

Progetto Lauree scientifiche 2020

Misura delle proprietà elettriche di metalli e semiconduttori.

Lo scopo di questo esperimento è lo studio dell'andamento della resistenza in funzione della temperatura $R(T)$ in due campioni metallici e in un semiconduttore, in un intervallo di temperatura appropriato, per evidenziare i diversi comportamenti dei materiali.

Se colleghiamo le estremità di un filo **metallico** ai poli di una pila, si osserva che nel filo fluisce una corrente elettrica. Diamo una interpretazione del fenomeno in base al modello di struttura dei metalli. Quando la pila viene collegata, essa genera una differenza di potenziale e quindi un campo elettrico che fa muovere gli **elettroni di conduzione** in direzione opposta alle linee di forza. Quando viene collegata la pila, un moto ordinato in direzione opposta al campo elettrico, cioè verso il polo a potenziale maggiore, si sovrappone al moto caotico degli elettroni. Gli elettroni di conduzione si muovono ancora in tutte le direzioni, ma il moto in direzione opposta al campo elettrico è prevalente sul moto caotico. Si ottiene un effetto risultante di deriva in direzione opposta al campo elettrico. Inoltre, a causa dei continui urti con gli ioni del reticolo, il moto non è accelerato come accadrebbe nel vuoto, ma uniforme. La corrente elettrica nei conduttori solidi è dovuta al moto di deriva di cariche negative, cioè gli elettroni di conduzione, e quindi avviene da punti a basso potenziale verso punti ad alto potenziale. Misurando la differenza di potenziale ΔV tra due punti di un conduttore e la corrente elettrica I che in esso fluisce, si verifica sperimentalmente che tra queste due grandezze esiste una relazione di proporzionalità diretta

Il **legame metallico** è caratterizzato dalla presenza di elettroni distribuiti in modo uniforme in tutto lo spazio intorno ai nuclei degli atomi della sostanza; tali **elettroni**, detti **di conduzione**, sono liberi di muoversi in tutta la massa della sostanza.

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

Questa relazione prende il nome di **legge di Ohm**, in onore del fisico tedesco omonimo.

La legge di Ohm introduce una nuova grandezza fisica, la **resistenza elettrica**, che qualitativamente esprime l'ostacolo che un conduttore oppone al passaggio della corrente. L'unità di misura della resistenza elettrica è volt/ampere, che prende il nome di **ohm**. (simbolo Ω)

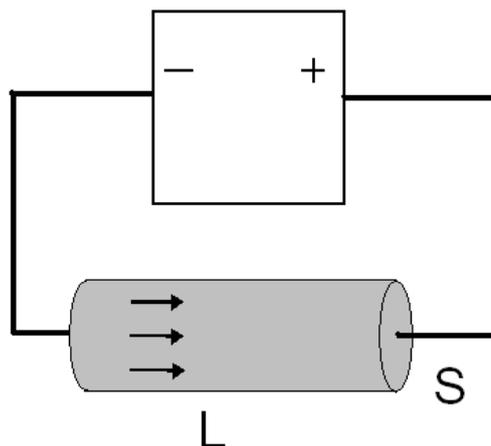
La resistenza elettrica è una caratteristica macroscopica di un conduttore e dipende da diversi fattori. Se infatti consideriamo un cilindro di metallo e colleghiamo le facce opposte ad una pila, si

osserva che la corrente che circola varia fortemente a seconda della sostanza, della sezione S e della lunghezza L . Sperimentalmente si verifica che la resistenza R è direttamente proporzionale alla lunghezza L ed inversamente proporzionale alla sezione S .

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

La grandezza ρ (lettera greca rho) prende il nome di **resistenza specifica** o **resistività** ed è caratteristica del conduttore, dipendente dalla sostanza di cui è fatto e dalla temperatura a cui si trova.

La relazione sperimentale può essere facilmente giustificata all'interno del modello a struttura microscopica dei metalli. Poiché la resistenza elettrica a livello microscopico è legata al numero di urti degli elettroni di conduzione con gli ioni del reticolo cristallino, è chiaro che uno stesso flusso di cariche trova un minor ostacolo se si muove in un conduttore di sezione ampia e che il numero di urti aumenta all'aumentare della lunghezza del conduttore. Inoltre, l'interpretazione microscopica della resistenza elettrica e della resistività ci conferma che esse aumentano all'aumentare della temperatura che induce infatti una crescita dell'ampiezza dei moti vibratori degli ioni reticolari, detta anche agitazione termica. In effetti, si osserva sperimentalmente che, per un limitato intervallo di temperature (200 K – 900 K) la resistività dipende linearmente dalla temperatura.



