIO ATOMICO

$E_0$   
(livello di vuoto)

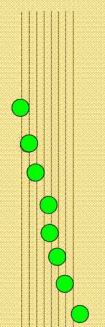
8 stati possibili occupati da 4  $e^-$



$n = 3$

più debolmente legati al nucleo nel livello esterno (4 elettroni di valenza  $\rightarrow$  IV gruppo)

8 stati possibili occupati da 8  $e^-$



$n = 2$

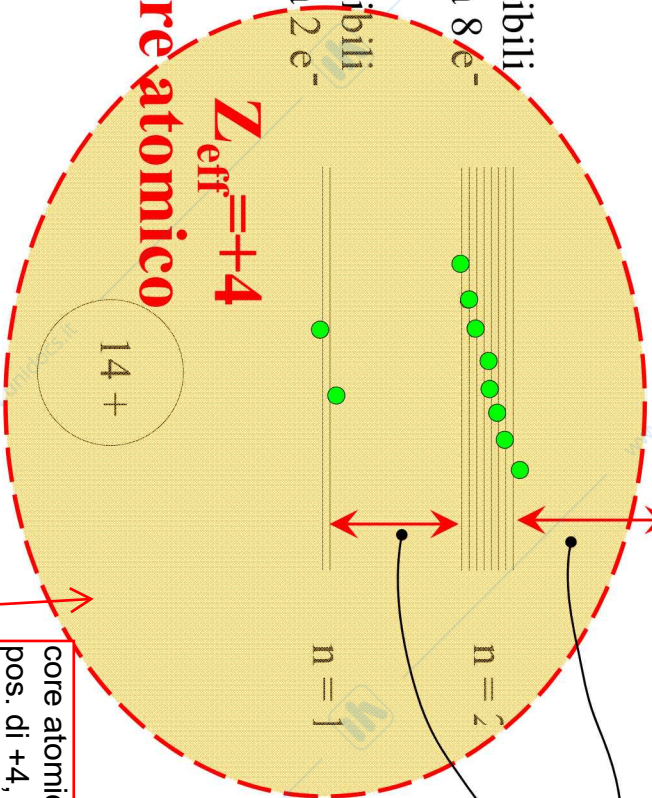
La distanza tra i livelli energetici è, al più, di qualche **electron Volt**

