

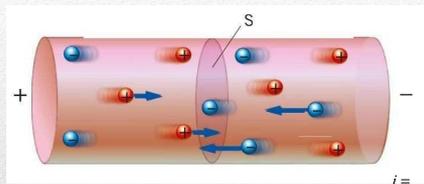
# Esperimento per trovare il calore specifico dell'acqua

Prof. Gentili Fabrizio

## Correnti e circuiti

corrente: la quantità di carica che  
attraversa una superficie nell'unità  
di tempo

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$



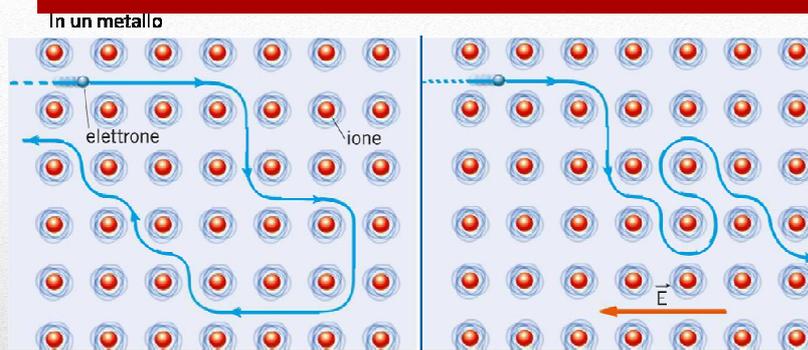
1 Ampere (A) = 1 C/s

E' il rapporto tra la quantità di carica che attraversa una  
sezione del conduttore e l'intervallo di tempo impiegato.

per convenzione il verso positivo della corrente è quello dei portatori di  
carica positiva  $\Rightarrow$  il verso della corrente è opposto a quello degli elettroni

## La velocità di deriva degli elettroni

- Il moto degli elettroni di conduzione si descrive con un modello semplificato:
- si ipotizza che tutti gli elettroni che contribuiscono alla corrente elettrica si muovano verso i punti a potenziale maggiore con la stessa velocità: la velocità di deriva  $v_d$ ;
- $v_d$  è il modulo della velocità media degli elettroni del metallo.



Agitazione termica

Con una differenza di potenziale



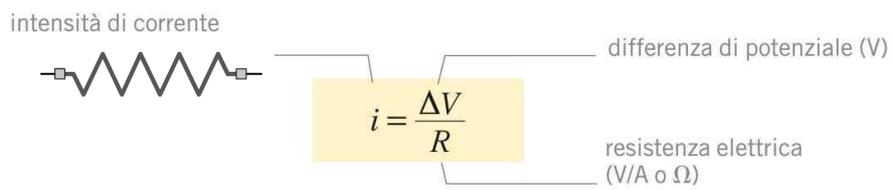
## LEGGE DI OHM

**Georg Simon Ohm** (Erlangen, 1789 – Monaco di Baviera, 1854)



## La prima legge di Ohm

nei conduttori ohmici l'intensità di corrente è direttamente proporzionale alla differenza di potenziale applicata ai loro capi.



La costante di proporzionalità  $R$  si chiama **resistenza** elettrica e si misura in volt fratto ampere (V/A). Questa unità di misura è chiamata *ohm* ( $\Omega$ ):

$$1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$$

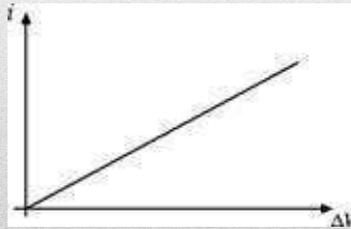
### I legge di Ohm



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

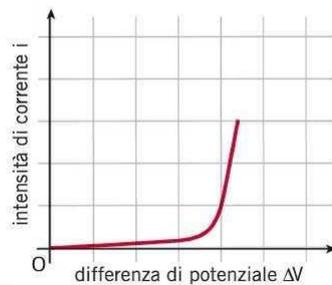
Resistenza

$$[R] = [V/i] \rightarrow 1V/A = 1 \text{ Ohm } (\Omega)$$



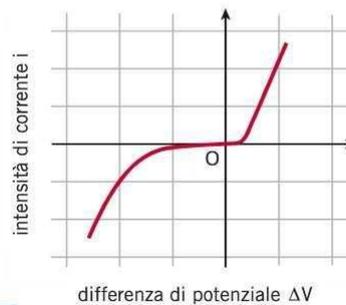
Corrente e differenza di potenziale non sono sempre direttamente proporzionali!

► Il diagramma sotto mostra la curva caratteristica di un tubo al neon.



**A**

► Diversa è la curva caratteristica di un LED luminoso, che si usa negli stereo e nei cellulari.



**B**

## Effetto Joule

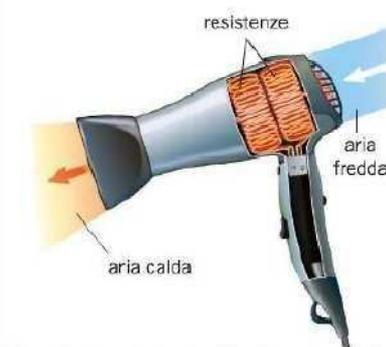
Uno dei fenomeni che accompagnano il passaggio della corrente elettrica in un conduttore è la produzione di calore, che si manifesta con un aumento di temperatura del conduttore stesso.

Questo fenomeno è noto come **effetto termico della corrente elettrica, o effetto Joule**.

► Nel ferro da stiro il calore riscalda la piastra.



► Nell'asciugacapelli il calore riscalda l'aria.



