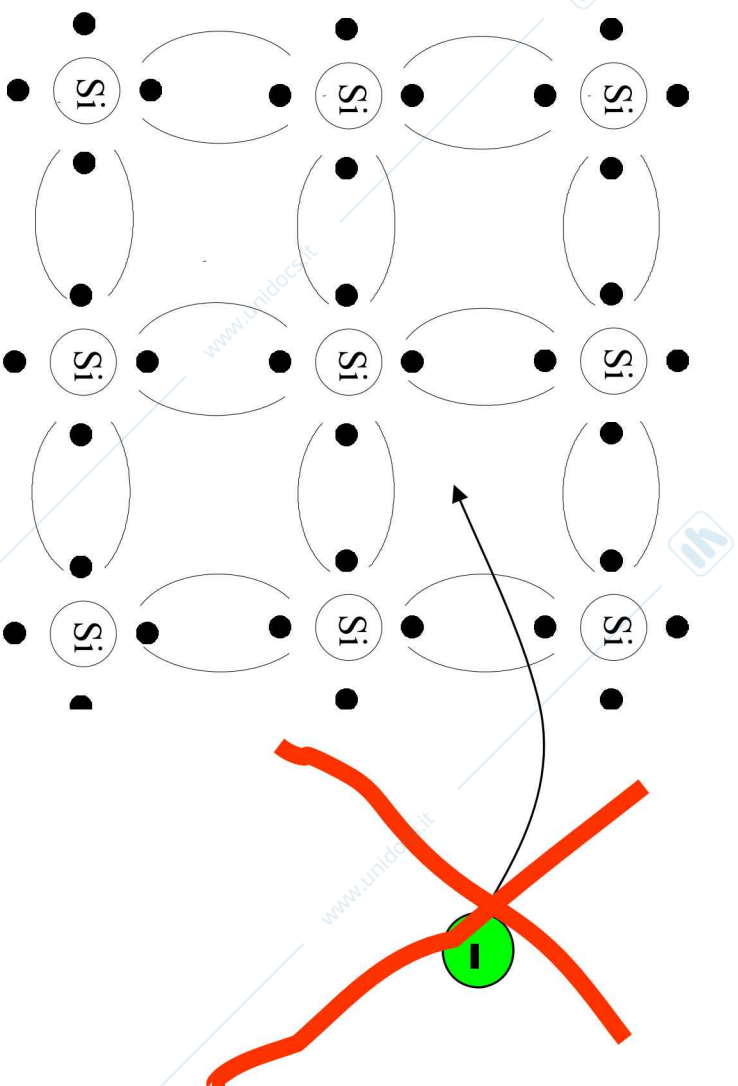


# I PORTATORI e la CORRENTE nei DISPOSITIVI SEMICONDUCTORI

Fondamenti di Elettronica

# Come si può variare la concentrazione di $n$ e/o di $p$ ?



- **NON** aggiungendo elettroni dall'esterno perché il cristallo si caricherebbe ed assumerebbe un potenziale tale da renderlo “intoccabile”, a meno di scosse elettriche !!!
- **NON** scaldando, perché poco pratico !

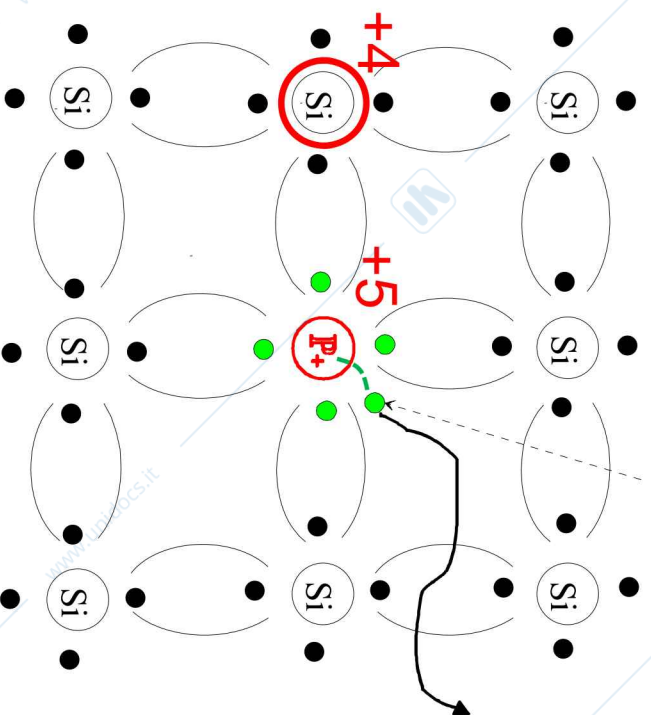
# DROGGAGGIO DEL SILICIO con atomi di fosforo (P)