2 stati possibili occupati da 2  $e^-$



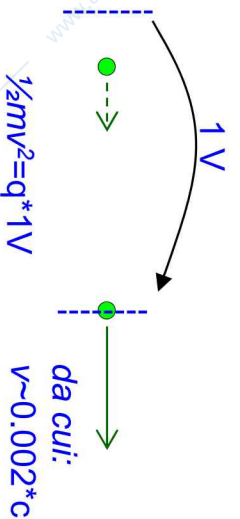
$n = 1$

$Z_{eff} = +4$   
**core atomico**



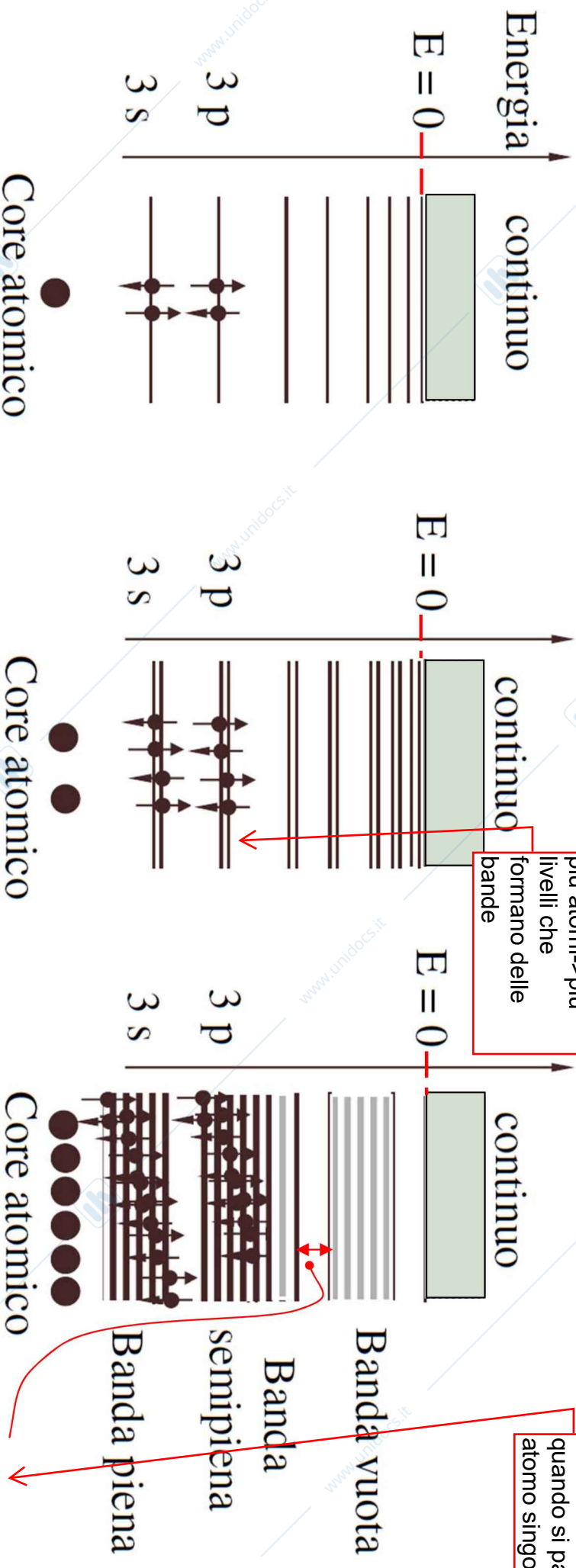
core atomico con carica pos. di +4, che è il nucleo atomico efficace che tiene attaccati i 10 elettroni dei 14

L'unità di misura dell'energia comoda in elettronica è l'electron Volt, eV:  
 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ joules}$



Fondamenti di elettronica

# DAI LIVELLI ENERGETICI DEGLI ATOMI ALLE BANDE DI ENERGIA DEI CRISTALLI



più atomi -> più livelli che formano delle bande

tipo i salti tra i livelli atomici quando si parla di atomo singolo

**Banda di conduzione:** banda vuota o semipiena di energia piu' bassa

**Banda di valenza:** banda piena di energia piu' elevata

**Energy gap = 1.1 eV in Si**  
(energia necessaria per «ionizzare» l'atomo di Si, ovvero promuovere un elettrone «libero» nel cristallo)

- nei metalli (o conduttori) le bande di energia si sovrappongono a dare una unica banda energetica parzialmente piena → elettroni «liberi» di muoversi
- nei semiconduttori tra banda di valenza e banda di conduzione vi e' un moderato «gap» energetico (~1 eV)
- negli isolanti il gap energetico e' grande (< 5eV)

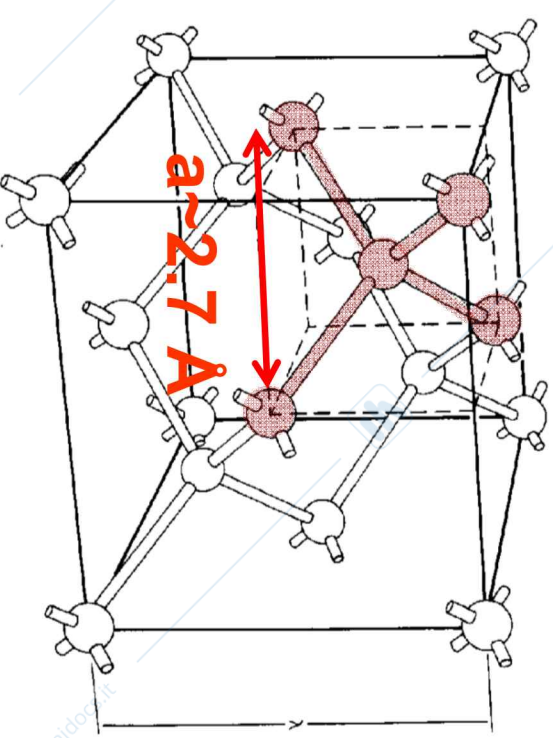
fanno fatica a saltare sulla banda successiva poichè troppo lontana

