I metalli e i semiconduttori, le proprietà elettriche. Le applicazioni.

PLS 2019/20

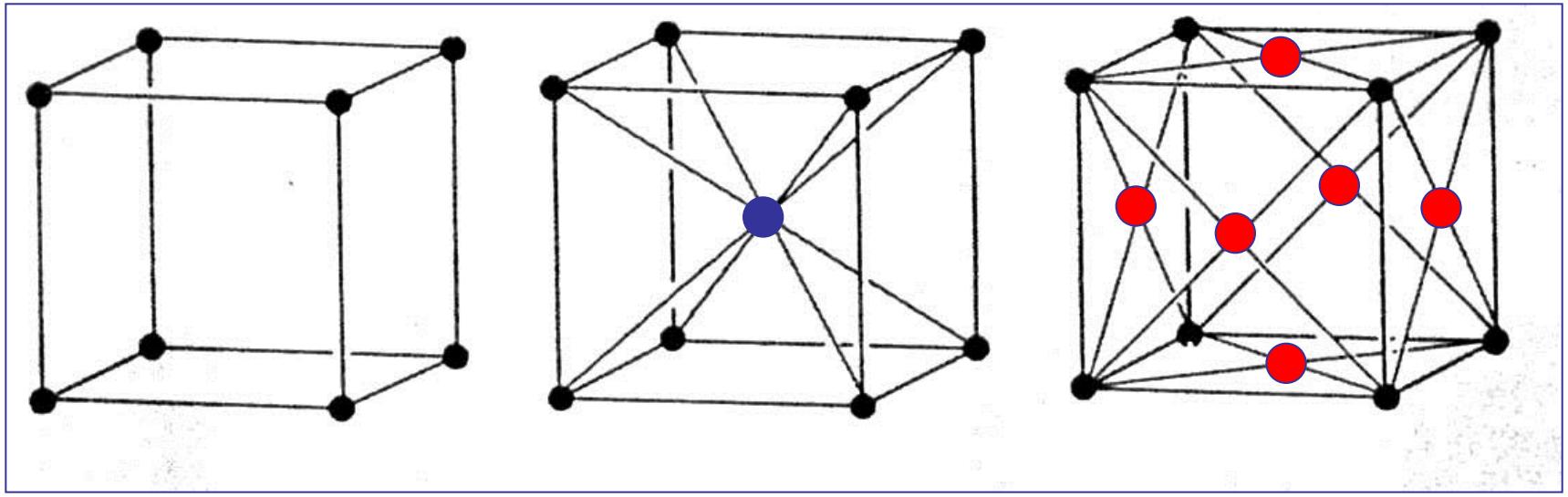
Prof. DANIELA CAVALCOLI
Dip di Fisica e Astronomia
Università di Bologna
daniela.cavalcoli@unibo.it
https://site.unibo.it/semiconductor-physics/en

outline

- I solidi cristallini
- La conducibilità elettrica dei solidi
  - Definizioni
  - Come si comportano i solidi cristallini rispetto alla conducibilità
  - Interpretazione a livello microscopico
    - Bande di energia
    - Riempimento delle bande di energia
  - Variazione della resistività con la temperatura

I solidi cristallini. I metalli

Circa i quattro quinti di tutti gli elementi sono metalli, che sono tutti solidi a T ambiente tranne il mercurio (Hg).

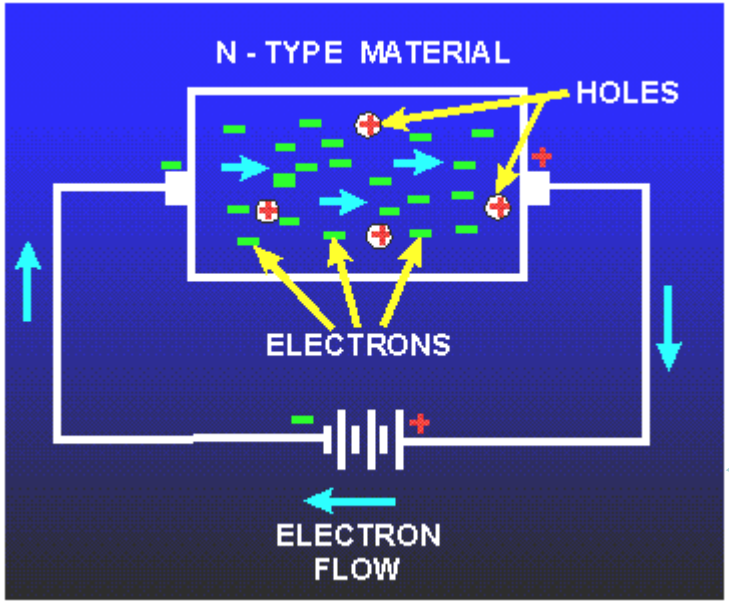


La libertà di movimento degli elettroni è all'origine delle proprietà dei metalli

(animazione)

- conducibilità elettrica
- conducibilità termica
- lucentezza
- malleabilità e duttilità

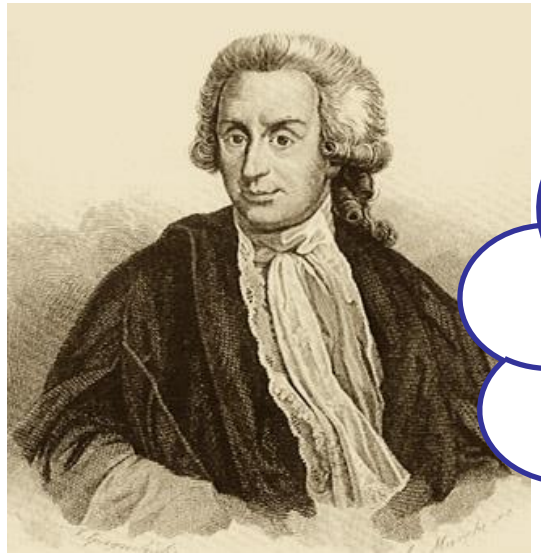
La conducibilità elettrica dei solidi



- Isolanti
- Conduttori (metalli)
- Semiconduttori

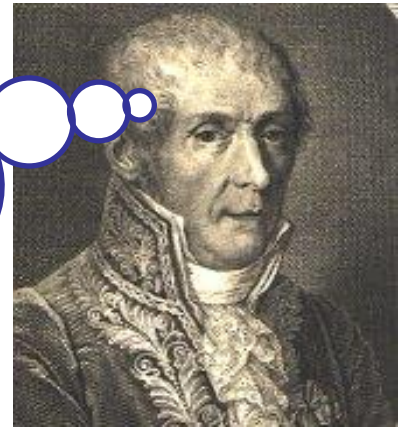
M Faraday

Perché i solidi si comportano in modo così diverso rispetto alla conduzione elettrica?



