

# FISICA DELLO STATO SOLIDO E SEMICONDUTTORI:

da dispositivi elettronici ...

$$I = q n \mu A \frac{V}{L}$$

$$I = \frac{V}{R}$$

LEGGE DI OHM

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

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1}{q \mu n} \cdot \frac{L}{A} \quad [\Omega \text{m}]$$

RESISTENZA

$$\sigma = q \mu n$$

CONDUCIBILITÀ ELETTRICA

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

RESISTIVITÀ

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

RESISTENZA

• CONDUTTORI:  $\rho < 10^{-5} \Omega \text{ cm}$

• ISOLANTI:  $\rho > 10^5 \Omega \text{ cm}$

• SEMICONDUTTORI:  $10^{-5} \Omega \text{ cm} < \rho < 10^5 \Omega \text{ cm}$  → 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

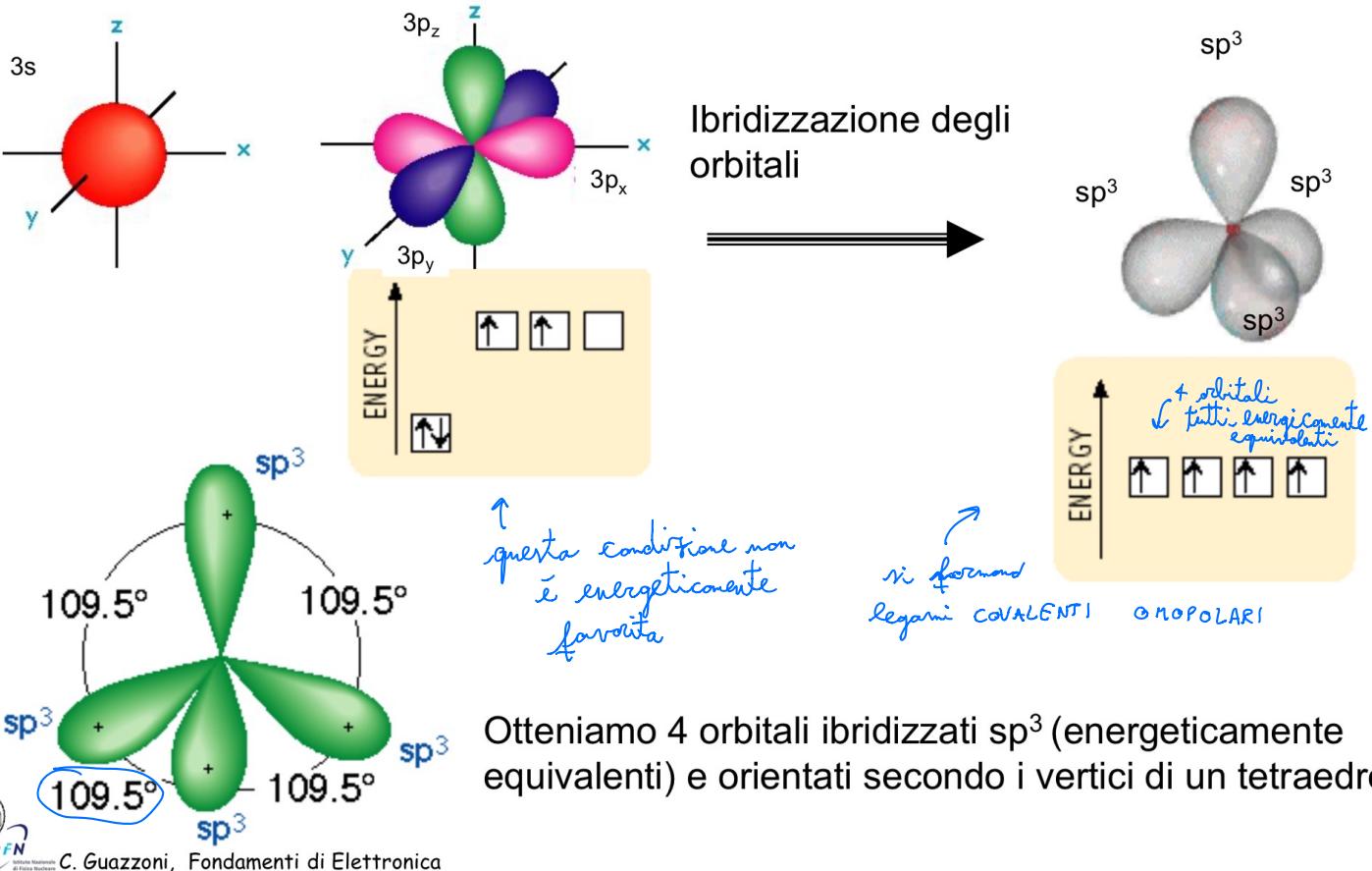
• Due semiconduttori puri presenti in natura sono germanio e silicio.