# RAPPRESENTAZIONE 3D DI UN CRISTALLO DI SILICIO

- Ogni atomo di silicio si lega con altri **4 atomi**
- La disposizione spaziale è perfettamente simmetrica, con gli **atomi ai vertici di un tetraedro**
- Tetraedri contigui si legano a formare il **cristallo**

$$\rho = \frac{5 \times 10^{22} \text{ atomi}}{1 \text{ cm}^3} = \frac{1}{a^3}$$

$$\rightarrow a = (5 \times 10^{22})^{-1/3} [\text{cm}] = 2.7 \times 10^{-8} [\text{cm}] = 2.7 [\text{\AA}]$$

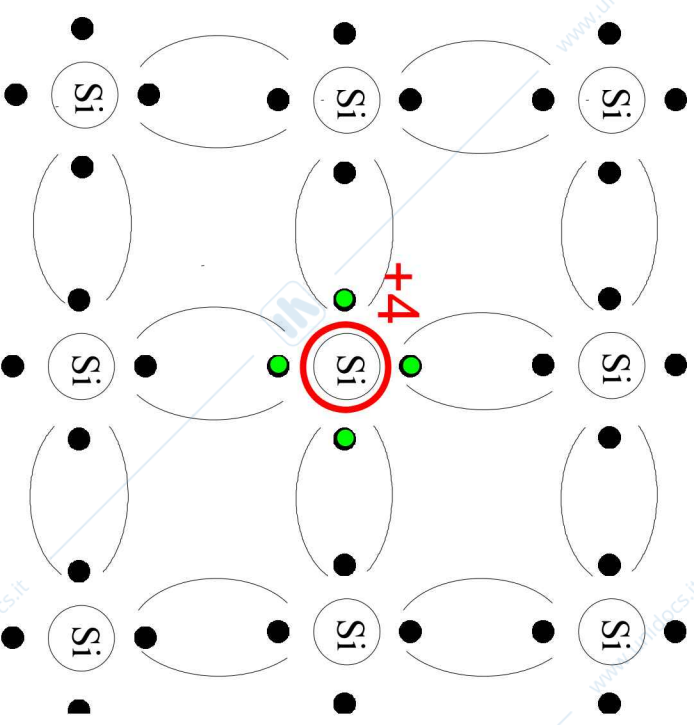


- In **1 cm<sup>3</sup>** di silicio cristallino ci sono **5 x 10<sup>22</sup> atomi**