Mentre passa la corrente, l'energia potenziale elettrica si trasforma in energia interna, dissipata sotto forma di calore

## Effetto Joule

Sappiamo che durante il moto di una carica elettrica  $q$  da un punto a un altro, tra i quali esiste una differenza di potenziale elettrico  $\Delta V$ , sulla carica viene eseguito un lavoro  $W$  dato da:

$$W = q \cdot \Delta V$$

La carica  $q$  è quella che attraversa un conduttore durante un intervallo di tempo  $\Delta t$ .

Se la corrente elettrica dovuta al passaggio della carica  $q$  ha intensità  $i$  (che per semplicità supponiamo costante), la carica  $q$  è data da:

$$q = i \cdot \Delta t$$

Sostituendo nell'espressione del lavoro otteniamo:

$$W = \Delta V \cdot i \cdot \Delta t$$

Questa è proprio l'energia che viene dissipata sotto forma di calore durante l'intervallo di tempo  $\Delta t$  in un conduttore, percorso da una corrente di intensità  $i$ , al quale è applicata una differenza di potenziale  $\Delta V$ .

Se  $R$  è la resistenza del conduttore, applicando la prima legge di Ohm possiamo ottenere la seguente espressione

$$W = R \cdot i^2 \cdot \Delta t$$

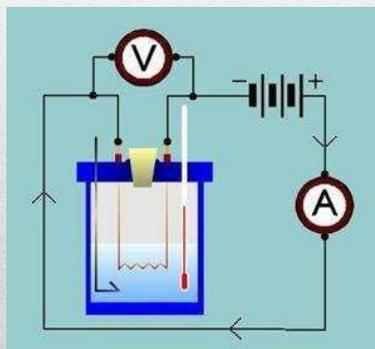
## *Il calore specifico dell'acqua*

### **Scopo dell'esperimento**

In fisica, si definisce *energia di un sistema* la sua capacità a compiere un lavoro. Come sappiamo, esistono molteplici *forme di energia: meccanica, termica, chimica, nucleare, etc.*

Il primo principio della termodinamica sancisce la possibilità di trasformare l'energia da una forma all'altra, senza perdite (almeno teoricamente).

Utilizzeremo proprio il primo principio, per determinare il *calore specifico dell'acqua*.



A questo punto, in base al primo principio, potremo uguagliare le due quantità *calore* e *lavoro* per determinare il *calore specifico* dell'acqua.

$$Q = \underbrace{C_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot \Delta T}_{\text{Calore ceduto all'acqua}} = \underbrace{R_{risc} \cdot I^2 \cdot \Delta t}_{\text{Lavoro fornito dal generatore}} = W$$

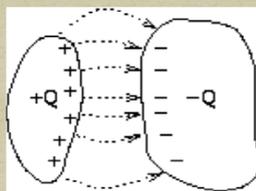
---

## *Carica e scarica in un condensatore*

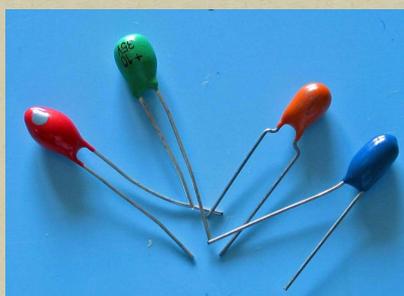
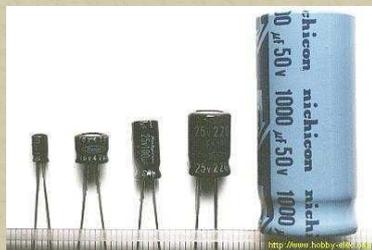
**Prof Gentili Fabrizio**

### Il condensatore

- Un condensatore è costituito in linea di principio da due conduttori isolati e posti a distanza finita, detti armature. Caricando i due conduttori con carica opposta, si forma tra di essi un campo elettrico, e si produce quindi una differenza di potenziale.

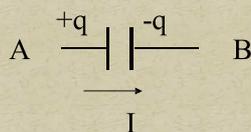


## Condensatori reali



## Il condensatore come elemento circuitale

Il simbolo del condensatore è il seguente:



Se una corrente  $I$  giunge sull'armatura positiva del condensatore, allora in un intervallo di tempo  $\Delta t$  la carica aumenta di una quantità

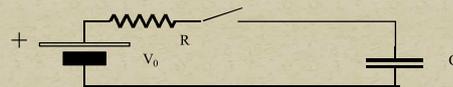
$$\Delta q = I \Delta t.$$

Una corrente uguale porterà via una quantità di carica uguale ed opposta dall'altra armatura.

Si dice comunemente che nel condensatore “scorre corrente” anche se in realtà tra le due armature non si ha un reale movimento di cariche.

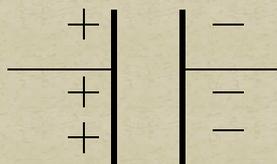
## Carica del condensatore

- Per caricare un condensatore, ovvero per depositare le cariche positive e negative sulle armature, si utilizza di solito il circuito seguente:



- La resistenza  $R$  è ineliminabile, in quanto anche collegando il generatore direttamente al condensatore, rimane presente la sua resistenza interna.

- Intuitivamente, si capisce che man mano che il condensatore si carica, il potenziale della armatura collegata al polo positivo aumenta, e si avvicina a quello del generatore.
- Allora la differenza di potenziale ai capi della resistenza diminuisce, per cui la corrente diminuisce di intensità.
- Quindi il condensatore si carica dapprima velocemente, poi sempre più lentamente.