Il legame covalente rappresenta una condivisione di elettroni tra gli atomi di una specie chimica e può essere spiegata in base all'attrazione che il nucleo di un atomo esercita su gli elettroni degli altri atomi

Per i materiali semiconduttori il comportamento è diverso: a temperatura ambiente, infatti, vi sono pochi elettroni di conduzione perché gli elettroni più esterni di tali materiali sono elettroni di valenza, cioè servono a formare i **legami chimici** del reticolo cristallino. A temperatura nulla (0 K) nessun elettrone nel semiconduttore sarebbe libero di muoversi da un atomo all'altro, rendendo il semiconduttore un isolante perfetto. L'aumento di temperatura, in questo caso, provoca un effetto opposto a quello dei conduttori, in quanto l'agitazione termica provoca la rottura dei legami chimici (eccitazione termica), trasformando gli elettroni di

valenza in elettroni di conduzione. In definitiva, l'aumento della temperatura nei semiconduttori porta ad una diminuzione della resistività. Gli elettroni passati in conduzione hanno un'energia più elevata perché hanno rotto i legami che li vincolano ai loro atomi. Se viene applicata una differenza di potenziale, essi si dirigono verso il potenziale più alto, dando origine ad una corrente elettrica. Il posto lasciato vuoto vicino all'atomo si comporta esattamente come una particella con carica positiva che prende il nome di **lacuna**. Essa si sposta quando gli elettroni di valenza dell'atomo riempiono il posto lasciato vuoto dall'elettrone divenuto di conduzione e ciò induce un moto che avviene in senso inverso a quello degli elettroni. Nei semiconduttori, quindi, sono presenti due portatori di carica: quelli negativi (gli elettroni di conduzione) nella banda di conduzione (con energia più alta) e quelli positivi (lacune) nella banda di valenza (con energia più bassa). Aumentando la temperatura aumenta il numero degli elettroni in banda di conduzione e delle lacune in banda di valenza. Questo comportamento è detto **intrinseco**.

Si può aumentare la conducibilità dei semiconduttori con un operazione detta **drogaggio**.

Questo consiste nell'aggiungere impurità al cristallo.

Un drogaggio di tipo N (negativo) si ottiene quando si introducono impurità con un maggiore numero di elettroni di valenza rispetto alla sostanza che forma il cristallo. Un drogaggio di tipo P (positivo) si ottiene quando le impurità introdotte hanno un minore numero di elettroni di valenza.

Un **semiconduttore drogato N** si comporta come estrinseco o intrinseco, a seconda che predomini il processo di emissione di portatori di carica dagli atomi del drogante o il processo di eccitazione termica che trasforma elettroni di valenza in elettroni di conduzione. A temperature basse (regime **estrinseco**) la resistività è determinata essenzialmente dai portatori dovuti al drogante la cui concentrazione è costante al variare della temperatura, mentre il contributo intrinseco è trascurabile: il comportamento può essere assimilato a quello di un metallo.

Con la crescita della temperatura si raggiunge la condizione opposta (regime intrinseco) in cui il drogante ha effetto trascurabile e l'eccitazione termica dei portatori di carica ha un effetto

predominante.

I campioni sono posti dentro ad un cilindretto metallico: è possibile l'analisi di 3 campioni contemporaneamente, nel nostro caso due campioni metallici (rame e nickel) ed un campione semiconduttore (germanio). Il cilindretto metallico rappresenta una camera isoterma, cioè una camera in cui la temperatura è uniforme. Per variare la temperatura il sistema è dotato di un riscaldatore ad effetto Joule (una resistenza in cui viene fatta passare corrente e quindi scaldandosi riscalda la camera) e di un dito freddo immerso in un bagno di azoto liquido



