# FISICA DELLO STATO SOLIDO E SEMICONDUTTORI:

da dispositivi elettronici ...

$\boxed{I = qn\mu A \frac{V}{L}}$ $\boxed{I = \frac{V}{R}}$ LEGGE DI OHM

$q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C

$\boxed{R = \frac{V}{I} = \frac{1}{q\mu n} \cdot \frac{L}{A} \quad [OHM]}$ RESISTENZA

$\boxed{\sigma = q\mu n}$ CONDUCIBILITÀ ELETTRICA

$\boxed{\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q\mu n}}$ RESISTIVITÀ

$\boxed{R = \rho \cdot \frac{L}{A}}$ RESISTENZA

- CONDUTTORI: $\rho < 10^{-5}\ \Omega\, cm$
- ISOLANTI: $\rho > 10^{5}\ \Omega\, cm$
- SEMICONDUTTORI: $10^{-5}\ \Omega\, cm < \rho < 10^{5}\ \Omega\, cm$ → 10 ordini di grandezza disponibili

Ma quali sono i materiali dei semiconduttori?

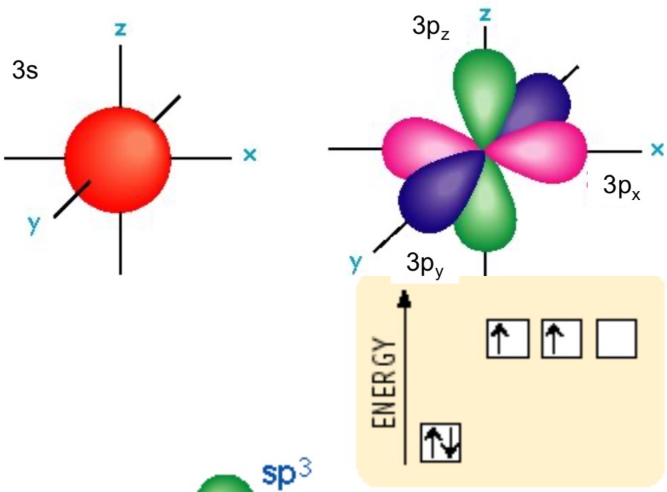
- Nella tavola periodica le colonne sono legate al numero degli elettroni di valenza

I due semiconduttori puri presenti in natura sono germanio e silicio.
In realtà esistono semi-conduttori composti 3-5 (della 3ª e 5ª colonna della tavola periodica) e 2-6.

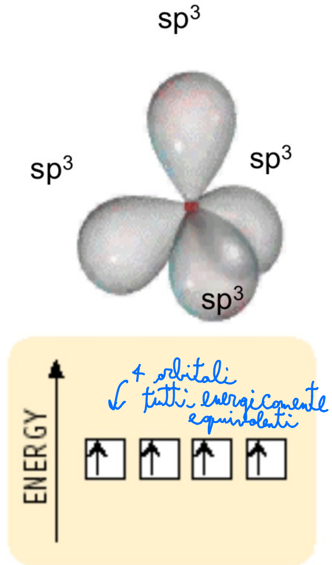
Elementi importanti sono BORO (3ª colonna), FOSFORO e ARSENICO (5ª colonna).

# Ibridizzazione degli orbitali nel Silicio

Configurazione elettronica del Silicio (Z=14): $1s^2\,2s^2\,2p^6$

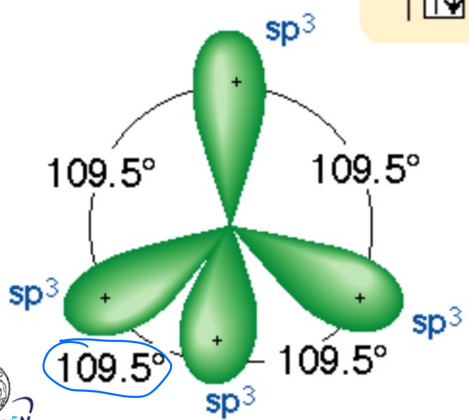



Ibridizzazione degli orbitali




questa condizione non è energeticamente favorita

si formano legami COVALENTI OMOPOLARI




Otteniamo 4 orbitali ibridizzati $sp^3$ (energeticamente equivalenti) e orientati secondo i vertici di un tetraedro