Il processo di carica di un condensatore

La *seconda legge di Kirchhoff*, applicata ad un circuito RC, ci dice che durante la fase di carica (con l'interruttore nella posizione A), sulle armature del condensatore si viene a depositare una carica  $q$ , definita attraverso l'equazione differenziale:

$$V_{\text{fem}} - R \cdot \frac{dq(t)}{dt} - \frac{q(t)}{C} = 0$$

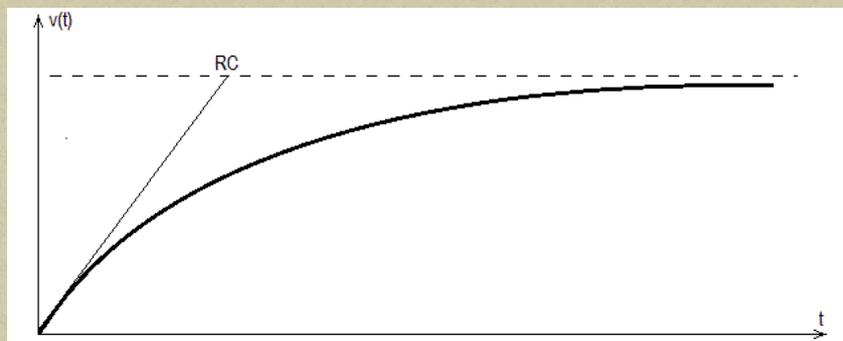
Da cui si ricava (con la condizione iniziale, cioè con la condizione di condensatore inizialmente scarico):

$$q(t) = C \cdot V_{\text{fem}} \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

Dove  $\tau = R \cdot C$  è detta *costante di tempo* del circuito. Si dimostra che la tensione ai capi del condensatore è definita dalla seguente espressione:

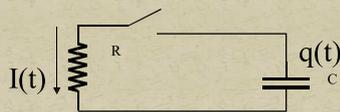
$$V(t) = \frac{q(t)}{C} = V_{\text{fem}} \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

Il cui grafico è



## Scarica del condensatore

Per scaricare il condensatore, si utilizza il circuito seguente:



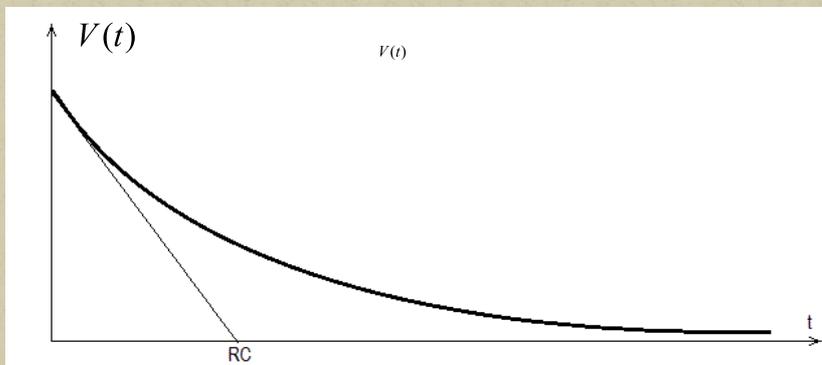
Con passaggi analoghi si ottiene la seguente equazione:

$$V(t) = \frac{q(t)}{C} = V_{fem} \cdot e^{-t/\tau}$$

Dove  $\tau = R \cdot C$  è la *costante di tempo* del circuito.

$$V(t) = \frac{q(t)}{C} = V_{fem} \cdot e^{-t/\tau}$$

Il grafico è



**Analisi dei fenomeni transitori nel circuito RC**

**Scopo dell'esperimento**

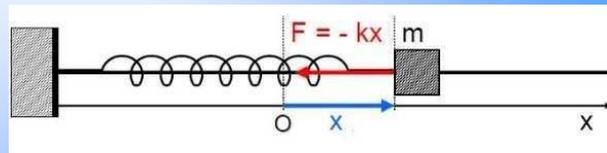
Lo scopo di questo esperimento è quello di studiare quantitativamente il processo di carica e scarica di un condensatore, posto in serie ad un resistore. Si andrà a verificare, inoltre, mediante un fit dei dati sperimentali, con l'aiuto della soluzione teorica, che la costante di tempo del circuito è, entro gli errori sperimentali, compatibile con il valore tabulato.

***Perché nella vita quotidiana, il valore della costante  $\tau = R \cdot C$ , può decidere tra la vita e la morte....***

**APPLICAZIONI**

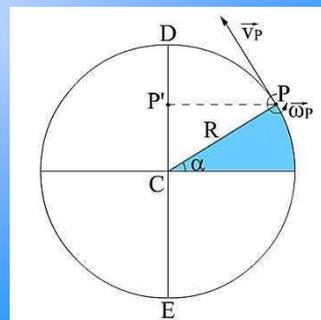


## Oscillatore armonico smorzato



Prof Gentili Fabrizio

Il moto armonico è il movimento che viene ottenuto proiettando su di un diametro le posizioni di un punto materiale che si muove di moto circolare uniforme. Questo tipo di moto è il più semplice tra tutti quelli oscillatori, poiché si possono trascurare gli effetti degli attriti.