In realtà esistono semi-conduttori composti 3-5 (della 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> colonna della tavola periodica) e 2-6.

Elementi importanti sono **BORO** (3<sup>a</sup> colonna), **FOSFORO** e **ARSENICO** (5<sup>a</sup> colonna).

# Ibridizzazione degli orbitali nel Silicio

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



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

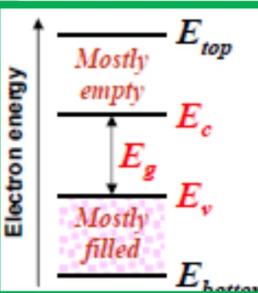
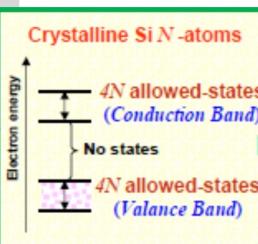
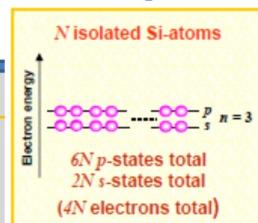
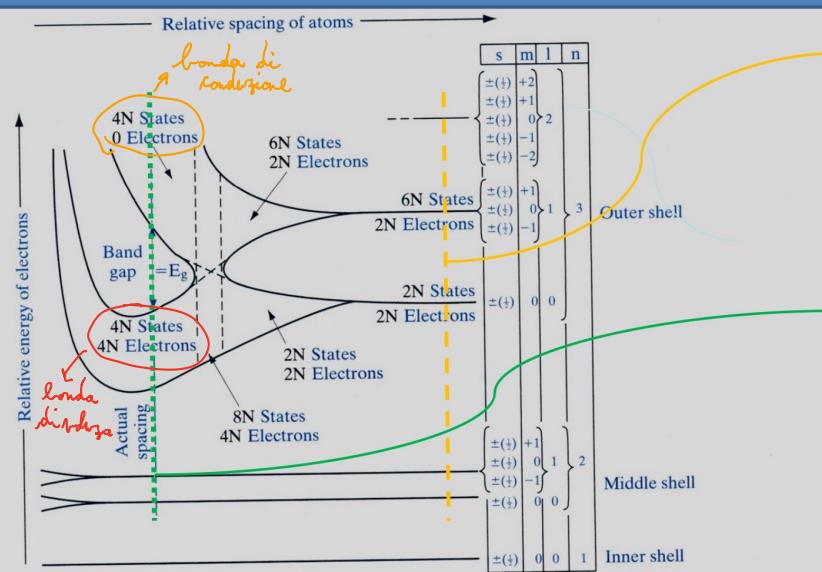
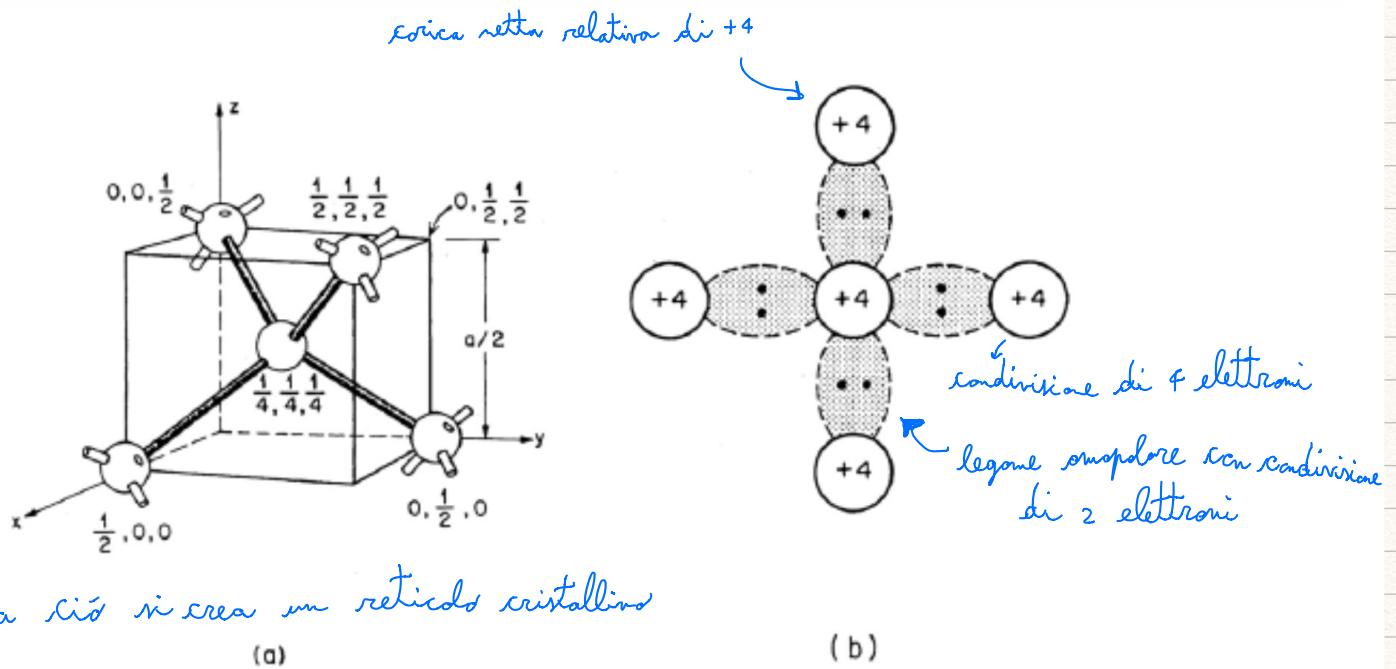