# Che cosa accade se N atomi sono uniti per formare un solido?

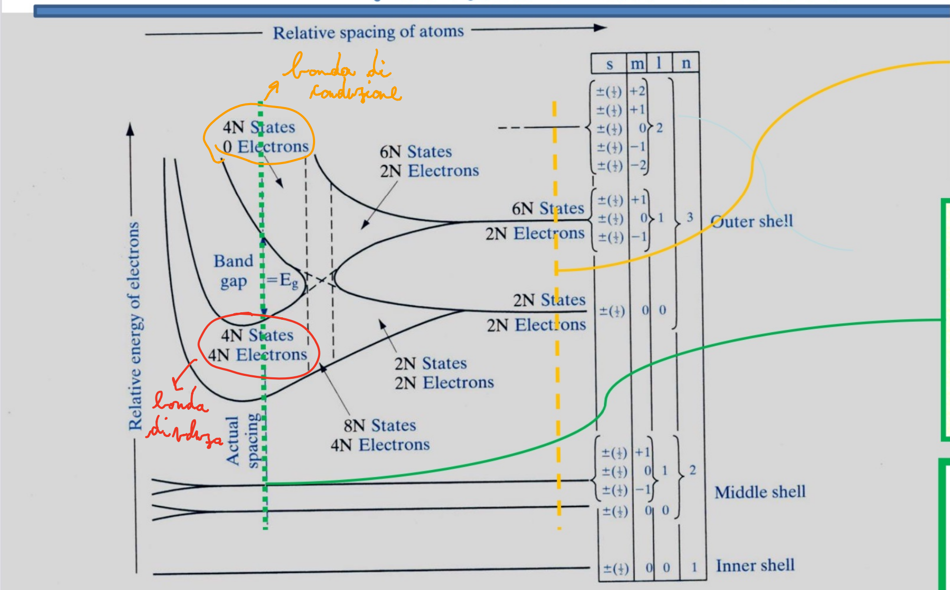
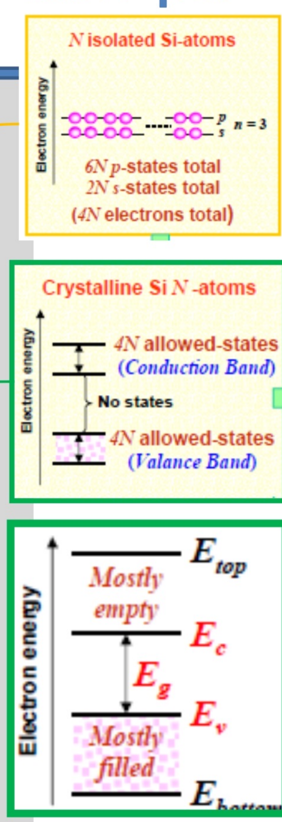