L Galvani

Definiamo innanzitutto che cosa è la conduzione elettrica



A. Volta

Legge di Ohm, conducibilità elettrica, definizioni

corrente $i = \frac{dq}{dt}$ (Amps)

$q = \int i\,dt$

G.S. Ohm

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

Prima legge di Ohm, R= resistenza elettrica

P Drude

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

Seconda legge di Ohm

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

ρ resistività, $\Omega \times m$

$\sigma = 1/\rho$

σ conducibilità

Conducibilità elettrica, modello di Drude

tempo di rilassamento τ

$$m\frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = q\mathbf{E}(t) - \frac{m\mathbf{v}(t)}{\tau} = q\mathbf{E} - \frac{m\mathbf{v}(t)}{\tau}$$

v=costante in condizioni stazionarie → $d\boldsymbol{v}/dt = 0$

$$0 = q\mathbf{E} - \frac{m\mathbf{v}(t)}{\tau}$$

$$m\mathbf{v}(t) = \tau q\mathbf{E}$$

$$\mathbf{v} = \frac{q\mathbf{E}}{m}\tau = -\frac{e\mathbf{E}}{m}\tau$$

$$Q = -e$$

$$\mathbf{j} = qn\mathbf{v} = -en\mathbf{v}$$

n =numero di elettroni / unità di volume

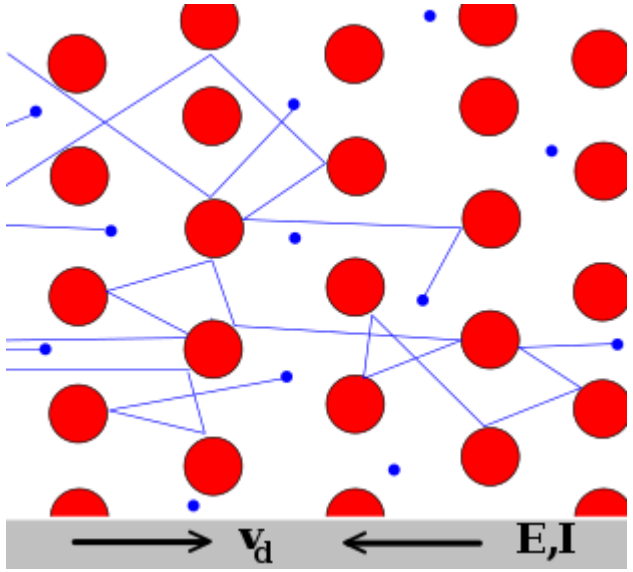
$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v_d}$ **(**velocità di deriva degli elettroni)

$$\mathbf{E} = \rho\mathbf{j} \qquad \mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

Sostituendo al posto di **v**

$$\mathbf{j} = \left(\frac{ne^2\tau}{m}\right)\mathbf{E}$$



$$\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}$$

$$\sigma = \sigma_0 = \frac{ne^2\tau}{m}$$

σ conducibilità

Da notare: la conducibilità **macroscopica** dipende da quantità **microscopiche** come il tempo di rilassamento

da notare

- σ dipende:
  - dalla concentrazione di portatori liberi di carica (n)
  - dal tempo di rilassamento (τ)
  - *entrambi possono dipendere dalla T*

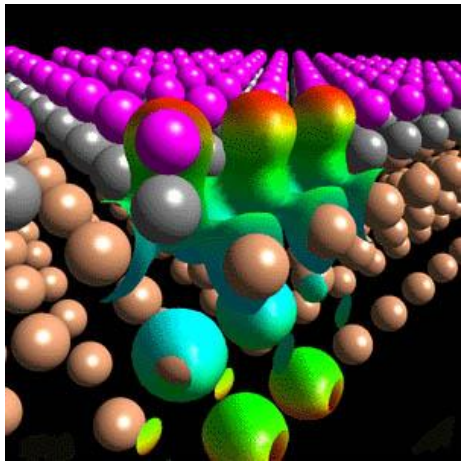
$$n(T)$$
$$\tau(T)$$
$$\rightarrow$$

$$\sigma = \sigma_0 = \frac{ne^2\tau}{m}$$

$$\sigma = \sigma_0 = \frac{e^2 n(T)\tau(T)}{m}$$

I solidi hanno diverse conducibilità o resistività?

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$



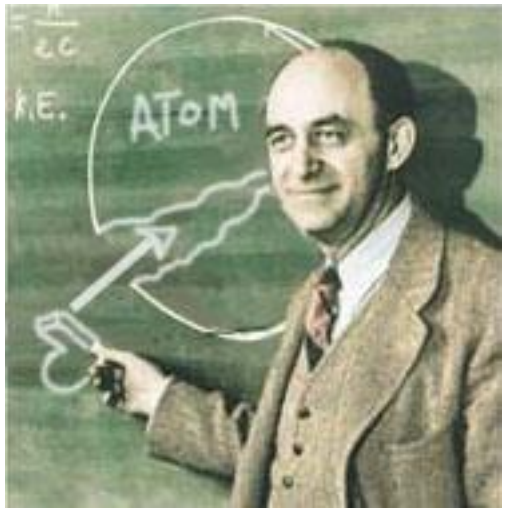
Resistività (Ωcm)	Materiale
$\rho < 10^{-3}$	Metalli
$10^{-3} < \rho < 10^{5}$	Semiconduttori
$\rho > 10^{5}$	Isolanti

E come variano questi parametri con la temperatura?

- I Metalli. Gli elettroni sono liberi di muoversi. La conducibilità diminuisce con la temperatura.
- I Semiconduttori. Allo zero assoluto non c'è conducibilità elettrica e la conducibilità cresce con la temperatura.
- Gli isolanti. Conducibilità zero in un ampio intervallo di temperature.

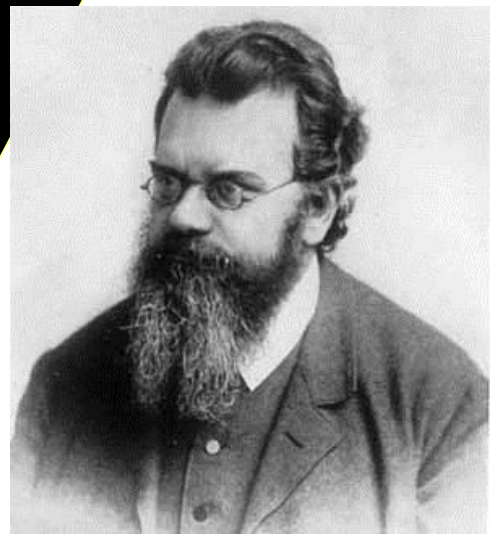
Perché?

Come possiamo interpretare questo a livello microscopico?