Figure 3-3

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  $2N$  electrons in the  $3s$  sub-shell and the  $2N$  electrons in the  $3p$  sub-shell undergo  $sp^3$  hybridization, and all end up in the lower  $4N$  states (valence band), while the higher lying  $4N$  states (conduction band) are empty, separated by a bandgap.



# Ibridizzazione degli orbitali nel Silicio



Three dimensional arrangement and symbolic two dimensional representation

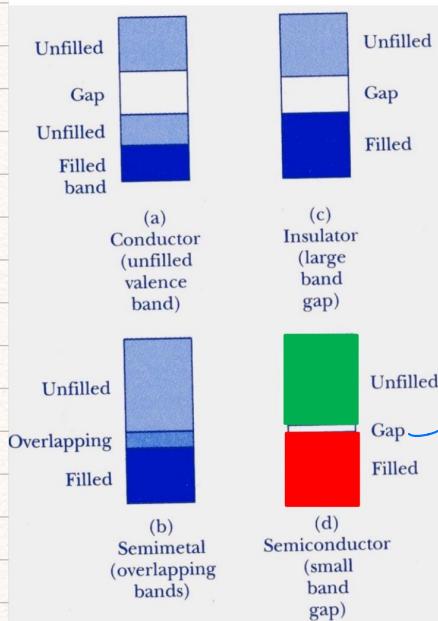
- $5 \cdot 10^{19}$  atomi di silicio per  $\text{cm}^3$  di silicio
- passo reticolare = 5 Å



C. Guazzoni, Fondamenti di Elettronica

## Metalli, semiconduttori e isolanti

- Ogni solido è caratterizzato da una opportuna struttura a bande
- Affinché un materiale sia conduttore devono essere disponibili sia elettroni liberi che stati energetici vuoti.