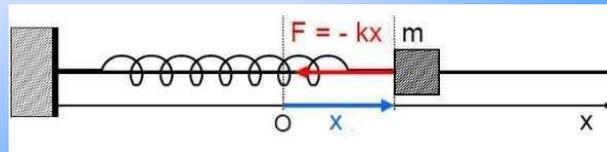
Tale moto è periodico, in quanto si ripete ad intervalli regolari e può essere descritto attraverso una funzione goniometrica di ampiezza  $A$  costante nel tempo come ad esempio

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

In tale moto l'accelerazione è proporzionale allo spostamento ma opposta secondo la seguente relazione:

$$a = -\omega^2 x$$

Nel *caso ideale* un esempio di oscillatore armonico semplice può essere una massa  $m$  attaccata ad una molla di costante elastica  $k$



L'equazione del moto è espressa dalla seconda legge della dinamica

$$F = ma$$

dove la forza è la forza elastica

$$F = -kx$$

quindi

$$-kx = ma$$

da cui

$$a = -\frac{k}{m}x$$

confrontando con

$$a = -\omega^2 x$$

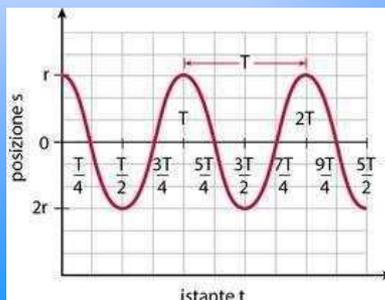
si ottiene un moto armonico con

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

La soluzione è una legge dello spostamento in funzione del tempo che è la seguente

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Il cui grafico, ponendo  $\varphi_0 = 0$  è

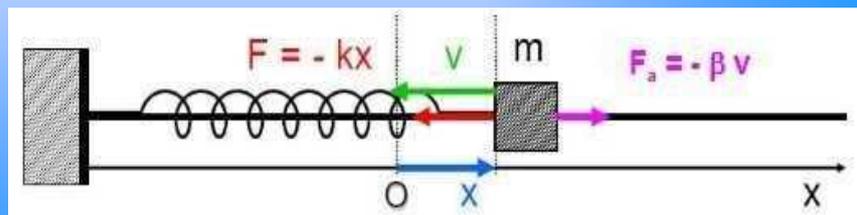


Nell'oscillatore armonico semplice non sono considerate le forze d'attrito in quanto tale modello è una semplificazione della realtà, valida se e solo se le forze d'attrito sono trascurabili.

Nel *caso reale* su di una massa attaccata ad una molla oltre alla forza elastica agiscono delle forze di attrito; tali forze vengono prese in esame nel modello dell'oscillatore armonico smorzato.

Solitamente in questo modello l'attrito è di tipo viscoso, direttamente proporzionali alla velocità e di verso opposto, ovvero

$$F = -\beta v$$



L'equazione del moto diviene quindi:

$$F_{elastica} + F_{attrito} = ma$$

e sostituendo

$$-kx - \beta v = ma$$

da cui

$$a = -\frac{k}{m}x - \frac{\beta}{m}v$$

$$a = -\frac{k}{m}x - \frac{\beta}{m}v$$

Considerando che la velocità indica la variazione dello spostamento in funzione del tempo, la precedente è un'equazione differenziale di secondo grado omogenea la cui soluzione è caratterizzata da tre diversi regimi dovuti al diverso valore che può assumere la forza di attrito rispetto alla forza elastica.

Tralasciando gli strumenti matematici che non rientrano nel piano di studi di una scuola superiore, consideriamo la soluzione in particolari condizioni iniziali

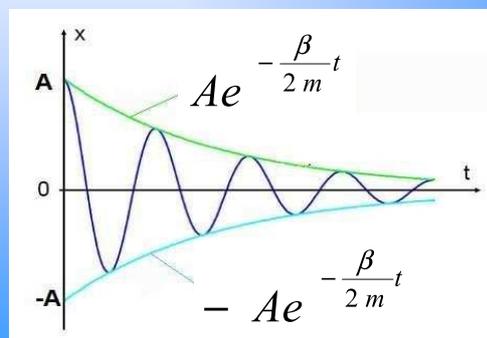
$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \cdot e^{-\frac{\beta}{2m}t}$$

Osserviamo che la forza di attrito compie un lavoro strettamente negativo per cui l'energia totale dell'oscillatore diminuirà fino ad annullarsi; quindi in un tempo più o meno lungo, l'oscillatore, una volta perturbato, tornerà nella sua posizione di riposo a causa della dissipazione d'energia.

Tale durata dipende strettamente dal valore  $\beta$  e dalla massa  $m$  che compaiono nell'esponente della formula e che né determinano la rapidità dello smorzamento

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \cdot e^{-\frac{\beta}{2m}t}$$

Il grafico di tale legge, ponendo  $\varphi_0 = 0$  è il seguente



**Obiettivo: studio del moto oscillatorio smorzato**

L'obiettivo dell'esperimento è quello di analizzare sperimentalmente il moto di un carrello collegato tramite due molle per verificare la legge oraria delle oscillazioni armoniche smorzate e determinare la costante elastica della molla.

## La curva caratteristica di un LED



**Prof Gentili Fabrizio**

## Introduzione

I materiali possono essere classificati in tre famiglie, a seconda della loro risposta al passaggio di una corrente elettrica.

a. Conduttori



b. Isolanti



c. Semiconduttori



La grandezza fisica che ci dice la capacità di un materiale di far passare le cariche elettriche è la **resistività  $\rho$**

La **resistività**  $\rho$  di un materiale è definita fisicamente come

$$\rho = \frac{RS}{l}$$

dove:

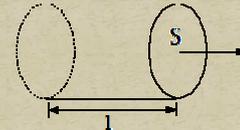
**R** è la resistenza elettrica in Ohm di un campione specifico di quel materiale;

**S** è l'area della sezione del campione perpendicolare alla direzione della corrente;

**l** è la lunghezza del campione.

Si misura in [Ohm x metro]