# RAPPRESENTAZIONE 2D DI UN CRISTALLO DI SILICIO

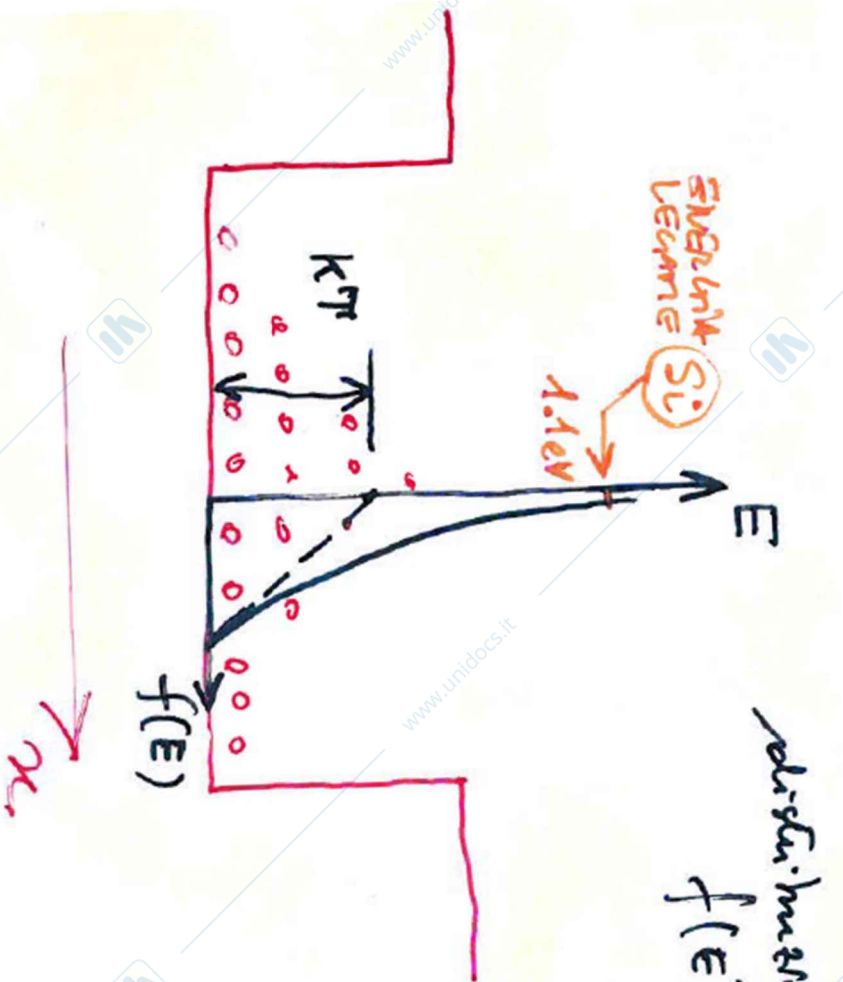
**A  $T=0$  K:**

- Nessun elettrone libero disponibile per la conduzione
- Il materiale si comporta da isolante !



# DISTRIBUZIONE ENERGETICA DEGLI ELETTRONI

## la distribuzione di Boltzmann



distribuzione di Boltzmann

$$f(E) \propto e^{-E/kT}$$

$$k_B = 8,617\ 333\ 262... \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1} \text{ (esatto)}$$

$$k_B = 1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \text{ (esatto)}$$

$$\langle E \rangle = \int E f(E) dE = kT$$

- Energia media di ciascuna particella (per grado di liberta')

- @  $T=300 \text{ K} \rightarrow \langle E \rangle = 25 \text{ meV}$ , la cosiddetta *energia termica* dei portatori
- oppure possiamo esprimere tale energia come una tensione (*tensione termica*):  
 @  $T=300 \text{ K} \rightarrow V_{th} = \langle E \rangle / q = kT/q = 25 \text{ meV}/q = 25 \text{ mV}$