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

**Semi-metalli:** Banda superiore piena, ma parzialmente sovrapposta alla successiva banda → poco più 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  $E_g > 4\text{ eV}$ ) → alta resistività' (c)

→ 1.12 eV per il silicio, 0.7 eV per il germanio, 1.43 eV per l'arsenico di gallio

• **Semiconduttori:** struttura a bande simile agli isolanti ma con un gap proibito più piccolo. Alcuni elettroni possono saltare in banda di conduzione per agitazione termica (d)

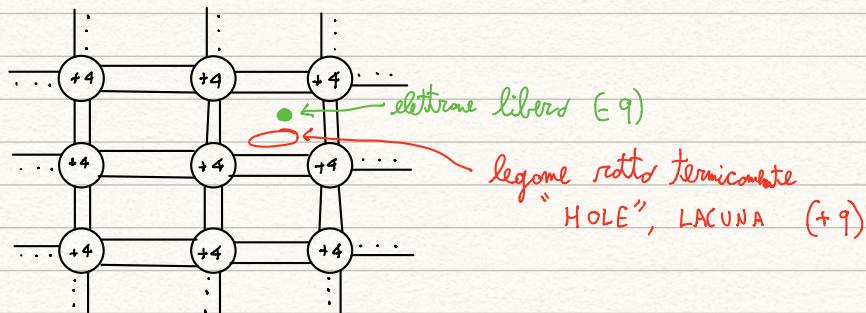
$E_g = 1.1 \text{ eV}$  per Si, 0.67 eV per Ge e 1.43 eV per GaAs



C. Guazzoni, Fondamenti di Elettronica

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

2 tipi di portatori:



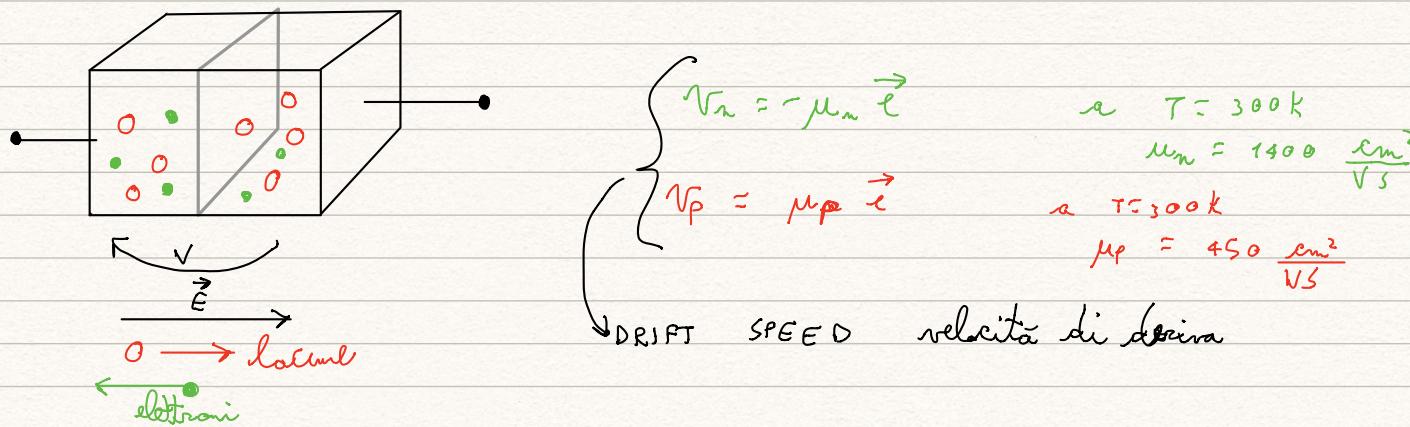
- +q lacuna
- -q elettrone libero

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

$$P = n = n_i (T)$$

CONCENTRAZIONE INTRINSECA

$$n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$



$$J_n = -q \Phi_n = -q(n v_n) = -q [n (\mu_n \cdot \vec{E})] = q \mu_n n \vec{E} = J'_n E \quad J'_n = q \mu_n n$$

$$J_p = +q \Phi_p = q(\rho v_p) = q [\rho (\mu_p \cdot \vec{E})] = q \rho \mu_p \vec{E} = J'_p E \quad J'_p = q \mu_p \rho$$