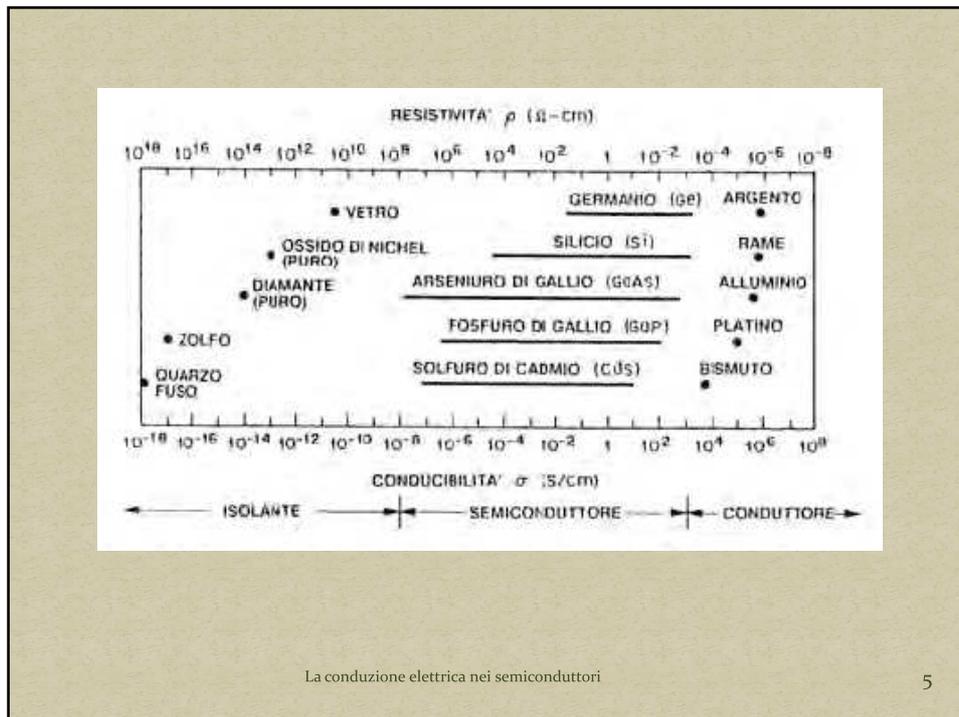
Tale legge prende il nome di 2° Legge di Ohm



$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

Considerando i loro valori di resistività possiamo dividere i materiali in:

- **ISOLANTI**  $\rho > 10^5 \ \Omega \text{ m}$
- **SEMICONDUTTORI**  $10^{-5} < \rho < 10^5 \ \Omega \text{ m}$
- **CONDUTTORI**  $\rho < 10^{-5} \ \Omega \text{ m}$



- Perché alcuni materiali si comportano come conduttori e altri come isolanti?
- Che relazione c'è fra la conduttività e la struttura atomico-molecolare di un solido?

## Teoria delle bande energetiche

## Struttura a bande

La conduttività di un elemento è data dalla disponibilità dello stesso a cedere, più o meno facilmente, elettroni.

Gli elettroni utili sono quelli delle orbite più esterne, cioè quelli che risentono meno dell'attrazione del nucleo.

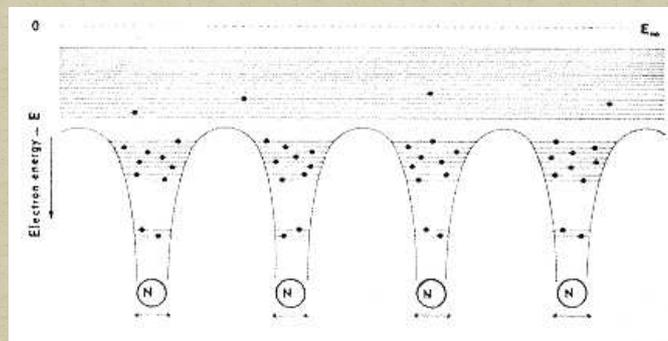
Ad un elemento con alta conduttività, basterà fornire poca energia per "strappare" gli elettroni esterni e renderli disponibili per una corrente elettrica.

La conduzione elettrica nei semiconduttori

7

## Struttura a bande

Gli elettroni più interni, invece, sono più fortemente legati. Occorre cioè una quantità maggiore di energia per liberarli.



La conduzione elettrica nei semiconduttori

8

## Struttura a bande

Quindi:

- Gli elettroni che vengono ceduti sono quelli che risiedono negli orbitali più esterni dell'atomo dell'elemento.
- Tali elettroni, allo stato naturale, hanno una propria energia che li mantiene fissi nell'orbitale e gli impedisce di staccarsi dall'atomo (si dice che si trovano nella banda di valenza).
- Aumentando, l'energia arriverà ad un livello tale da "staccare" l'elettrone dal suo orbitale. (si dice che gli elettroni si trovano nella banda di conduzione)

La conduzione elettrica nei semiconduttori

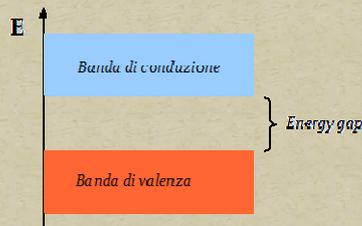
9

## Struttura a bande

Possiamo quindi immaginare che esistano delle vere e proprie "zone", chiamate appunto bande, in cui l'elettrone ha un valore di energia tale che:

- È in un orbitale interno dell'atomo e non partecipa alla conduzione di elettricità (*valenza*)
- È libero di muoversi nel solido e può dar vita ad una corrente elettrica (*conduzione*)

Questa situazione è schematizzabile in questo modo:

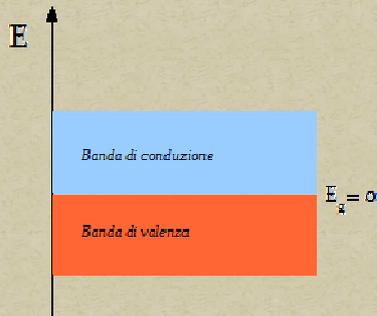


La conduzione elettrica nei semiconduttori

10

## Struttura a bande – Conduttori

Nei conduttori (che sono principalmente i **metalli**), la banda di conduzione e quella di valenza sono parzialmente sovrapposte. Ne consegue che l'energy gap è zero. In questo caso gli elettroni più esterni sono liberi di muoversi lungo tutto la superficie del solido e rispondono, quindi, immediatamente all'applicazione di un potenziale esterno.