	IIIB	IVB	VB	VIB	
5	$2p^4_{1/2}$	$3p_0$	$4s_{3/2}$	$3p_2$	
<b>B</b>	Boron 10.811 $1s^2 2s^2 p_1$	<b>C</b>	Carbon 12.0107 $1s^2 2s^2 2p^2$	<b>N</b>	Nitrogen 14.00674 $1s^2 2s^2 2p^3$
13	$2p^2_{1/2}$	$3p_0$	$4s_{3/2}$	$3p_2$	
<b>Al</b>	Aluminum 26.98154 $[Ne]3s^2 3p^1$	<b>Si</b>	Silicon 28.0855 $[Ne]3s^2 3p^2$	<b>P</b>	Phosphorus 30.97376 $[Ne]3s^2 3p^3$
31	$2p^2_{1/2}$	$3p_0$	$4s_{3/2}$	$3p_2$	
<b>Ga</b>	Gallium 69.723 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^1$	<b>Ge</b>	Germanium 72.61 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^2$	<b>As</b>	Arsenic 74.92160 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^3$
33	$4s_{3/2}$	$3p_0$	$4s_{3/2}$	$3p_2$	
<b>Se</b>	Selenium 78.96 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^4$	<b>Br</b>	Bromine 79.904 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^5$	<b>Kr</b>	Krypton 83.80 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^6$

- L'atomo di fosforo **SOSTITUISCE** l'atomo di Silicio ...

Electrone facilmente liberabile

→ **Energia di legame del 5° elettrone ~ 10 meV << 1.1 eV**



... e rende libero un elettrone nel cristallo.

Alla temperatura ambiente ( $T=300K$ ) tutti gli atomi di P (perciò detti atomi **DONORI**) hanno lasciato libero un elettrone nel cristallo.

Fondamenti di Elettronica

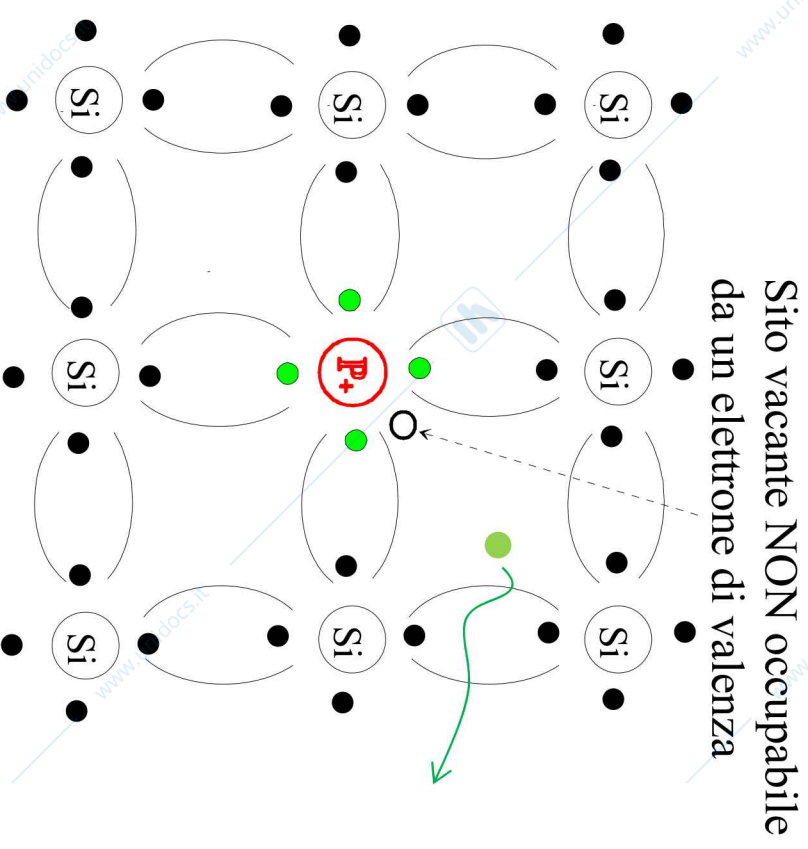
# DROGGAGGIO DEL SILICIO con atomi di fosforo (P)

- Tecnologicamente è possibile controllare precisamente il numero di P ( $N_D$  atomi/cm<sup>3</sup>) inseriti nel cristallo, operazione detta di DROGGAGGIO del silicio.

Il drogaggio con fosforo **NON** genera

contemporaneamente anche una **lacuna**.

Infatti per nessun elettrone di valenza è equivalente occupare il livello energetico lasciato libero dall'elettrone del fosforo.



# PORTATORI in un cristallo DROGATO con FOSFORO

Nel cristallo di Si drogato con P ( $N_D$  atomi/cm<sup>3</sup>) ci saranno pertanto:

*elettroni*  
*elettroni*

forniti dal drogante  
generati termicamente dalla rottura dei  
legami del Si.

Si droga in modo che i primi siano in prevalenza, per cui :

$$n = N_D \quad \text{elettroni/cm}^3$$

generate termicamente dalla rottura dei  
legami del Si.