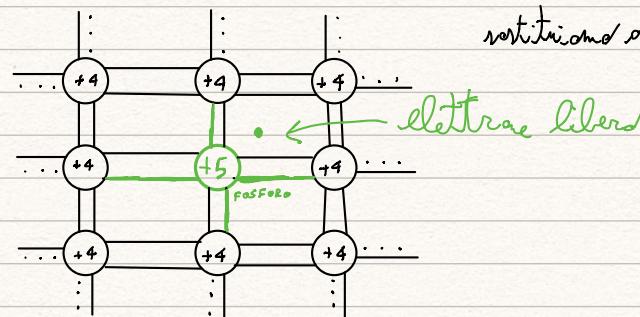
densità di corrente di deriva:  $J = J_n + J_p = (q \mu_n \cdot n + q \mu_p \cdot \rho) E$

DRIFT CURRENT:  $J_{TOT} = \frac{J}{conducibilità}$

resistività standard:  $\approx 10^5 \Omega/\text{cm}$

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

# SEMICONDUTTORI DROGATI:



restituiscono ad un atomo di silicio uno di foro

- gli elementi della 5<sup>a</sup> colonna sono atomi **DONORS (DONORS)** di elettroni

$$\text{se } N_D \gg N_i \quad n \approx N_D$$

$$N_D$$

↑

concentrazione volumetrica  
atomi donatori

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

## LEGGE DI AZIONE DI MASSA:

Legge della concentrazione di elettroni liberi e lacune nei semiconduttori all'equilibrio termodinamico

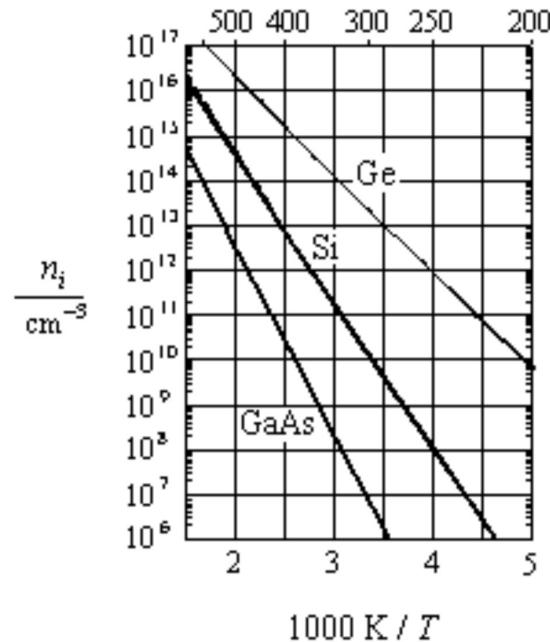
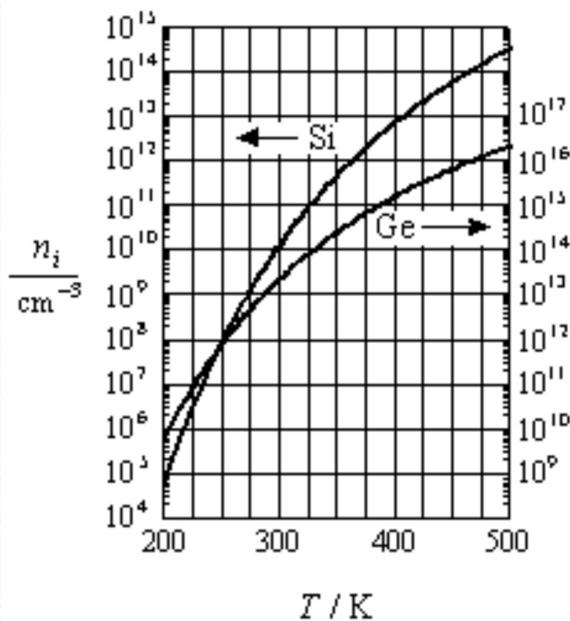
$G(T)$ : tasso di generazione: Il numero di legami che si rompono nell'unità di tempo