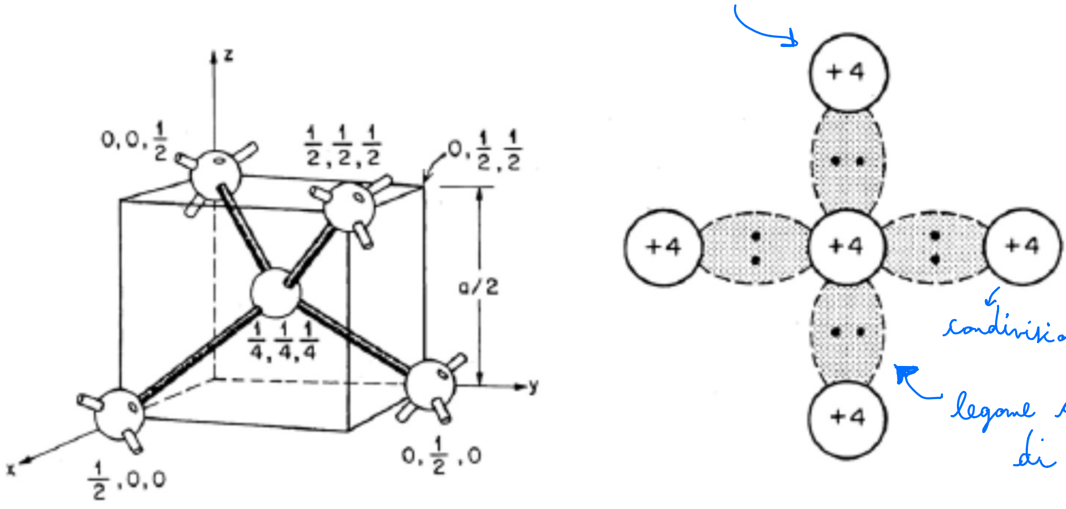

**Figure 3–3**

Energy levels in Si as a function of inter-atomic spacing. The core levels ($n$ = 1,2) in Si are completely filled with electrons. At the actual atomic spacing of the crystal, the 2$N$ electrons in the 3$s$ sub-shell and the 2$N$ electrons in the 3$p$ sub-shell undergo $sp^3$ hybridization, and all end up in the lower 4$N$ states (valence band), while the higher lying 4$N$ states (conduction band) are empty, separated by a bandgap.



# Ibridizzazione degli orbitali nel Silicio

carica netta relativa di +4




condivisione di 4 elettroni

legame omopolare con condivisione di 2 elettroni

da ciò si crea un reticolo cristallino

(a) (b)

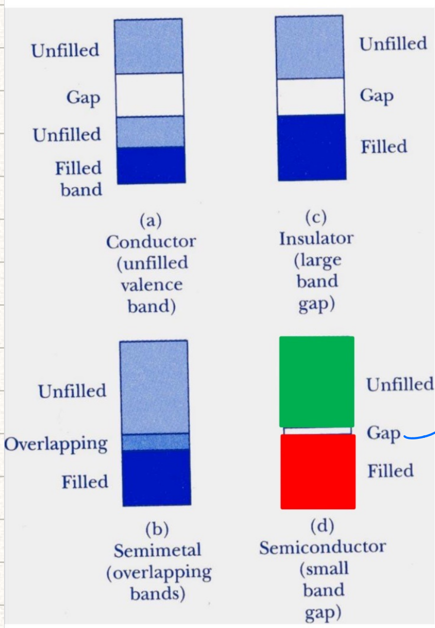
Three dimensional arrangement and symbolic two dimensional representation

- $5 \cdot 10^{19}$ atomi di silicio per $cm^3$ di silicio
  - passo reticolare = 5 Å (angstrom)



# Metalli, semiconduttori e isolanti

— Ogni solido e' caratterizzato da una opportuna struttura a bande
— Affinche' un materiale sia conduttore devono essere disponibili sia elettroni liberi che stati energetici vuoti.




• ***Metalli:*** presenza di elettroni liberi e banda di valenza parzialemnete riempita → elevata conducibilita' (a)

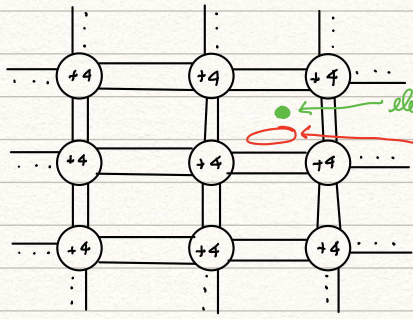
***Semi-metalli:*** Banda superiore piena, ma parzialmente sovrapposta alla successiva banda → poco piu' resistivi dei normali metalli (b) (arsenico, bismuto, antimonio)

• ***Isolanti****:* banda di valenza piena, banda di conduzione vuota e separata da un ampio gap energetico proibito (tipicamente $E_g$>4eV) → alta resistivita' (c)

1.12 eV per il silicio, 0,7 eV per il germanio, 1,43 eV per l'arseniuro di gallio

•***Semiconduttori***: struttura a bande simile agli isolanti ma con un gap proibito piu' piccolo. Alcuni elettroni possono saltare in banda di conduzione per agitazione termica (d)
$E_g$=1.1 eV per Si, 0.67 eV per Ge e 1.43 eV per GaAs

● Per le varie applicazioni del germanio, esso deve essere raffreddato.