Il loro numero è fissato dalla **legge di azione di massa** ed è:

$$p = 2 \times 10^{20} / N_D \quad \text{lacune/cm}^3$$

Legge di azione di massa :

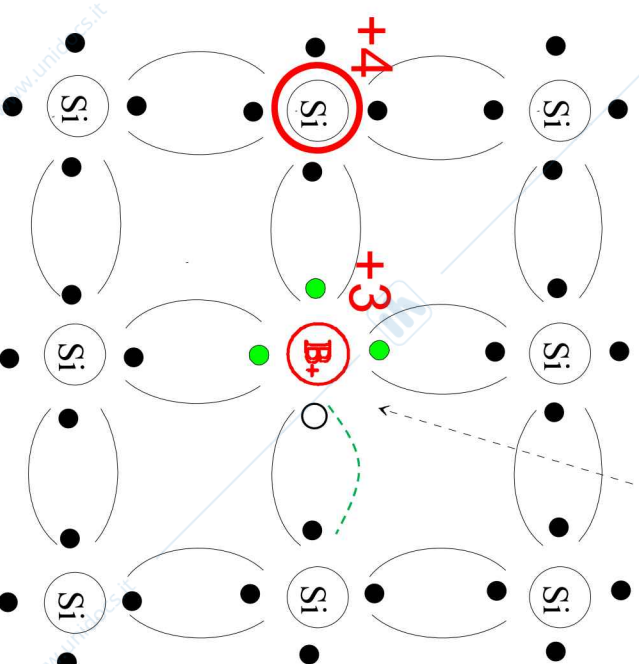
$$n \cdot p = 2 \times 10^{20} \quad (\text{portatori/cm}^3)^2$$

# DROGGAGGIO DEL SILICIO con atomi di boro (B)

	IIIB	IVB	VB	VIB			
<b>5</b>	<b>B</b> Boron 10.811 $1s^2 2s^2 2p^1$ 8.29880	<b>6</b>	<b>C</b> Carbon 12.0107 $1s^2 2s^2 2p^2$ 11.2603	<b>7</b>	<b>N</b> Nitrogen 14.00674 $1s^2 2s^2 2p^3$ 14.5341	<b>8</b>	<b>O</b> Oxygen 15.9994 $1s^2 2s^2 2p^4$ 13.6181
<b>13</b>	<b>Al</b> Aluminum 26.98154 $[Ne]3s^2 3p^1$ 5.9858	<b>14</b>	<b>Si</b> Silicon 28.0855 $[Ne]3s^2 3p^2$ 8.1517	<b>15</b>	<b>P</b> Phosphorus 30.97376 $[Ne]3s^2 3p^3$ 10.4867	<b>16</b>	<b>S</b> Sulfur 32.066 $[Ne]3s^2 3p^4$ 10.3600
<b>31</b>	<b>Ga</b> Gallium 69.723 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^1$ 5.9993	<b>32</b>	<b>Ge</b> Germanium 72.61 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^2$ 7.8994	<b>33</b>	<b>As</b> Arsenic 74.92160 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^3$ 9.7886	<b>34</b>	<b>Se</b> Selenium 78.96 $[Ar]3d^{10} 4s^2 4p^4$ 9.7524

L'atomo di boro SOSTITUISCE l'atomo di Silicio ...

Legame mancante, facilmente colmabile da un elettrone del Si



**Posizione riempibile con un elettrone di valenza con piccola spesa energetica (~ 10 meV << 1.1 eV).**  
**Equivale a dire che l'energia di legame della lacuna che si libera ~ 10 meV**

... e cattura un elettrone di valenza degli atomi di Si, rendendo libera una lacuna nel cristallo.

Alla temperatura ambiente ( $T=300K$ ) tutti gli atomi di B (perciò detti atomi ACCETTORI) hanno accolto un elettrone.

La loro densità è indicata con  $N_A$ .

Fondamenti di Elettronica

# PORTATORI in un cristallo DROGATO con BORO

Nel cristallo di Si drogato con B ( $N_A$  atomi/cm<sup>3</sup>) ci saranno pertanto:

*lacune*

fornite dal drogante

*lacune*

generate termicamente dalla rottura dei legami del Si.

Si droga in modo che i primi siano in prevalenza, per cui :

$$p = N_A \text{ lacune/cm}^3$$

*elettroni*

generati termicamente dalla rottura dei legami del Si.

Il loro numero è fissato dalla legge di azione di massa ed è:

$$n = 2 \times 10^{20} / N_A \text{ elettroni/cm}^3$$

Legge di azione di massa :

$$n \cdot p = 2 \times 10^{20} \text{ (portatori/cm}^3)^2$$

# CRISTALLO DI SILICIO e DROGANTI

In elettronica si parte da un silicio cristallino con una elevatissima purezza ...

1 atomo di impurezza ogni  $10^{10}$  atomi di silicio !!  
... e poi si introducono i droganti voluti in tipo e quantità.