Figura 1 Apparato sperimentale

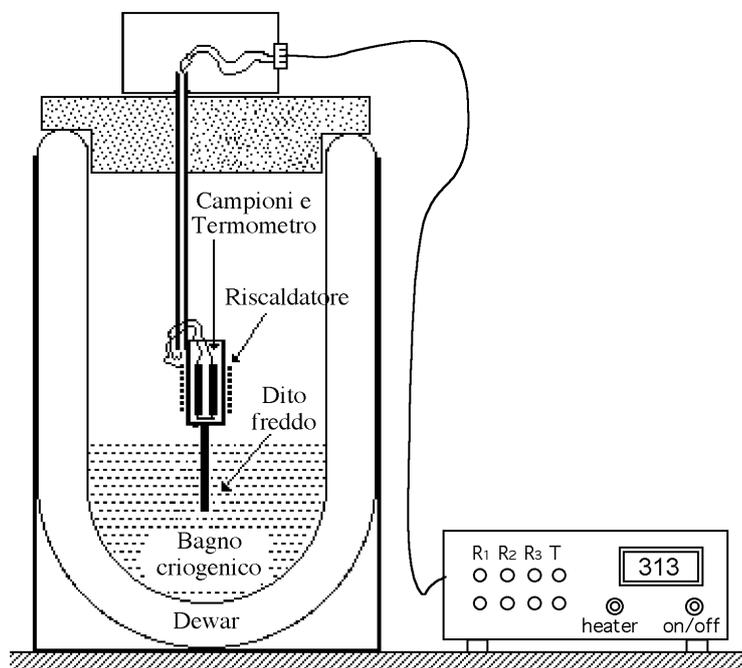


Figura 2 Set up sperimentale per le misure di R(T)

(una sbarra di metallo collegata alla camera raffredda la camera grazie alla bassa temperatura dell'azoto liquido). L'intervallo di temperature del sistema va da 80 K a 420 K. Tutto il sistema è contenuto in un *dewar* d'acciaio. La temperatura nella camera isoterma è misurata con un termometro a diodo e mostrata in gradi Kelvin su un visore a tre cifre sul frontale dell'unità di controllo. La resistenza dei tre campioni è misurata con il *metodo voltamperometrico a quattro terminali*: per ogni campione sono collegati quattro fili, di cui due servono per fornire una corrente costante e i restanti due per misurare la differenza di

potenziale, quindi la resistenza è ricavata tramite la legge di Ohm. I quattro segnali di tensione (3 provenienti dai campioni ed uno dal termometro) vengono amplificati all'interno dell'unità di controllo e quindi resi disponibili tramite quattro coppie di boccole presenti sul frontale dell'unità (le boccole nere sono tutte al potenziale comune di massa). I segnali di tensione vengono acquisiti direttamente da computer tramite l'interfaccia di acquisizione dati. La resistenza dei campioni può, inoltre, essere misurata tramite terminali posti nel portacampione utilizzando un multimetro digitale in modalità ohmetrica. Queste misure possono essere ripetute a diverse temperature per avere dei confronti con i dati che vengono raccolti da calcolatore.

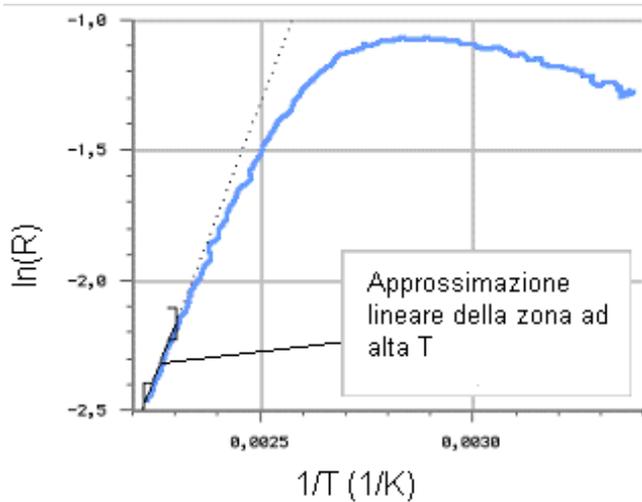


Figura 3 Esempio del grafico $\ln(R)$ vs $1/T$, da cui si ricava il valore del band gap

L'analisi dei dati raccolti si divide in tre parti: il confronto delle misure voltamperometriche a 2 e 4 terminali, il calcolo della resistività dei due metalli e il confronto del comportamento di questa grandezza nei due diversi materiali, ed infine l'analisi del comportamento del campione semiconduttore. Soprattutto ad alte temperature, nel regime intrinseco, l'andamento della resistenza in funzione della temperatura, rielaborate in maniera appropriata (mettere in grafico il logaritmo della resistenza in funzione dell'inverso della temperatura **Figura 3**), permette di ricavare il valore del **band gap** ossia la distanza energetica che intercorre tra banda di valenza e banda di conduzione.