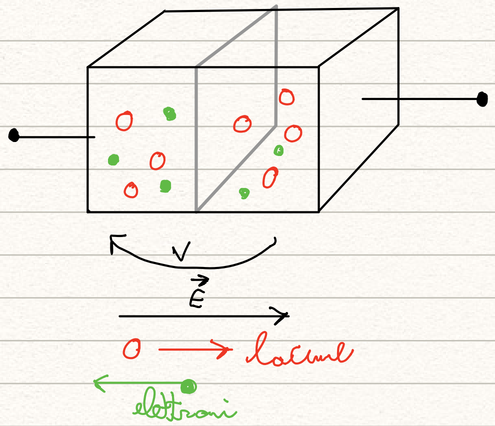



2 tipi di portatori:

- $+q$ lacuna
- $-q$ elettrone libero

All'equilibrio termodinamico la quantità di lacune eguaglia quella di elettroni liberi

$\boxed{p = n = n_i(T)}$ CONCENTRAZIONE INTRINSECA → $\boxed{n_i = 1,45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}}$




$$\begin{cases} v_n = -\mu_n \vec{e} \\ v_p = \mu_p \vec{e} \end{cases}$$

DRIFT SPEED velocità di deriva

a $T = 300K$ $\mu_n = 1400 \frac{cm^2}{Vs}$

a $T = 300K$ $\mu_p = 450 \frac{cm^2}{Vs}$

$\underline{J_n} = -q\,\Phi_n = -q(n v_n) = -q[n(-\mu_n \cdot \vec{e})] = q \mu_n n \vec{e} = \underline{\sigma_n E}$ $\qquad \underline{\sigma_n = q \mu_n \cdot n}$

$\underline{J_p} = +q\,\Phi_p = q(p v_p) = q[p(\mu_p \cdot \vec{e})] = q p \mu_p \vec{e} = \underline{\sigma_n E}$ $\qquad \underline{\sigma_n = q \cdot \mu_p \cdot p}$

densità di corrente di deriva: $\underline{J = J_n + J_p = (q \mu_n \cdot n + q \mu_p \cdot p) E}$

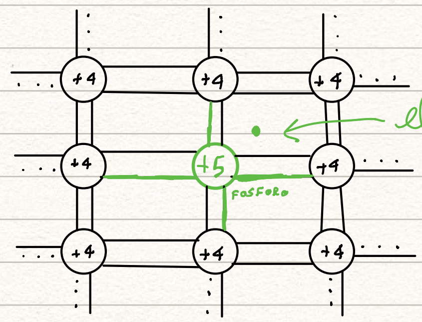
DRIFT CURRENT: $\underline{J_{TOT} = \sigma E}$

$\uparrow$ conducibilità

resistività standard: $\simeq 10^5\ \Omega/cm$

Per alterare la resistività si usa il DROGAGGIO (doping) del semiconduttore

# SEMICONDUTTORI DROGATI:




sostituiamo ad un atomo di silicio uno di fosforo

- gli elementi della 5ª colonna sono atomi DONORI (DONORS) di elettroni

se $N_D \gg N_i$ $\quad n \simeq N_D \quad N_D$ ↑ concentrazione volumetrica atomi donori