La **posizione** dei droganti nel reticolo è **casuale**.

Le concentrazioni di drogante sono comunque piccole rispetto alla densità del Si:

densità di atomi di Si :  $5 \cdot 10^{22}$  atomi/cm<sup>3</sup>

densità di atomi di drogante:  $10^{12} < N_A, N_D < 10^{19}$  atomi/cm<sup>3</sup>

# CALCOLO CONCENTRAZIONE DEI PORTATORI

## Legge di Azione di Massa

In generale:

- la **neutralità** di carica nel cristallo impone che:

$$p + N_D^+ = n + N_A^-$$

Cariche Positive
Cariche Negative

- la **legge di azione di massa** dà un vincolo aggiuntivo:

$$p \cdot n = n_i^2 \quad (\approx 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ @ 300K})$$

- Per cui, mettendo a sistema, possiamo trovare  $p, n$ . Ad esempio:

Silicio Drogato N ( $N_D^+ \gg n_i$ )

$$\begin{cases} p + N_D^+ \approx N_D^+ \\ p \approx n_i^2 / N_D^+ \end{cases}$$

Silicio Drogato P ( $N_A^- \gg n_i$ )

$$\begin{cases} p + N_A^- \approx N_A^- \\ n \approx n_i^2 / N_A^- \end{cases}$$

# RIASSUNTO DELLE CONCENTRAZIONI DI PORTATORI nei semiconduttori DROGATI

Semiconduttore di tipo p -  $N_A > 10^{12}$  droganti/cm<sup>3</sup> :

$$p = N_A \text{ lacune/cm}^3$$

$$n = 2 \times 10^{20} / N_A \text{ elettroni/cm}^3$$

Lacune maggioritarie, elettroni minoritari

Semiconduttore di tipo n -  $N_D > 10^{12}$  droganti/cm<sup>3</sup> :

$$n = N_D \text{ elettroni/cm}^3$$

$$p = 2 \times 10^{20} / N_D \text{ lacune/cm}^3$$

Elettroni maggioritari, lacune minoritarie

*Esempio:*

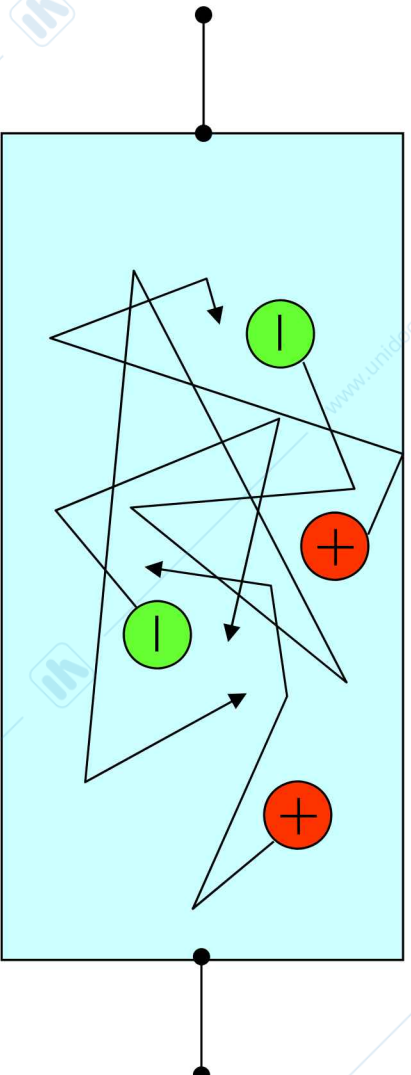
Il silicio drogato con  $5 \cdot 10^{15}$  atomi/cm<sup>3</sup> di boro ha:

$$p = 5 \cdot 10^{15} \text{ lacune/cm}^3$$

$$n = 4 \cdot 10^4 \text{ elettroni/cm}^3$$

# MOTO TERMICO DEGLI ELETTRONI E DELLE LACUNE

Alla temperatura ambiente,  $n$  e  $p$  sono tutt'altro che ferme:



Il moto è casuale in tutte le direzioni



$$\langle I \rangle = 0$$

# IL MOTO DI UN PORTATORE SOTTO L'EFFETTO DI UN CAMPO ELETTRICO

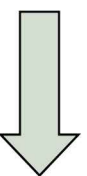
- Una carica elettrica posta in un campo elettrico sente una forza pari a

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} = m \cdot \vec{a}$$

$$\vec{a} = \frac{q}{m} \vec{E}$$

Se l'intervallo tra gli urti è pari a  $\tau$ , la velocità media della carica è dell'ordine di