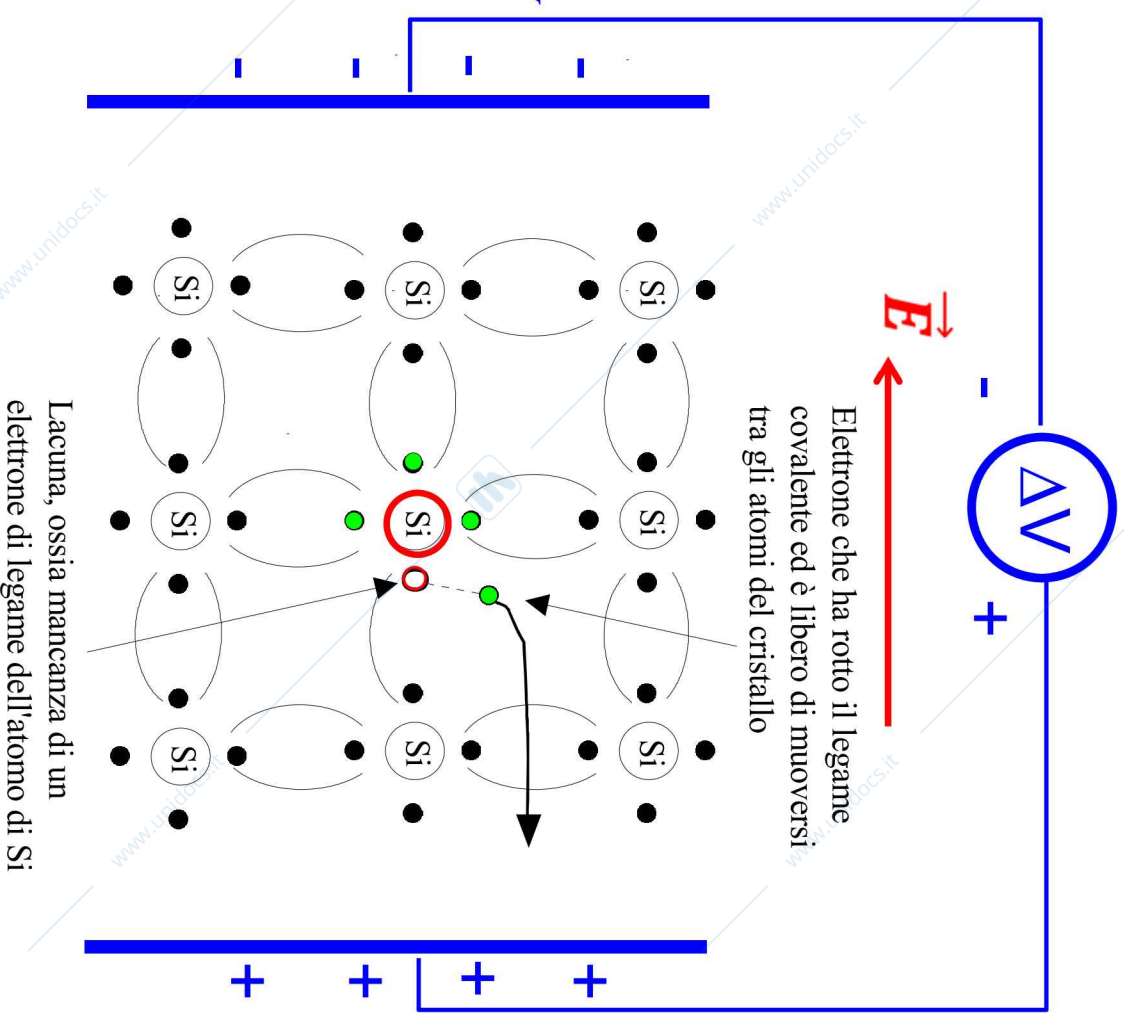
# I PORTATORI DELLA CORRENTE : gli ELETTRONI

- A temperatura ambiente (circa 27°C, ossia 300K), l'agitazione termica del cristallo provoca la rottura di *alcuni* legami covalenti degli atomi di Si

Ricordiamoci che:

- L'energia minima per rompere il legame è di 1.1eV
- L'energia media dei portatori  $\langle E \rangle \approx kT = 25 \text{ meV}$

- L'ELETTRONE libero, trascinato da un campo elettrico, può muoversi nel cristallo e dare luogo ad una CORRENTE ELETTRICA



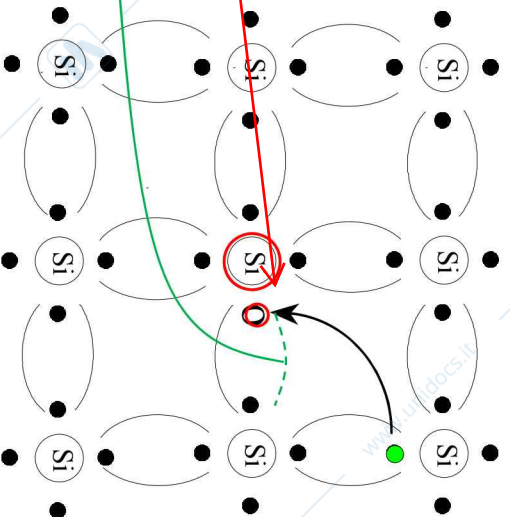
# I PORTATORI DELLA CORRENTE : le LACUNE

- ... ma anche gli elettroni di valenza possono muoversi ...