$10^{13}\ cm^{-3} < N_D < 10^{19} - 10^{20}\ cm^{-3}$

# LEGGE DI AZIONE DI MASSA:

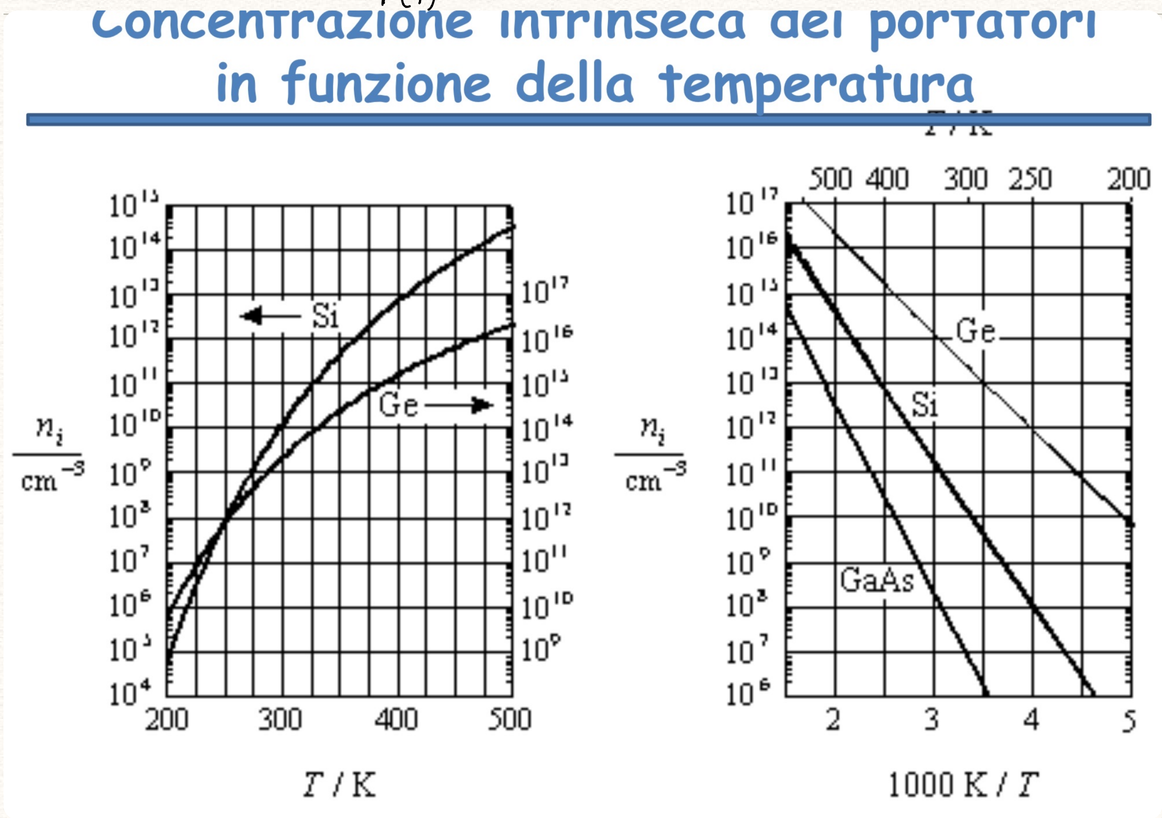
Lega la concentrazione di elettroni liberi e lacune nei semiconduttori all'equilibrio termodinamico

$G(T)$: tasso di generazione: Il numero di legami che si rompono nell'unità di tempo

$R(T)$: tasso di ricombinazione: Il numero di legami che si vanno a riformare nell'unità di tempo