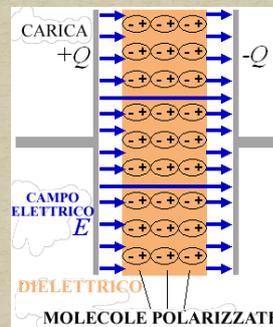
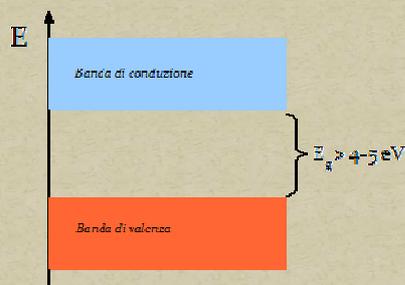


La conduzione elettrica nei semiconduttori

11

## Struttura a bande – Isolanti

Negli isolanti, fra la banda di valenza e quella di conduzione c'è una zona energeticamente "proibita". Questo gap è particolarmente grande (maggiore di 4-5 elettronvolt) così che l'energia termica non basta ad eccitare gli elettroni a sufficienza per superarlo. Essi rimangono nella banda di valenza dove sono più fortemente legati ai nuclei e non sono disponibili per generare un flusso di corrente.

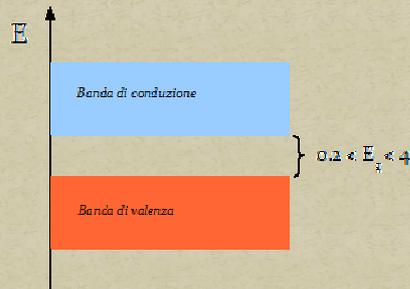


La conduzione elettrica nei semiconduttori

12

## Semiconduttori – proprietà

Nell'ambito della teoria a bande, i semiconduttori hanno un energy gap che varia dagli 0.1 ai 4 eV. Per questo si comportano come buoni isolanti a basse temperature, mentre, aumentando l'energia termica, molti elettroni riescono a superare facilmente la zona proibita e a raggiungere la banda di conduzione.



Cristallo	$E_g$ (eV)
Diamante	5.5
CdS	2.42
GaP	2.2
GaAs	1.4
Si	1.12
Ge	0.67
PbS	0.37
InSb	0.16
HgTe	0.15

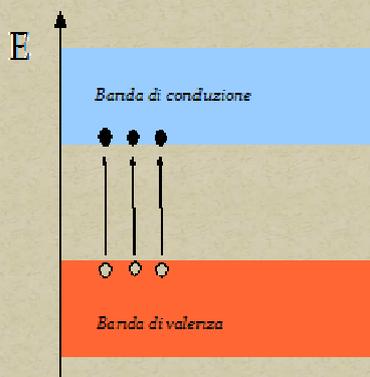
Gap di energia per alcuni semiconduttori.

La conduzione elettrica nei semiconduttori

13

## Semiconduttori – proprietà

Ma in un semiconduttore c'è anche un altro tipo di portatori di carica. Infatti, ogni volta che un elettrone acquista abbastanza energia da entrare nella banda di conduzione, lascia un "posto vuoto" nella banda di valenza che può essere descritto come una particella con carica positiva chiamata **lacuna**.



Applicando una differenza di potenziale, le lacune si muoveranno in senso opposto agli elettroni, in quanto questi tendono ad occupare lo spazio vuoto.

In un semiconduttore puro, dunque, la conducibilità elettrica è dovuta sia al moto degli elettroni nella banda di conduzione, sia al moto delle lacune nella banda di valenza

La conduzione elettrica nei semiconduttori

14

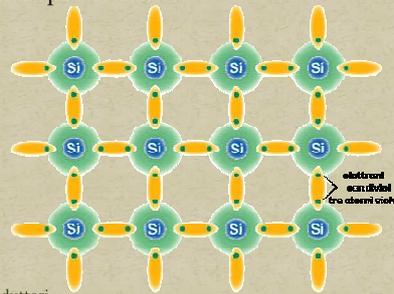
## Semiconduttori – drogaggio

Un modo per alterare le proprietà elettriche di un semiconduttore, è quello di inserire nel cristallo un certo numero di “impurezze”, ovvero atomi di diverso tipo.

In questo modo possiamo pensare di aumentare il numero di elettroni liberi in cristallo o, viceversa, fare in modo che si creino più lacune.

La pratica di aggiungere altre sostanze al semiconduttore è detta *drogaggio*. Esso può essere di **tipo n** se aumentiamo il numero degli elettroni, oppure di **tipo p** se stiamo mettendo più lacune.

Il silicio è un elemento del IV gruppo, tetravalente, cioè mette in comune per i suoi legami covalenti, i suoi 4 elettroni più esterni.