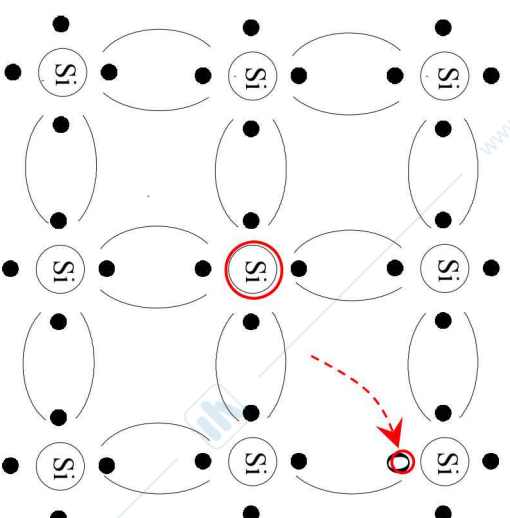


Un elettrone di valenza può occupare la posizione della lacuna...

la lacuna viene riempita da un elettrone di valenza (senza dover saltare di banda, semplicemente spostando il suo legame covalente con l'atomo che ha una lacuna) lasciando un'altra lacuna (corrente positiva in quel verso)



... liberando una lacuna nell'atomo da cui proviene.



- ... facendo scorrere in senso opposto la lacuna, cioè la mancanza di un legame covalente.

- Corrente totale:  $I = I_n + I_p$

# I PORTATORI DELLA CORRENTE : ELETTRONI e LACUNE

Nel silicio la conduzione di carica è quindi realizzata *contemporaneamente* e *indipendentemente* dagli:

- **elettroni liberi ( o di conduzione )** che si muovono “tra” gli atomi e quindi “tra” i legami covalenti che gli atomi di silicio stabiliscono tra di loro nel cristallo,

tra le bande di valenza e conduzione

- **elettroni di valenza** che si muovono “lungo” i legami covalenti che tengono uniti gli atomi di silicio.

nella stessa banda di valenza

Quest’ultimo meccanismo di trasporto è normalmente visualizzato dallo spostamento, in direzione opposta, delle rispettive lacune.

# CORRENTE ELETTRICA

$$I = \rho_f \cdot S \cdot (v \cdot \Delta t) / \Delta t$$

$$J = I/S = \rho_f \cdot v$$

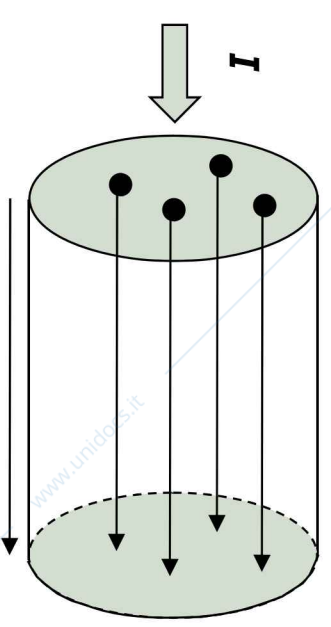
La corrente elettrica è quindi formata da:

- **moto degli elettroni di conduzione, e**
- **moto degli elettroni di valenza.**

La corrente degli elettroni di valenza può anche essere espressa come **moto delle lacune** corrispondenti, purché queste siano immaginate avere **carica positiva** (in modulo uguale a quella dell'elettrone) perché muovendosi in senso opposto.