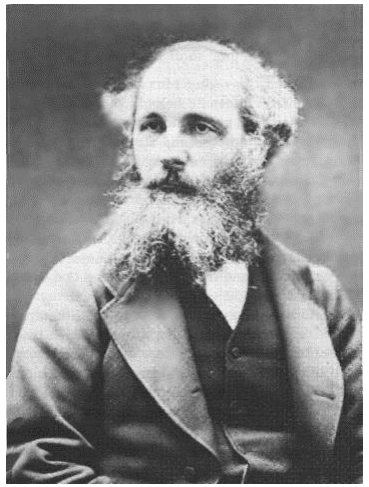


E Fermi

P Dirac

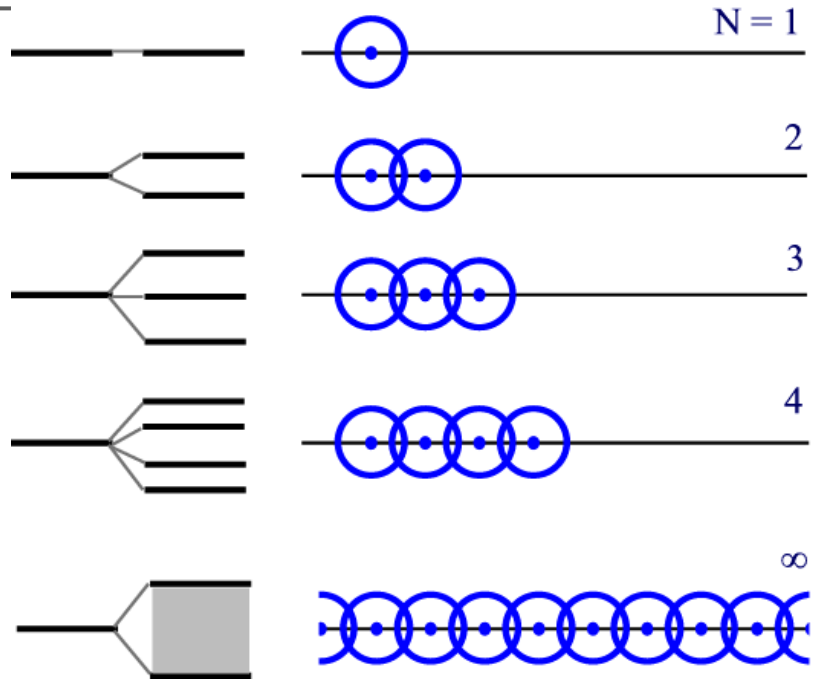


L Boltzmann



C Maxwell

Formazione delle bande nei solidi



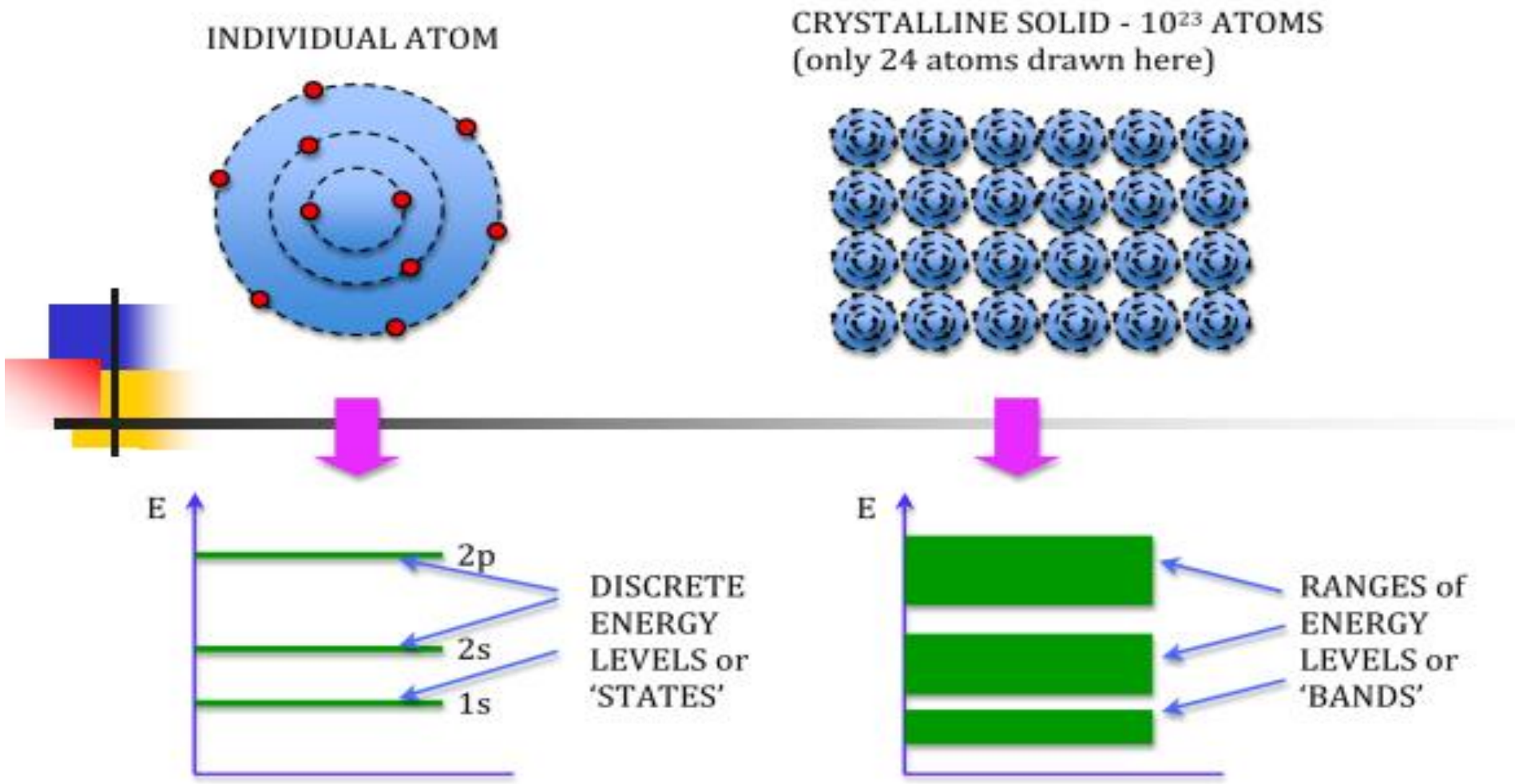
Consideriamo un solido fatto con una sostanza che abbia un solo orbitale s.

Quando il numero di atomi che hanno orbitali che si sovrappongono cresce diminuisce la distanza tra i livelli energetici degli orbitali.

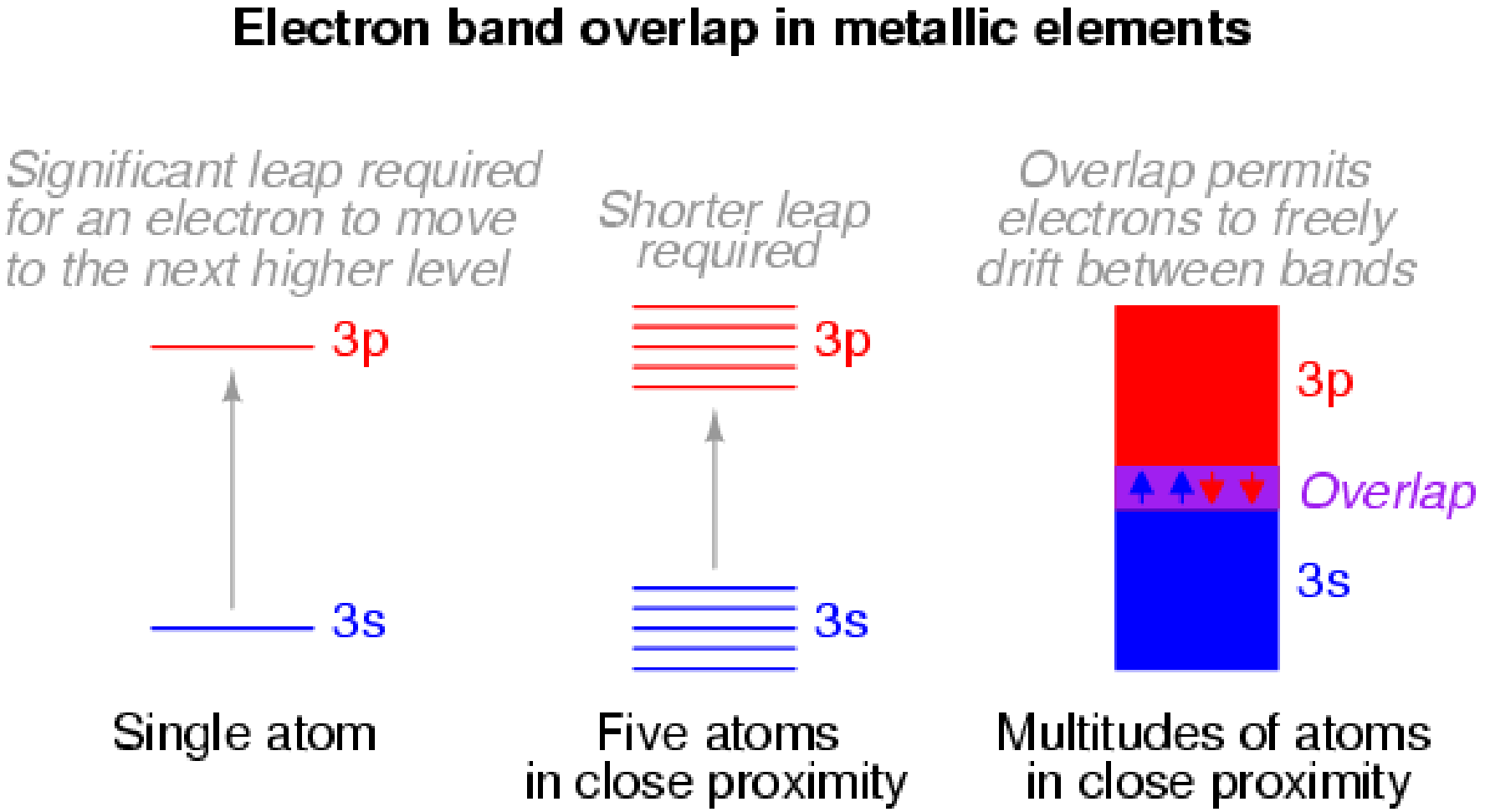
Nel caso di N atomi (N=∞) i livelli energetici sono così vicini che appaiono come un continuo.