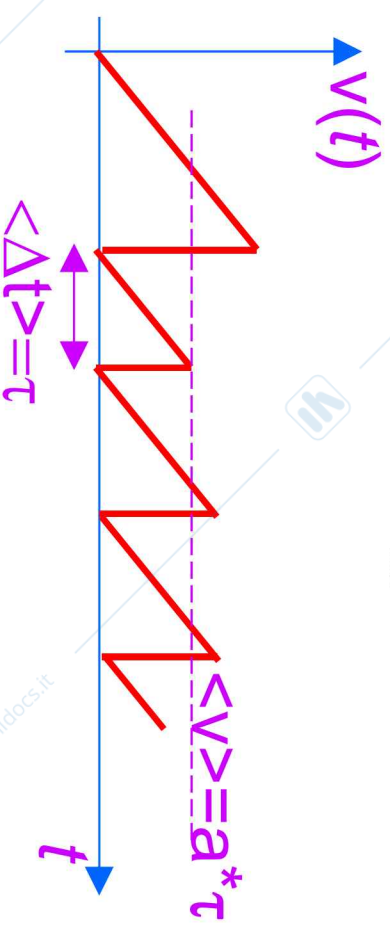
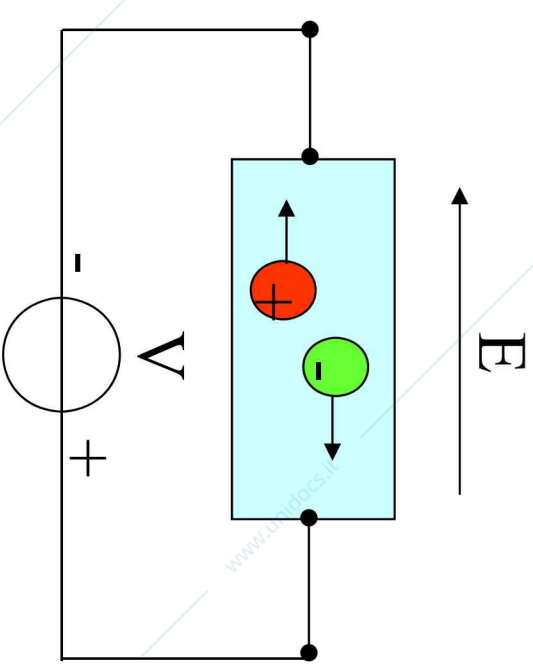
$$\vec{v} \cong \frac{q \cdot \tau}{m} \vec{E}$$



$\mu$  [cm<sup>2</sup>/(Vs)]

coefficiente di mobilità'

$$\vec{v} \cong \mu \cdot \vec{E}$$



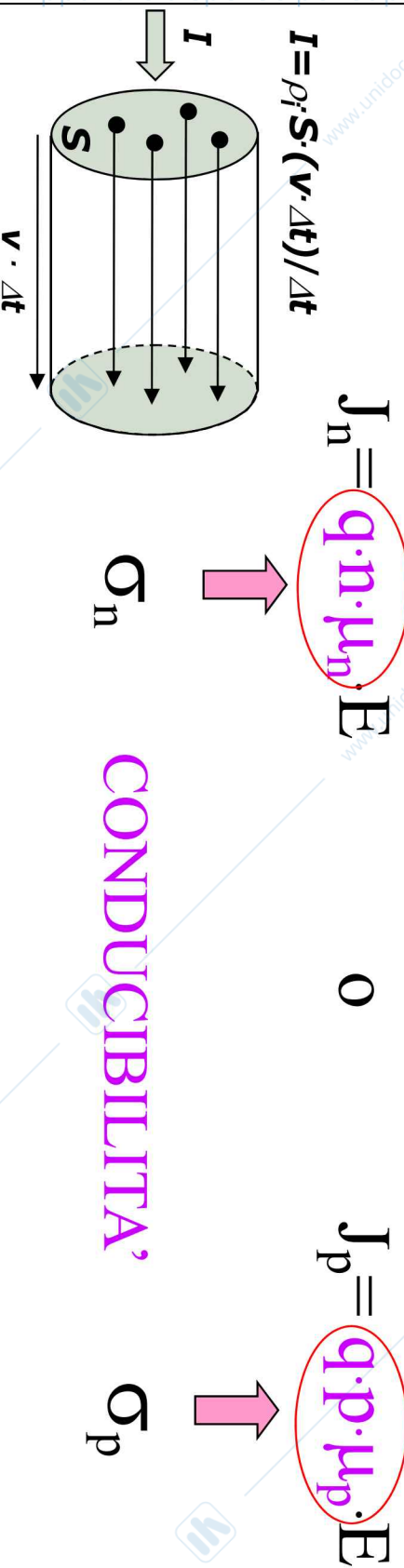
# CONDUCIBILITA' e MOBILITA'