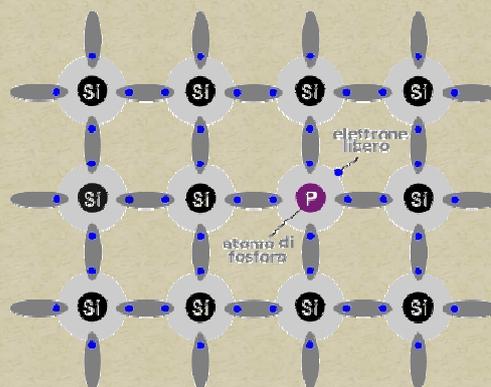


La conduzione elettrica nei semiconduttori

15

## Semiconduttori – drogaggio n

Nel cristallo di silicio, mettiamo degli atomi *pentavalenti*, ad esempio quelli del fosforo (oppure arsenico o antimonio). In questo modo, quattro dei cinque elettroni di valenza del fosforo andranno a legarsi con altrettanti atomi di silicio, e rimarrà un elettrone che l'energia termica renderà facilmente libero.

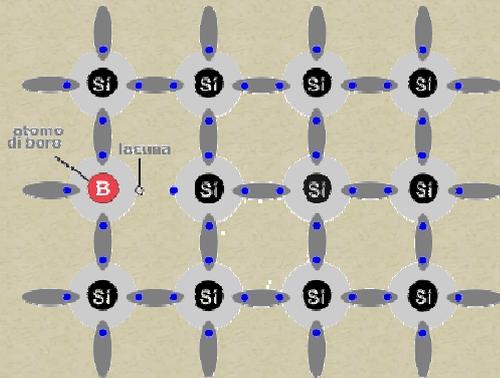


Il numero di atomi droganti inserito nel cristallo varia da  $10^{13}$  a  $10^{20}$  atomi per centimetro cubo, mentre gli atomi di silicio sono  $10^{22}/\text{cm}^3$ .

La conduzione elettrica nei semiconduttori

16

### Semiconduttori – drogaggio p

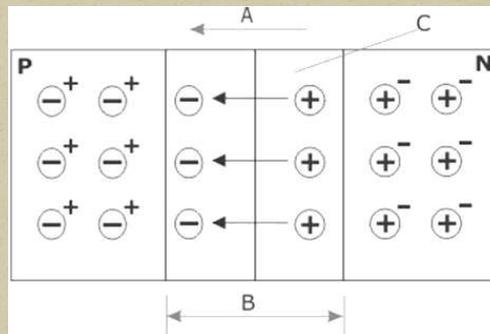
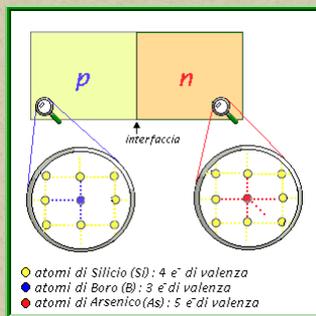


Per creare una lacuna, invece, utilizziamo un atomo *trivalente* del III gruppo, come il boro, l'alluminio o il gallio.

In questo caso 3 elettroni formeranno legami covalenti col silicio ma rimane un "posto" vuoto, una *lacuna*.

### Semiconduttori – giunzione p-n

Ora poniamo a contatto due cristalli di silicio con diverso drogaggio; avremo quella che si chiama *giunzione p-n*. Questa particolare configurazione cambia la risposta del materiale all'applicazione di un campo elettrico.

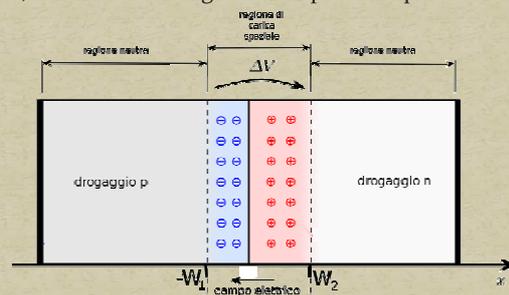


## Semiconduttori – giunzione p-n

Ponendo in contatto un semiconduttore di tipo p con uno di tipo n, le lacune del primo tendono a fluire nel secondo, e viceversa gli elettroni liberi del semiconduttore di tipo n invadono il semiconduttore di tipo p.

Gli elettroni liberi e le lacune in vicinanza della giunzione, si ricombinano con le loro controparti lasciando così ionizzati gli strati adiacenti di materiale: negativamente dalla parte del semiconduttore di tipo p, positivamente dalla parte del semiconduttore di tipo n.

Si genera perciò un campo elettrico che si oppone ad un ulteriore scambio di portatori di carica. Appena l'intensità del campo elettrico è tale da contrastare la diffusione dei portatori di carica, si instaura nella giunzione p-n un equilibrio stabile.



La conduzione elettrica nei semiconduttori

19

## Semiconduttori – il diodo

Applicando una differenza di potenziale ai capi del semiconduttore, ad esempio tramite un generatore di tensione abbiamo due possibili configurazioni:

1) Applicando una tensione  $V$  con il morsetto negativo alla zona p e con il morsetto positivo alla zona n, si ha una polarizzazione inversa. La presenza di questa tensione provoca un aumento della barriera di potenziale in quanto si crea un campo elettrico esterno diretto nello stesso verso di quello interno. Gli elettroni dal lato n e le lacune dal lato p, sono impediti ad attraversare la barriera; non c'è passaggio di corrente.

La conduzione elettrica nei semiconduttori

20

### Semiconduttori – il diodo

Polarizzazione inversa:

$I \approx 0$

La conduzione elettrica nei semiconduttori

21

### Semiconduttori – il diodo

2) Colleghiamo ora il cristallo con il positivo del generatore sul materiale **p**, ed il negativo su quello **n**. tale polarizzazione prende il nome di *polarizzazione diretta*. In questo caso gli elettroni presenti nella barriera vengono attirati dal positivo del generatore, così come le lacune vengono 'attirate' dal negativo del generatore (posto su **n**) 'annullando' virtualmente il campo elettrico della zona di svuotamento e creando così la circolazione della corrente apportata dal generatore attraverso il materiale.