Animazione: bande di energia

Bande energetiche in un solido



Bande energetiche in un solido



Riempimento delle bande nei solidi

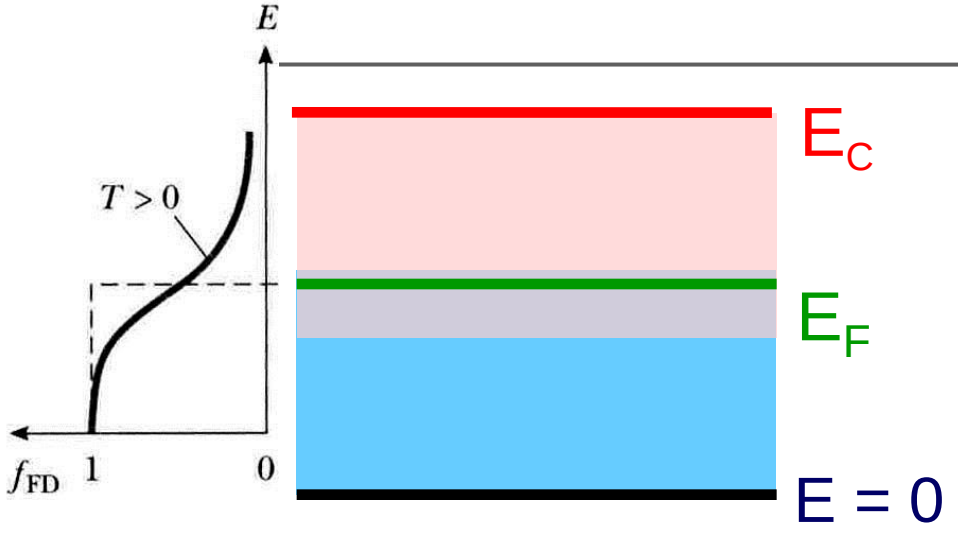
Le diverse proprietà elettriche derivano dal diverso riempimento delle bande di energia nei solidi

Come avviene questo riempimento?

animazione

Diagramma a bande: metallo

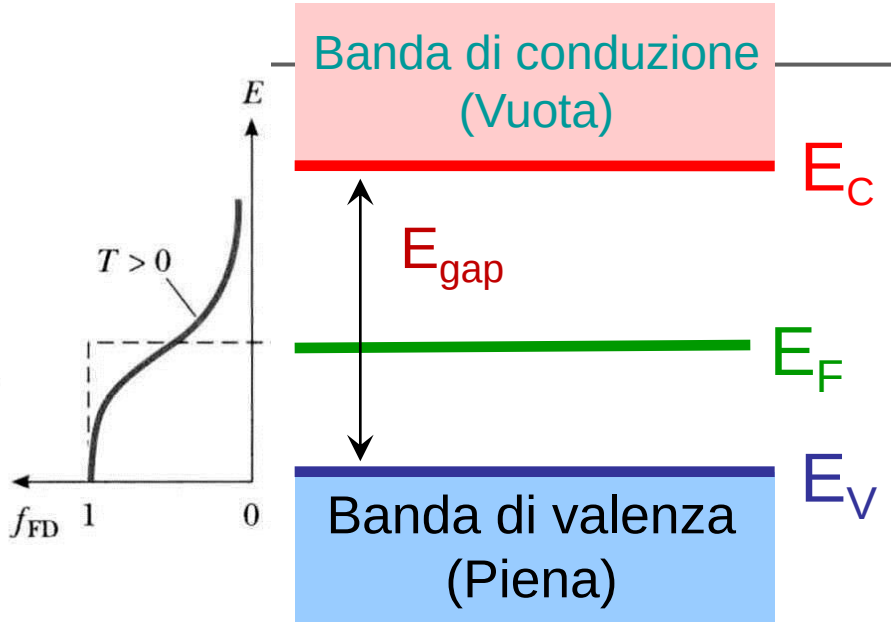
Funzione di Fermi



Banda di conduzione e Banda di valenza sovrapposte
Il livello di Fermi si trova all'interno di una banda.

- A T = 0, tutti i livelli nella banda di conduzione sotto l'energia di Fermi E_F sono riempiti con elettroni, mentre tutti i livelli al di sopra di E_F sono vuoti.
- Gli elettroni sono liberi di muoversi negli stati vuoti della banda anche con solo un debole campo E, → elevata conducibilità elettrica!
- A T > 0, gli elettroni hanno una certa probabilità non nulla di essere termicamente eccitati da sotto a sopra il livello di Fermi.