- In generale la densità' di corrente (corrente per unità' di superficie):

$$J = I/S \rightarrow J = \sum_i^{\text{unit volume}} q_i v_i$$



# CONCENTRAZIONE di ELETTRONI e di LACUNE

## *legge di azione di massa*

- In un cristallo puro di Si, la densità di elettroni ( $n$ ) necessariamente eguaglia la densità di lacune ( $p$ ) ed è pari, alla temperatura ambiente (300 K), a :

$$n_i = p_i \cong 1.4 \times 10^{10} \text{ portatori/cm}^3$$

- Questo valore va confrontato con la densità di atomi di silicio, cioè con il numero di legami che si sarebbero potuti rompere, pari a  $5 \times 10^{22}$  atomi/cm<sup>3</sup>, enormemente di più !!!
- Il prodotto  $np = n_i^2 \cong 2 \times 10^{20}$  (portatori/cm<sup>3</sup>)<sup>2</sup> a T=300K. Tale prodotto è una costante, ovvero se tentiamo di aumentare la concentrazione di un tipo di portatore, l'altra diminuisce in modo da mantenere il prodotto  $np$  costante (*legge di azione di massa*)

## Significato di SEMICONDUETTORE

- Quando un materiale, alla temperatura di interesse, ha una modesta frazione di legami covalenti rotti e dà luogo ad elettroni e lacune libere di muoversi e produrre corrente, esso viene chiamato **MATERIALE SEMICONDUETTORE**.
- Un **ISOLANTE**, come il diamante o la ceramica ( $\text{SiO}_2$ ), non ha elettroni né lacune per la conduzione di corrente perché i legami tra gli atomi contigui sono così forti che nessuno è spezzato.
- Un **CONDUTTORE**, come il rame o l'alluminio, è formato da atomi che perdono tutti un elettrone, fornendo quindi un numero di elettroni liberi per la conduzione pari al numero di atomi presenti e senza generare lacune.

# ALTRI MATERIALI SEMICONDUCTORI

- Germanio (Ge)
- i composti di 2 elementi delle colonne III-V : GaAs, InP...
- i composti di 3 (ternari) o di 4 (quaternari) elementi : GaAlAs, GaInAsP .....
- i composti II-VI : CdTe ...

	IIIB	IVB	VB	VIB
5	<b>B</b> Boron 10.811 $1s^2 2s^2 2p$ 8.2980	<b>C</b> Carbon 12.0107 $1s^2 2s^2 2p^2$ 11.2603	<b>N</b> Nitrogen 14.00674 $1s^2 2s^2 2p^3$ 14.5341	<b>O</b> Oxygen 15.9994 $1s^2 2s^2 2p^4$ 13.6181
13	<b>Al</b> Aluminum 26.98154 $[Ne]3s^2 3p$ 5.9858	<b>Si</b> Silicon 28.0855 $[Ne]3s^2 3p^2$ 8.1517	<b>P</b> Phosphorus 30.97376 $[Ne]3s^2 3p^3$ 10.4867	<b>S</b> Sulfur 32.066 $[Ne]3s^2 3p^4$ 10.3600
31	<b>Ga</b> Gallium 69.723 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p$ 5.9993	<b>Ge</b> Germanium 72.61 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^2$ 7.8994	<b>As</b> Arsenic 74.92160 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^3$ 9.7886	<b>Se</b> Selenium 78.96 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^4$ 9.7524
49	<b>In</b> Indium 114.818 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p$ 5.7864	<b>Sn</b> Tin 118.710 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^2$ 7.3439	<b>Sb</b> Antimony 121.760 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^3$ 8.6084	<b>Te</b> Tellurium 127.60 $[Kr]4d^{10} 5s^2 5p^4$ 9.0096
48	<b>Cd</b> Cadmium 112.411 $[Kr]4d^{10} 5s^2$ 8.9938			

# TECNICA DI FABBRICAZIONE DI SI CRISTALLINO PURO

- Il silicio è presente nei composti naturali come la silice ed i silicati (la comune sabbia!).
- Questi vengono fusi in fornaci e purificati selezionando il solo silicio.
- Nel crogiuolo di silicio fuso è immerso un “seme” di cristallo di silicio che viene poi lentamente sollevato ruotandolo.
- Il silicio fuso si attacca al seme e, mentre esce dal crogiuolo e si raffredda, riproduce la struttura cristallina del seme
- Si realizzano lingotti del diametro di 20cm e lunghi fino ad 1m.