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

$$R(T) = n_p r(T) \longrightarrow G(T) = R(T) \longrightarrow G(T) = n_p r(T)$$

$$n_p = \frac{G(T)}{r(T)} = n_i^2 \longrightarrow n_p = n_i^2 \quad n_p \text{ dipende da } T$$

## Concentrazione intrinseca dei portatori in funzione della temperatura



ricordarsi dell'arrhenius plot

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

$$\text{se } n_p = n_i^2 \text{ allora } p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{n_D}$$

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

$$\text{se } N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3} \\ p = 100 \text{ lacune} \cdot \text{cm}^{-3}$$

poche su  $10^{18}$  elettroni

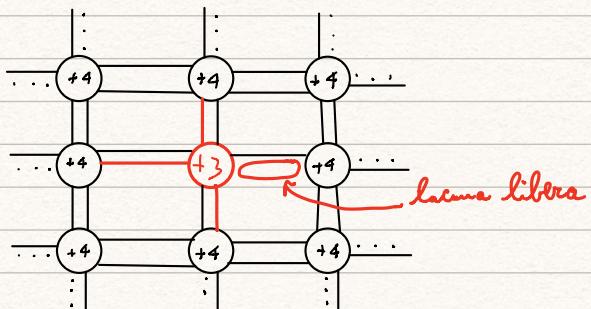
## SEMI CONDUTTORE DROGATO DI TIPO N:

$$n \approx N_D \\ p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

elettroni maggioritari  
portatori minoritari: lacune

$$\delta n = q \mu n n$$

## DROGAGGIO DI TIPO P:



Atomi 3<sup>a</sup> colonna: accettori

$$N_A > n_i \quad p \approx N_A$$

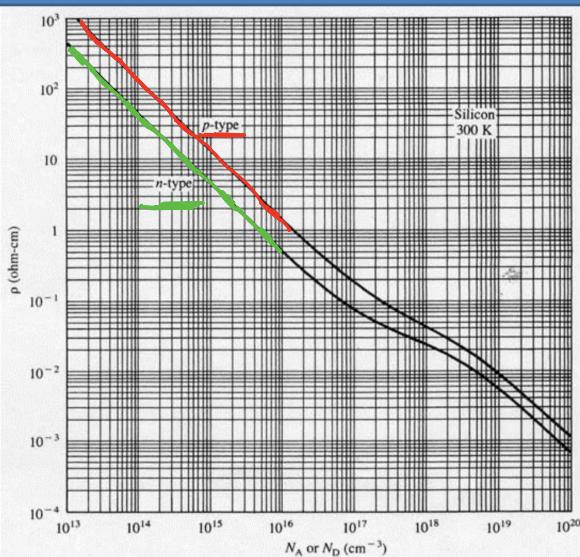
per la legge di variazione di massa:

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

Lacune portatori maggioritari  
elettroni portatori minoritari

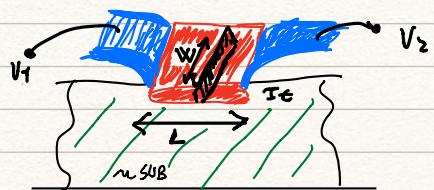
$$\delta p = q \mu p \cdot p$$

## Andamento della resistività in funzione della concentrazione di droganti



• Al crescere della concentrazione di portatori la mobilità si riduce

# RESTORE INTEGRATO



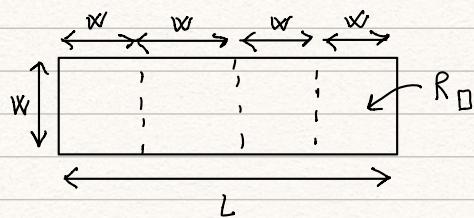
$$\rho = \frac{1}{q \mu_p p} = \frac{1}{q \mu_p N_A}$$

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

$N_A \cdot t \longrightarrow$  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"



$$R = R_{\square} \cdot n^{\circ} \text{ quadrati}$$