Per svincolarsi dalle dimensioni del dispositivo, è comodo introdurre la DENSITA' di corrente J:

$$\frac{I}{S} = J \left[ \frac{A}{cm^2} \right]$$

$$\vec{J} = \sum_i q_i \vec{v}_i = -qn\vec{v}_n + qp\vec{v}_p = +qn\mu_n E + qp\mu_p E$$

volume unit



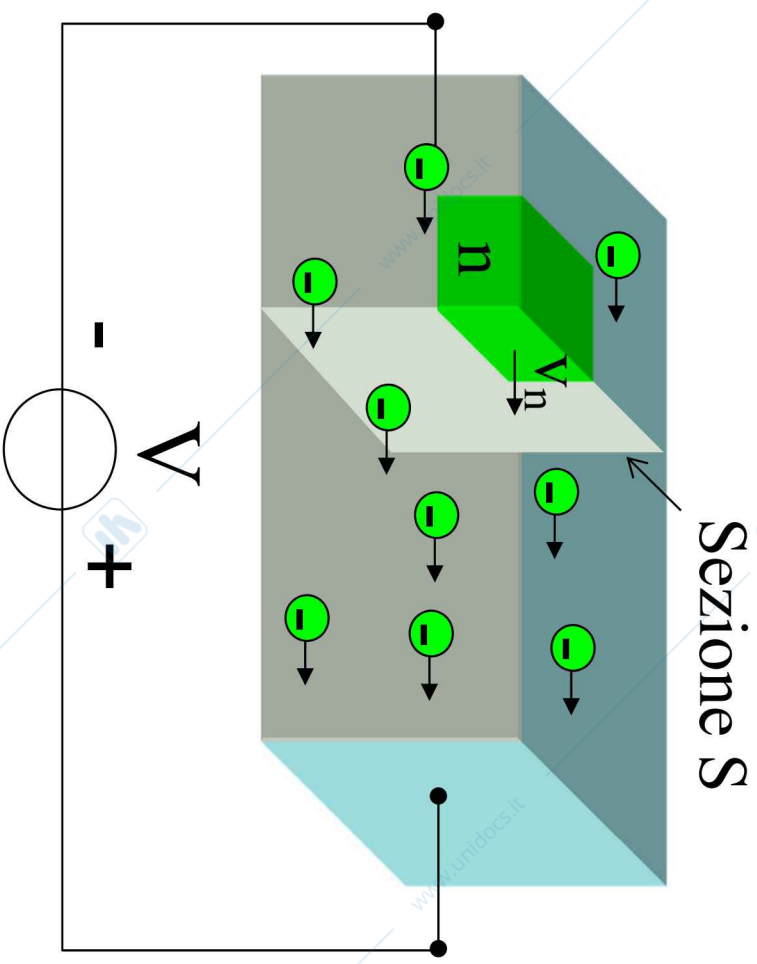
Nel silicio, la mobilità degli elettroni è maggiore di quella delle lacune :

$$\mu_n \cong 1300 \frac{cm^2}{V \cdot s} \qquad \mu_p \cong 400 \frac{cm^2}{V \cdot s} \qquad \rightarrow \mu_n / \mu_p \cong 3$$

# CORRENTE di CONDUZIONE ( o di DERIVA )

$$\begin{aligned}
 I &= J * S = \mu_n \cdot E \quad \mu_p \cdot E \\
 &= qnV_n S + qpV_p S = \\
 &= \sigma_n * E * S + \sigma_p * E * S \\
 &= (\sigma_n + \sigma_p) E * S = \sigma E * S
 \end{aligned}$$

$(qn\mu_n + qp\mu_p)$   
 'conducibilita' [ $\Omega^{-1} cm^{-1}$ ]



$$I \cong I_p = qp\mu_p E \cdot S =$$

$$I \cong I_n = qn\mu_n E \cdot S$$

In un materiale di tipo  $p$  ( $p \gg n$ )  
 In un materiale di tipo  $n$  ( $n \gg p$ )

La corrente di deriva è portata essenzialmente dai maggioritari.

# RESISTIVITA' del materiale e RESISTENZA del dispositivo

Il reciproco della conducibilità  $\sigma$  è la **RESISTIVITÀ**:  $\rho = \frac{1}{\sigma}$  [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\sigma_n + \sigma_p} = \frac{1}{qn\mu_n + qp\mu_p}$$