$R(T) = np\, r(T) \longrightarrow G(T) = R(T) \longrightarrow G(T) = np\, r(T)$

$np = \dfrac{G(T)}{r(T)} = n_i^2 \longrightarrow \boxed{np = n_i^2}$ np dipende da T




ricordarsi dell'arrhenius plot

"Semiconduttore drogato N" = Semiconduttore con atomi donori di elettroni

$n_i \simeq 1{,}45 \cdot 10^{10}$

se $np = n_i^2$ allora $p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{n_d}$

se $N_D = 10^{18}\,cm^{-3}$

$p = 100$ lacune $\cdot\, cm^{-3}$

poche su $10^{18}$ elettroni

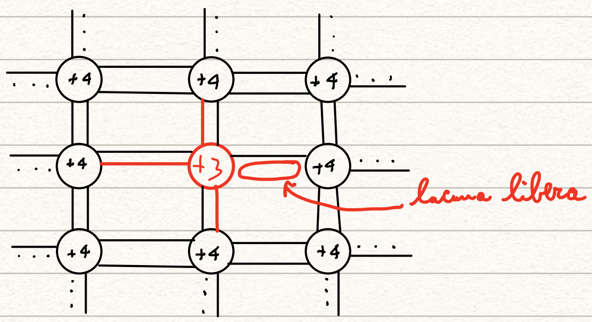
SEMICONDUTTORE DROGATO DI TIPO N:

$n \simeq N_D$ elettroni maggioritari

$p = \frac{n_i^2}{N_D}$ portatori minoritari: lacune

$\sigma_n = q \mu_n n$

## DROGAGGIO DI TIPO P:




atomi 3ª colonna: accettori

$N_A \gg n_i \qquad p \simeq N_A$

per la legge di azione di massa:

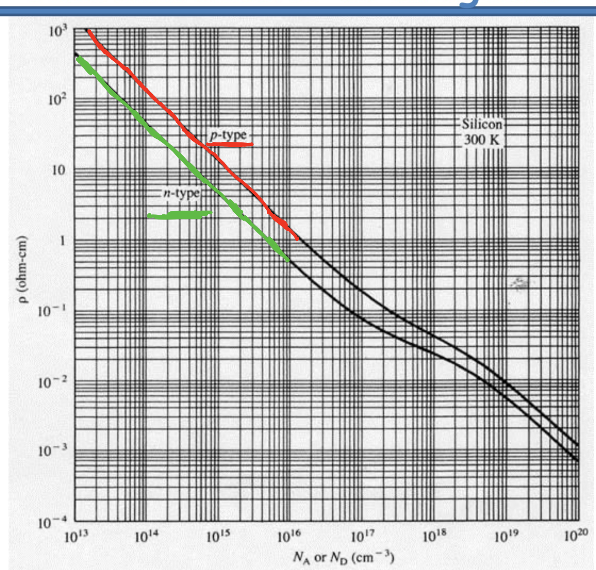
$pn = n_i^2 \longrightarrow n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{n_i^2}{N_A}$

lacune portatori maggioritari

elettroni portatori minoritari

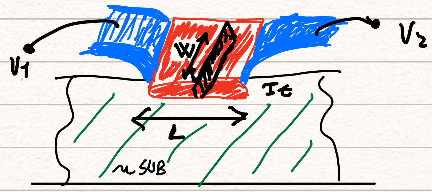
$\boxed{\sigma_p = q \mu_p \cdot p}$

### Andamento della resistivita' in funzione della concentrazione di droganti




- Al crescere della concentrazione di portatori la mobilità si riduce

# RESISTORE INTEGRATO



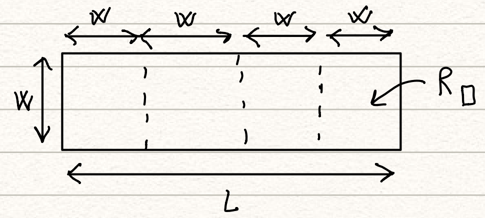

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p p} = \frac{1}{q\mu_p N_A}$$

$$R = \frac{L}{W t}\rho = \frac{1}{q\mu_p N_A}\cdot\frac{L}{W t}$$

$N_A \cdot t \longrightarrow$ concentrazione di atomi per unità di area, chiamata "dose" D

$$R = \frac{1}{q\mu_p D}\cdot\frac{L}{W} = R_\square \cdot \frac{L}{W}$$

resistenza di quadro, "SQUARE RESISTANCE"




$R = R_\square \cdot$ n° quadrati