Diagramma a bande: isolante

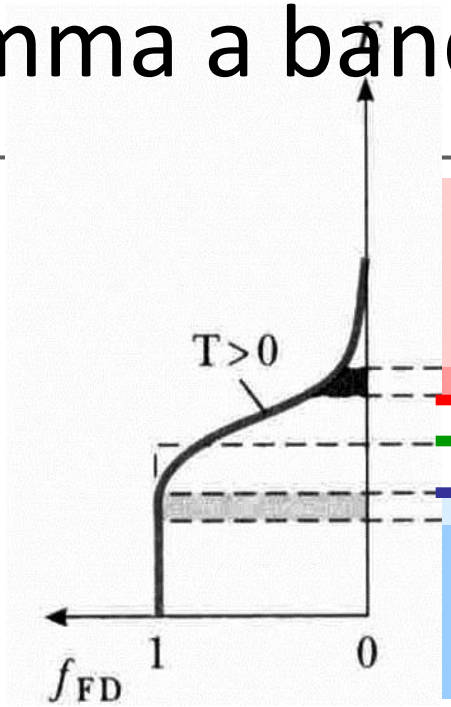


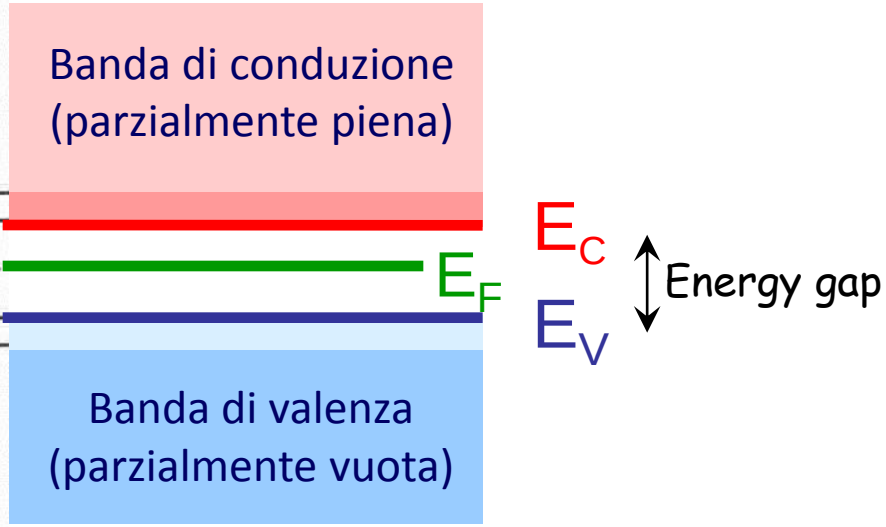
Il livello di Fermi si trova all'interno di una regione proibita

- At T = 0, la banda di valenza è piena di elettroni mentre la banda di conduzione è vuota, → conducibilità zero.
  - Energia di Fermi E_F è a metà di un largo gap energetico E_G(2-10 eV) tra la banda di valenza e di conduzione.
- A T > 0, gli elettroni **NON** sono eccitati termicamente dalla banda di valenza alla banda di conduzione →**conducibilità zero**.

Nota: KT a T=300K è pari a 0.0259 eV, quindi <<E_{gap}

Diagramma a bande: semiconduttore





Il livello di Fermi si trova all'interno di una regione proibita

- A T = 0, la banda di valenza è piena di elettroni e la banda di conduzione vuota →**conducibilità zero**.
  - L'energia di Fermi E_F è a metà di un gap piccolo (<1 eV) tra la banda di conduzione e la banda di valenza.
- A T > 0, gli elettroni vengono eccitati termicamente dalla banda di valenza alla banda di conduzione, →**conducibilità misurabile**.

Bande di energia e resistività per alcuni solidi

	Energy gap	
diamante	5.3 eV	isolante
silicio	1.1 eV	semiconduttore
germanio	0.7 eV	semiconduttore

Resistività (Ωcm)	Materiale
$\rho < 10^{-3}$	Metalli
$10^{-3} < \rho < 10^{5}$	Semiconduttori
$\rho > 10^{5}$	Isolanti

Quindi un semiconduttore non drogato si comporta quasi come un isolante

Vediamo cosa vuol dire drogare un semiconduttore

- Animazione drogare "n" es P in Si
- Animazione drogare "p" es B in Si

Drogare (doping) = aggiungere impurezze (poche!)

Concentrazione di impurezze

(es doping in Si): = $10^{15}cm^{-3}/10^{22}cm^{-3} = 10^{-7}$

piccola rispetto alla densità atomica del materiale!

Aggiungendo queste poche impurezze la conducibilità cambia drasticamente! animazione

Perché i solidi hanno diverse caratteristiche elettriche?

A causa del loro diverso diagramma a bande!

- Animazione 1 (isolanti e conduttori)
- Animazione 2 (semiconduttori)

E come varia la resistività elettrica ρ con la temperatura?

- Dalla teoria classica della conduzione elettrica nei solidi (modello di Drude) si ottiene che:

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad ; \quad \rho = \frac{m}{ne^2\tau}$$

$$\mu = \frac{e\tau}{m}$$

$$\sigma = ne\mu$$

- Relaxation time, Scattering time τ è il tempo medio tra le collisioni **elettrone- *atomi del reticolo*** *?? NO IMPUREZZE e VIBRAZIONI RETICOLARI giocano un ruolo importante → 1/τ = probabilità di collisione con impurezze e vibrazioni reticolari*
- n concentrazione elettronica, μ mobilità $v_d = \mu E$
- Metallo: resistenza cresce con T
  - Perchè? $\uparrow T \Rightarrow \downarrow \tau \Rightarrow \uparrow \rho$
- Semiconduttore: la resistenza decresce con T.
  - Perchè? $\uparrow T \Rightarrow \downarrow \tau, \uparrow n$ (la T "libera" elettroni per la conduzione) $\Rightarrow \downarrow \rho$

R(T) per un metallo

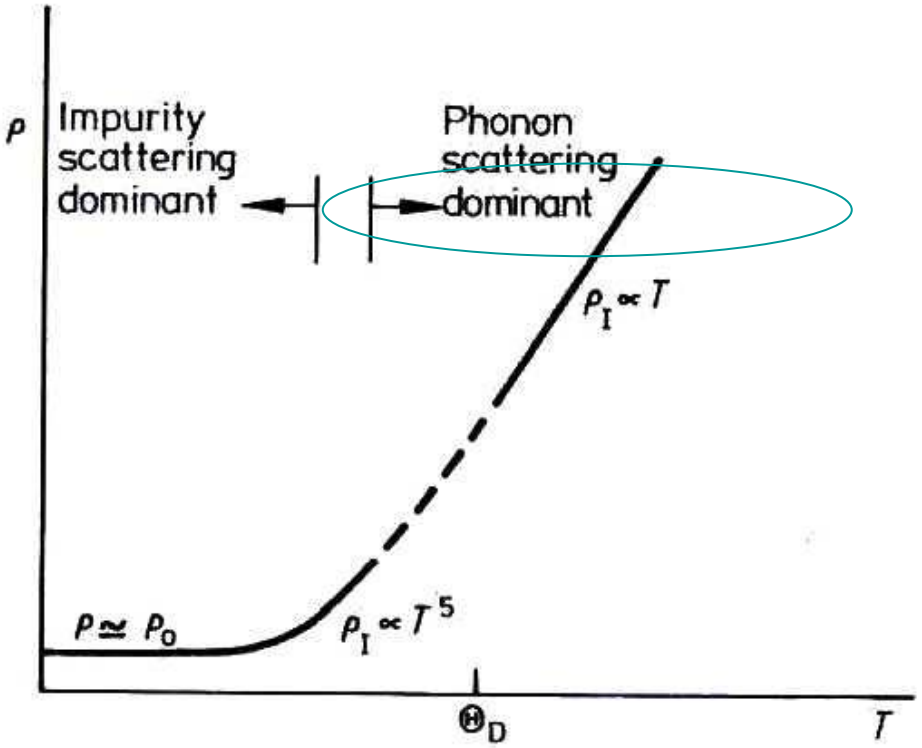
$$\frac{1}{\rho} = \sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad ; \quad \rho = \frac{m}{ne^2\tau}$$

cammino libero medio fra urti successivi

$$\tau = \frac{l_{urti}}{v_t} \quad ; \quad v_t = \sqrt{\frac{2E_t}{m}} = \sqrt{\frac{3k_BT}{m}}$$

Velocità termica

$\uparrow T \Rightarrow \downarrow \tau, \ \rho \uparrow$



Per un metallo al crescere di T aumenta ρ e quindi R

Che cosa succede per un semiconduttore?