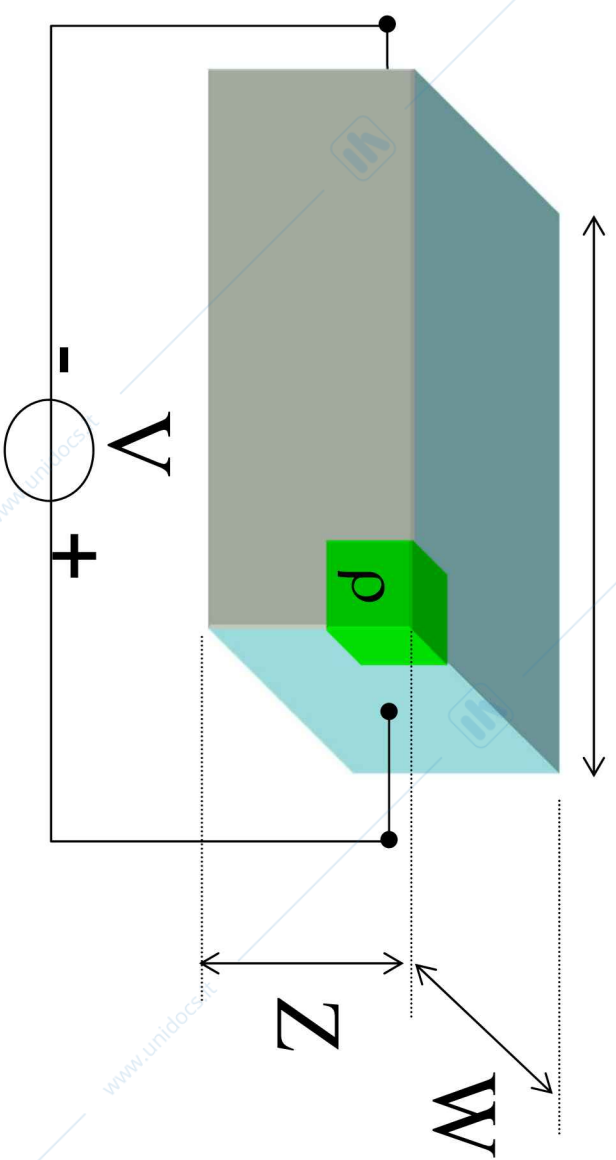
resistivita' [ $\Omega \text{ cm}$ ]      conducibilita' [ $\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ]

$$I = \sigma E S = \frac{1}{\rho} \left( \frac{V}{L} \right) (WZ)$$

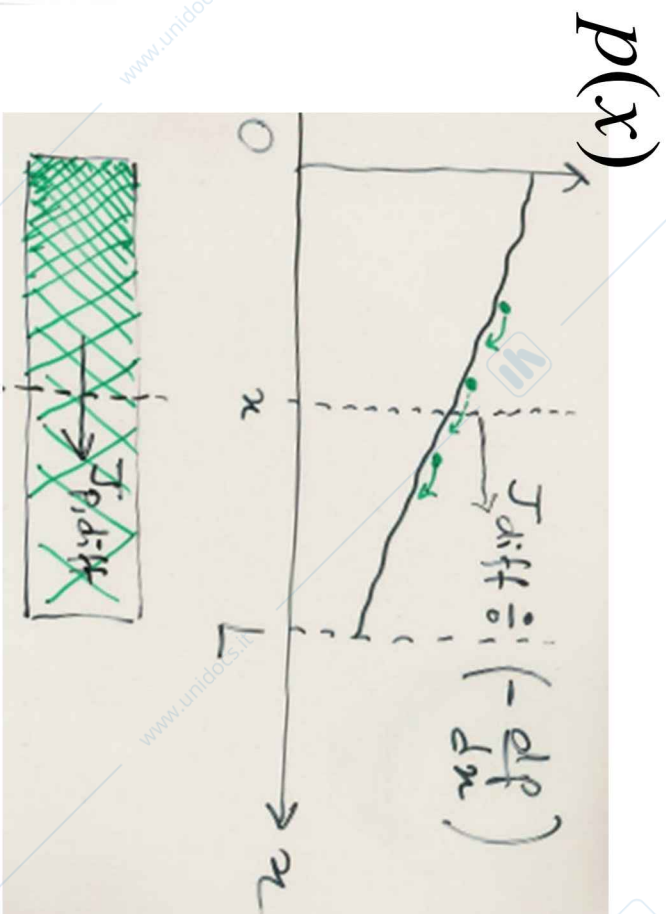
$$\rightarrow V = \left[ \rho \frac{L}{WZ} \right] I$$

Legge di Ohm:  $V = R \cdot I$

$$\rightarrow R = \rho \frac{L}{W \cdot Z} \quad [\Omega]$$



## MOTO di DIFFUSIONE



Dovuto alla presenza di un **gradiente di concentrazione** dei portatori (non è necessario un campo elettrico !!)

$$J_{p,diff} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

$D_{n,p}$

coefficiente di diffusione

[cm<sup>2</sup>/s]