In questa configurazione, il semiconduttore **permette il passaggio della corrente** e si comporta quasi come un componente lineare, cioè una comune resistenza ohmica

La conduzione elettrica nei semiconduttori

22

### Semiconduttori – il diodo

*Polarizzazione diretta:*

La conduzione elettrica nei semiconduttori

23

### Semiconduttori – il diodo

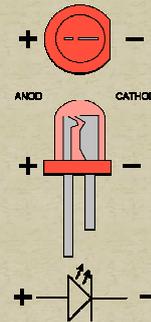
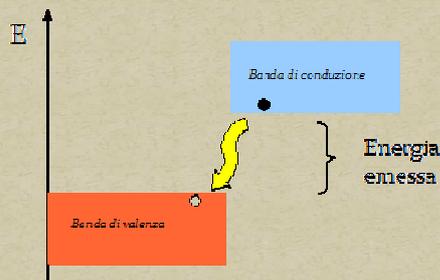
Abbiamo quindi ottenuto un particolare componente dotato di una straordinaria capacità: quella di condurre corrente se polarizzato direttamente e di non condurla se polarizzato invece inversamente. Questo componente prende il nome di **diodo a semiconduttore**.

La conduzione elettrica nei semiconduttori

24

## Il diodo LED

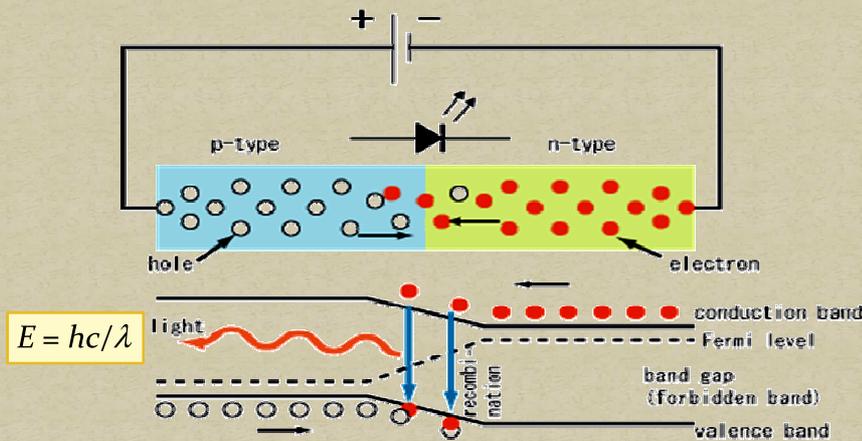
Consideriamo una giunzione p-n e polarizziamola direttamente, in modo tale da abbattere la barriera di potenziale e permettere il passaggio della corrente. In questo modo, alla giunzione, avremo una *ricombinazione* fra elettroni e lacune. Questo fenomeno sarà accompagnato da una emissione di energia, in quanto l'elettrone appartenente alla banda di conduzione (e quindi di energia più alta) andrà ad occupare un "posto vuoto" nella banda di valenza, che si trova ad un livello energetico più basso.



La conduzione elettrica nei semiconduttori

## Il diodo LED

Nei diodi detti LED (Light Emitting Diode), questa energia è liberata sotto forma di *fotoni* i quali, a seconda del materiale utilizzato (e quindi del rispettivo energy gap) possono avere una lunghezza d'onda appartenente allo spettro del visibile.

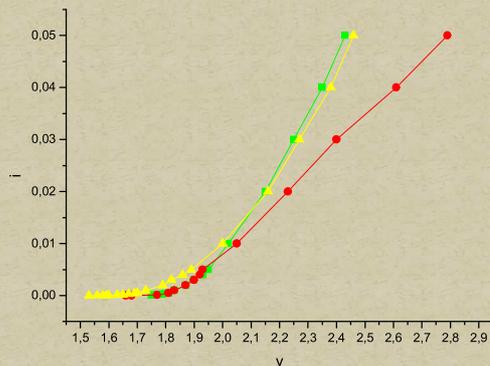


La conduzione elettrica nei semiconduttori

## Il diodo LED

L'esatta scelta dei semiconduttori determina la lunghezza d'onda dell'emissione di picco dei fotoni (il colore), l'efficienza nella conversione elettro-ottica e quindi l'intensità luminosa in uscita.

Materiale	Colore
AlGaAs	rosso ed infrarosso
GaAlP	verde
GaAsP	rosso, arancione, giallo
InGaN	blu-verde
GaP	rosso, giallo, verde
InGaAlP	rosso-arancione, giallo
Diamante (Carbonio)	ultravioletto



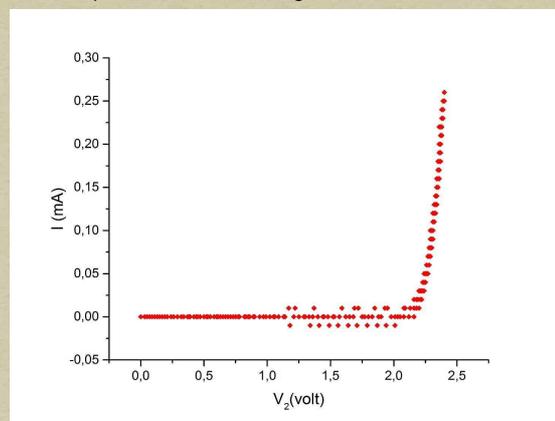
La conduzione elettrica nei semiconduttori

27

### Analisi della caratteristica V-I del LED

#### Scopo dell'esperimento

Obiettivo dell'esperienza è realizzare un esperimento con acquisizione dati automatizzata via Arduino finalizzato a registrare la curva caratteristica V-I di un LED a giunzione p-n in arseniuro di gallio.



28