- Comportamento di R vs T metalli e semiconduttori
  - Animazione 1

- Semiconduttori: cresce la densità elettronica n

Animazione 2

Riassumendo un semiconduttore ha:

A T= 0K:

- *banda di valenza completamente occupata*
- *banda di conduzione completamente vuota*
- *piccolo gap di energie proibite E_g= 1,1 eV (Si); 0,7 eV (Ge); 1,4 eV (GaAs)*

A T>0K:

- *un elettrone può essere eccitato dalla banda di valenza a quella di conduzione*
- *ogni elettrone che passa in banda di conduzione lascia un posto vuoto (buca) in banda di valenza*
- *anche la buca in banda di valenza è "mobile", perché può essere occupata da un elettrone che lascia a sua volta una buca e così via*
- *sotto l'azione di un campo elettrico esterno il moto di deriva avviene sia in banda di conduzione che in banda di valenza*

due contributi alla conducibilità:

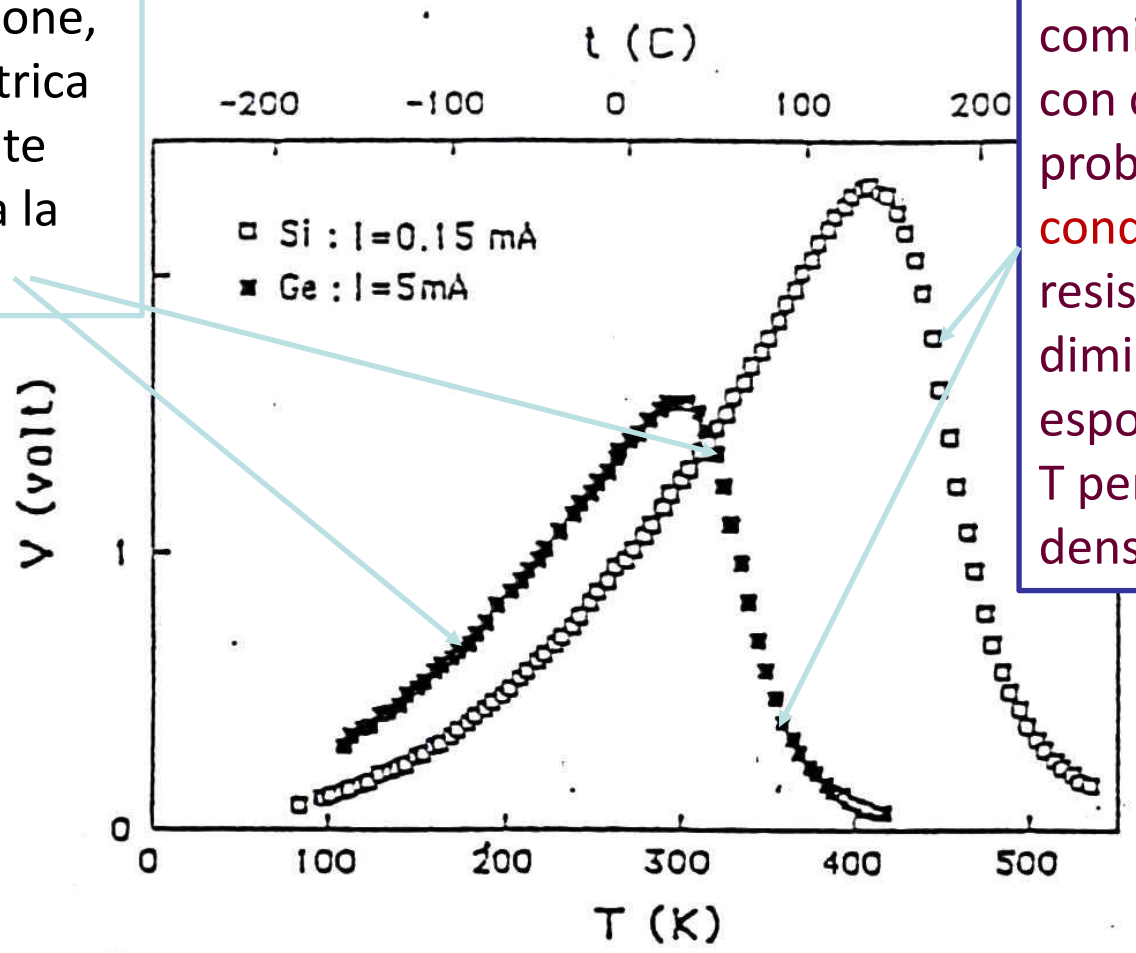
$$\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p$$

contributo degli elettroni in banda di conduzione

contributo delle buche in banda di valenza

resistenza elettrica in semiconduttori debolmente drogati

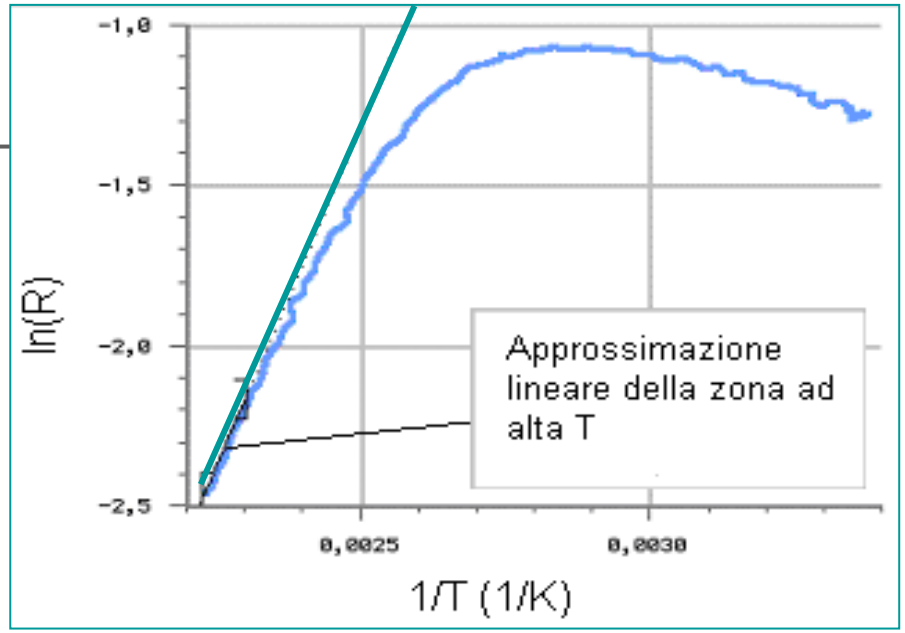
zona “<u>estrinseca</u>”: tutti i portatori di maggioranza sono in banda di conduzione, la resistenza elettrica cresce linearmente con T perché cala la mobilità



zona “<u>intrinseca</u>”: i portatori “intriseci” cominciano a passare con crescente probabilità in banda di conduzione, la resistenza elettrica diminuisce esponenzialmente con T perché cresce la densità n di portatori

V a corrente costante → resistenza

Conducibilità, semiconduttore drogato (tipo n)



- A basse T, **in regime estrinseco**
  - $N_d >> n_i$; n>>p, → $n = N_d + n_i \approx N_d$
  - n è indipendente da T, quindi $\sigma = ne\mu = N_d e\mu(T)$
  - → σ vs T come μ vs T ($\mu \approx T^{-3/2}$)
- A T maggiori, **in regime intrinseco**
  - gli elettroni "saltano" in banda di conduzione, $N_d << n_i$,
  - $n \approx n_i$, $\sigma = ne\mu_e + pe\mu_h$ visto che μ indip da T σ *vs* T come n_i, vs T, in particolare $n_i \approx T^{3/2} \exp(-E_g/2KT)$