$$D_n/D_p \approx 3$$

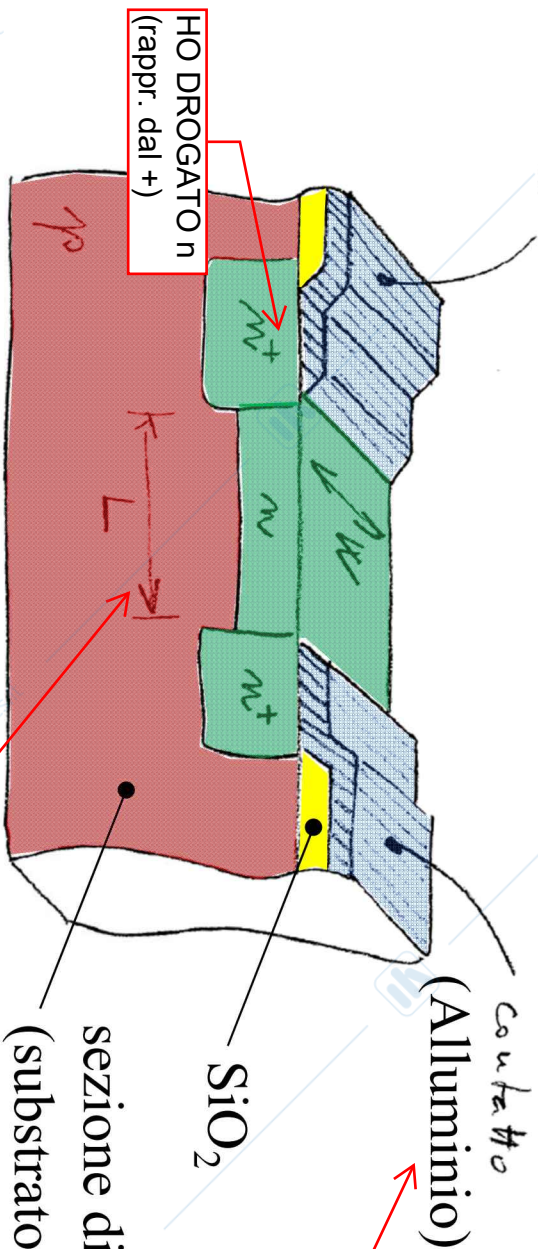
$$J_{n,diff} = +qD_n \frac{dn}{dx}$$

In generale:

$$J_p = J_{p,drift} + J_{p,diff} = q\mu_p p E - qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_n = J_{n,drift} + J_{n,diff} = q\mu_n n E + qD_n \frac{dn}{dx}$$

Contatto



# Esempio: resistore integrato

contatto ohmico (ossia che fa fluire la corrente senza resistenza), perfetto, matematico

$$R = \rho \frac{L}{S} \leftrightarrow G = \frac{1}{\rho} \frac{S}{L}$$

il dischetto centrale di lunghezza L rappresenta il vero resistore

visto il verso delle corrente le resistenze infinitesimali di spessore dx è come se fossero in parallelo (conviene calcolare le conduttanze G)

$$dG(dx) = \frac{1}{\rho} \frac{dS}{L} = q \mu_n n(x) \frac{W dx}{L}$$

$$\rightarrow G = \int dG = \int q \mu_n n(x) \frac{W}{L} dx$$

$$\rightarrow G = \int dG = \int \rho_{pw} m(x) \frac{W}{L} dx =$$

$$= \left( \frac{W}{L} \right) \left[ \rho_{pw} \int m(x) dx \right] = \left( \frac{W}{L} \right) G_{\square}$$

in generale L o W vengono divisi, come lunghezze in modo da formare quadratici della stessa lunghezza e spessore

Conducibilità di un Resistore unita  $W=1$ , cioè di forma quadrata  $\square$ .

per questo la conduttanza e la resistenza vengono dette di "quadro"

$$G = \left( \frac{W}{L} \right) G_{\square} \rightarrow$$

$$R = \frac{1}{G_{\square}} \left( \frac{L}{W} \right) =$$

$$R_{\square} \left( \frac{L}{W} \right)$$

resistenze per geometrie diverse vengono poi regolate attraverso multipli e fattori del numero di quadratini che le compongono

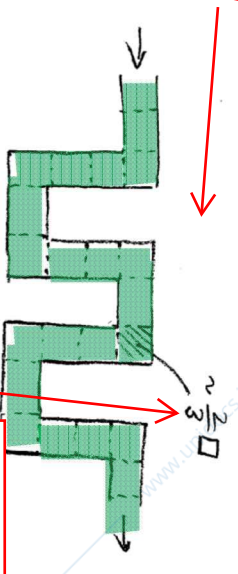
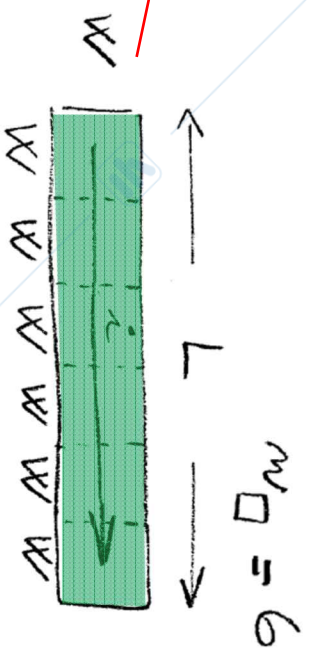
Reminiscenza per quadros (TECNOLOGIA)

$M^2$  di quadros (PROGETTO)

Esempio:  
resistore integrato

$$R_{\square} = 200 \Omega/\square$$

valore tipico per un Resistore al NiCr.



Fondamenti di Elettronica