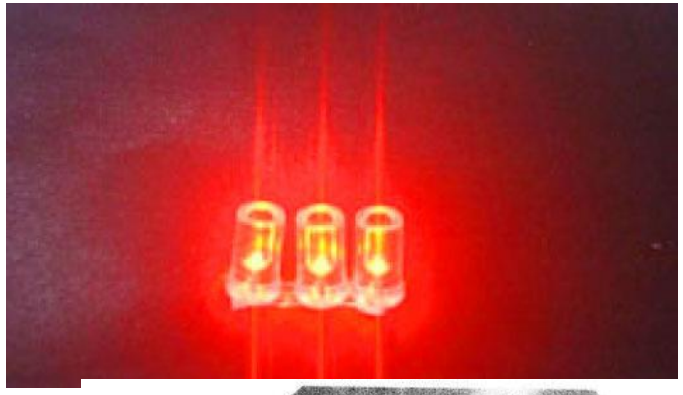
Un plot semilogaritmico di σ vs T fornisce una linea retta di pendenza Eg(0)/2K

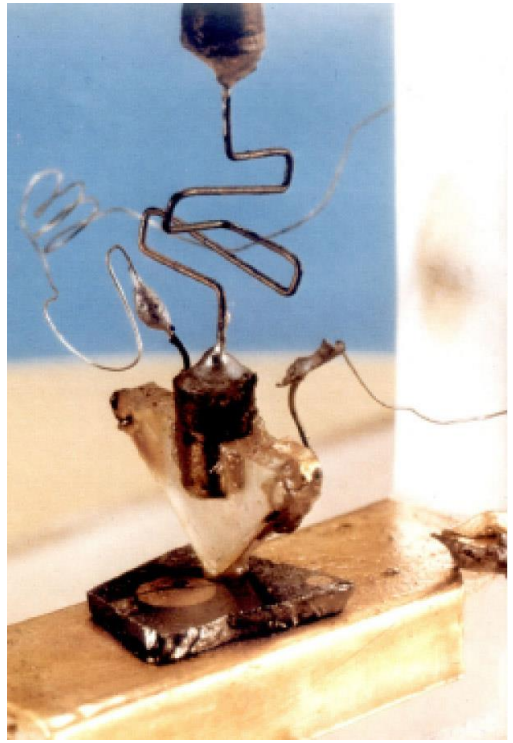
Per saperne di più..

- S.M. Sze, “Fisica dei dispositivi a semiconduttore”, Tamburini editore.
- R.Fieschi “Stati e Trasformazioni della Materia”, NIS La nuova Italia Scientifica.
- CD: M Roncaglia, R. Fieschi “Dal silicio al computer” proprietà ed applicazioni dei semiconduttori
- CD: R. Fieschi “EDUMAT” (italiano)
- CD: R. Fieschi“EDUMAT 2” (inglese)

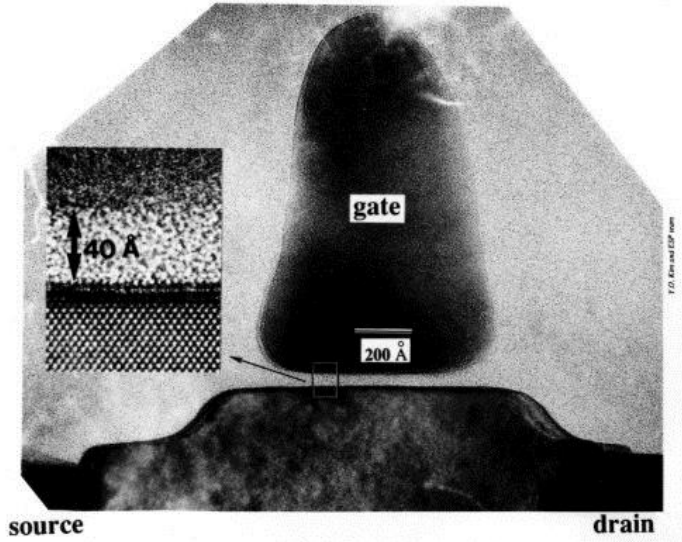
Daniela.Cavalcoli@unibo.it

Semiconduttori

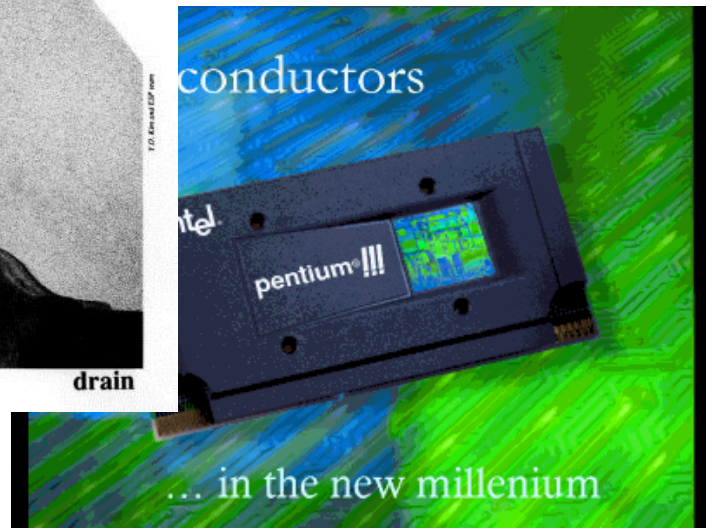




1950



2000

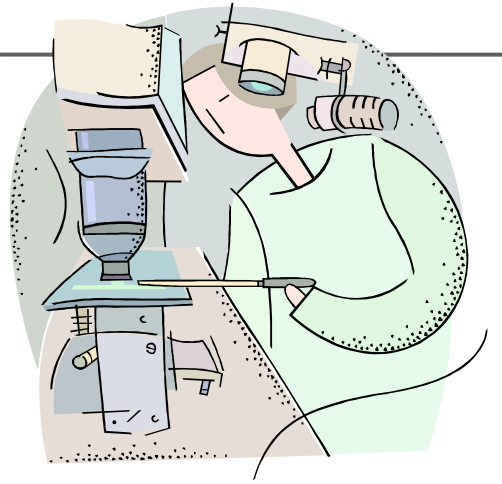


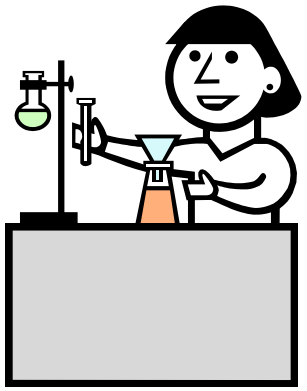
Le applicazioni dei semiconduttori

Le particolari proprietà fisiche dei semiconduttori li rendono adatti alla fabbricazione di vari dispositivi, quali:

- Diodi, transistor, circuiti integrati.
- Fotorivelatori.
- Laser (p.es. GaAs-AlGaAs)
- Sensori (di pressione, campo magnetico, ecc.)
- Termometri(Ge, Si, GaAs, ecc.)
- Celle fotovoltaiche(Si, GaAs, ecc.).

Che cosa facciamo? Qual è la nostra ricerca?





Settore di Fisica della Materia

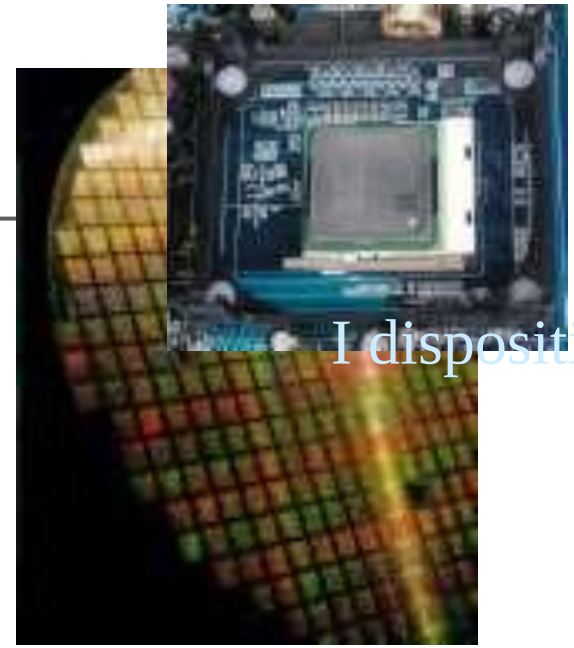
Dipartimento di Fisica e Astronomia

Università di Bologna

https://site.unibo.it/semiconductor-physics/en

Ex: applicazioni in microelettronica

Silicio

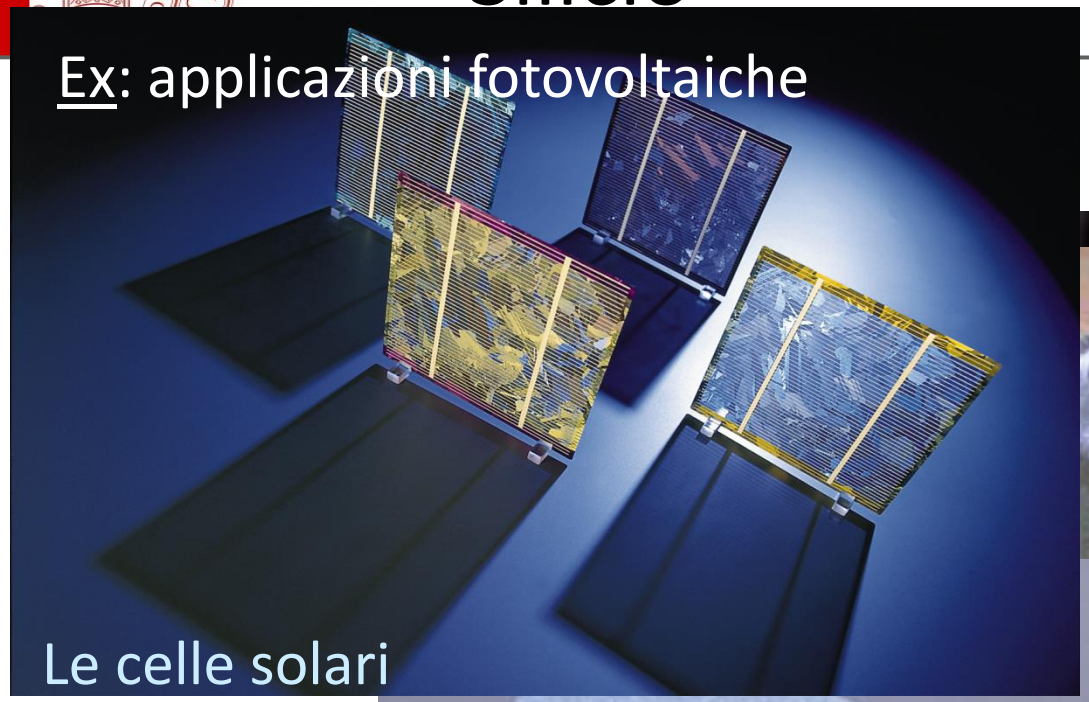


I dispositivi

Il lingotto

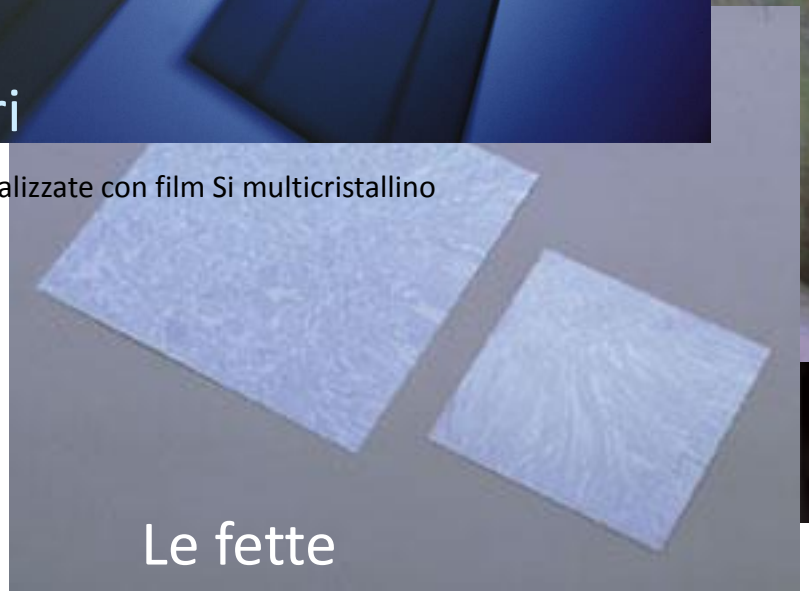
I wafer

Ex: applicazioni fotovoltaiche



Le celle solari

Celle solari trasparenti realizzate con film Si multicristallino

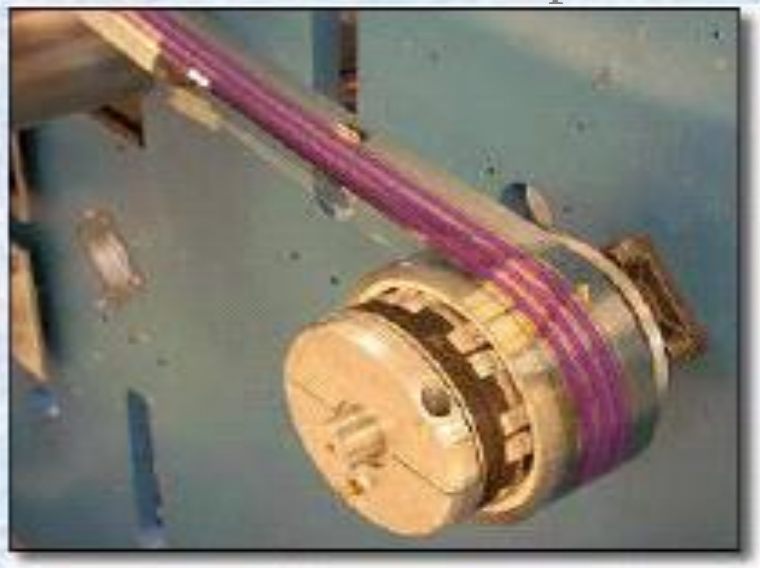


Le fette

Materiali Organici

Celle solari flessibili a polimeri

Economiche, facili da produrre



Televisore a OLED

Ai fisici piace porsi delle domande e trovare soluzioni a ogni problema

Finche' in Natura ci sara' qualcosa da capire, ci sara' anche un fisico che cerchera' di dare delle risposte

Per far questo il fisico, possiede una solida formazione di base ed una grande versatilita', doti che lo rendono particolarmente "prezioso" nel mondo del lavoro in svariati settori