

Effetti termici sulla conduzione elettrica in solidi conduttori e semiconduttori

Esperimento di termoresistenza con un campione di platino e un termistore NTC

Programma

- 1) Misurare i valori della resistenza elettrica R di un campione di **platino** e di un **termistore NTC** al variare della temperatura T ;
- 2) costruire le curve: R in funzione T e $\ln R$ in funzione di $1/T$;
- 3) determinare il coefficiente termico della resistenza (TCR) di entrambi i campioni;
- 3) stimare l'ampiezza dell'intervallo di energia proibita E_g nel termistore NTC.

Conduzione

Ci sono due importanti fattori che contribuiscono alla conduzione elettrica di un solido: la disponibilità di elettroni liberi (portatori di carica) e la possibilità di questi di muoversi in esso. La grandezza che caratterizza la "capacità" di condurre del solido, e quindi di sostenere una corrente elettrica in presenza di un campo elettrico, è rappresentata dalla sua conducibilità elettronica σ o dalla sua resistività ρ , essendo

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

La conducibilità è espressa come :

$$\sigma = nq\mu$$

dove n è la concentrazione di portatori di carica liberi (*intesa come numero elettroni per unità di volume*), q la carica dell'elettrone ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb), μ è la mobilità dei portatori stessi. Quest'ultima grandezza caratterizza la rapidità con cui un elettrone si muove in un mezzo conduttore o semiconduttore sotto un campo elettrico applicato. Essa è espressa in termini di velocità di deriva o di trascinamento egli elettroni per unità di campo elettrico applicato.

Conduttori

In un solido **metallico** l'aggregazione degli atomi che lo costituiscono si compie con l'indebolimento del legame di appartenenza al proprio nucleo di uno o più elettroni dell'orbita più esterna. Sono questi gli elettroni, di valenza, che nella formazione del solido, divengono liberi di muoversi entro il suo volume. La concentrazione n di elettroni liberi nel metallo è dell'ordine di $10^{23}/cm^3$ (nel rame $8,47 \cdot 10^{22}/cm^3$) e tutti partecipano al flusso orientato di cariche (la corrente elettrica I) quando agisce un campo elettrico a cui corrisponde tra due punti del conduttore una differenza di potenziale V .

In un conduttore metallico, il fattore che limita la conducibilità σ è determinato dalle vibrazioni reticolari, dipendenti dalla temperatura del mezzo materiale. Esse influenzano la conducibilità (o, ciò che è lo stesso, la resistività ρ) interagendo col flusso orientato degli elettroni liberi (diffusione, scattering).

La variazione della temperatura non ha effetti sulla concentrazione n dei portatori ma solo sulla loro mobilità μ , essendo questa il solo parametro che contribuisce alla variazione della resistività ρ e,

quindi, della sua resistenza R . Quest'ultima, come è noto, è legata alla geometria del conduttore dalla relazione:

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

con l ed S rispettivamente lunghezza ed area della sezione trasversale del conduttore.

In generale, la funzione che lega la resistività ρ alla temperatura T nei conduttori metallici può esprimersi come:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T + \beta T^2 + \gamma T^3 + \dots) \quad (1)$$

dove: ρ è la resistività del materiale alla temperatura T ; ρ_0 il suo valore alla temperatura di riferimento T_0 ; $\Delta T = T - T_0$; α, β, γ i coefficienti di temperatura della resistività del primo, secondo e terzo ordine rispettivamente.

Nella Figura (1) è riportata, come esempio, una rappresentazione grafica di questa funzione in termini della resistenza R al variare della temperatura entro un ampio intervallo. Essa evidenzia un andamento crescente di R all'aumentare della temperatura.

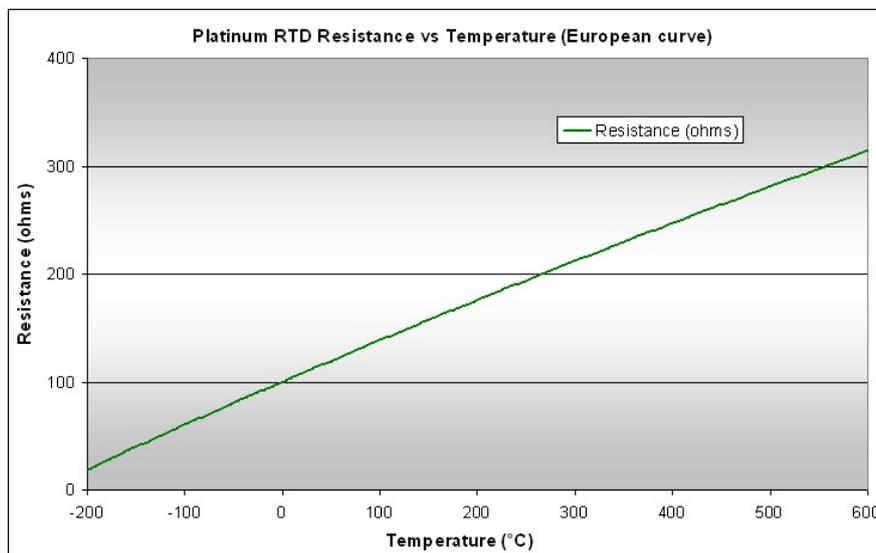


Fig. 1

Oltre a mostrare la forma assunta dalla dipendenza di R da T , dalla figura emerge che, su **ristretti** intervalli di temperatura ΔT , tale dipendenza si può confondere con un segmento di retta. Ciò implica che, in questi intervalli, i termini nella (1) di ordine superiore al primo si possono trascurare e supporre che la resistività ρ , e quindi la resistenza R , dipenda linearmente dalla temperatura secondo la relazione:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T)$$

dove α è il **coefficiente di temperatura della resistenza** o **TCR** (Temperature Coefficient of Resistance) che rappresenta un parametro, caratteristico di quel materiale conduttore, il cui valore ne quantifica la proprietà termoresistiva. Tale valore è positivo e si ottiene dalla seguente relazione

(2) nella quale compare la pendenza $\frac{\Delta R}{\Delta T}$ del tratto ettilineo della curva caratteristica:

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{R - R_0}{T - T_0} = \frac{1}{R_0} \frac{\Delta R}{\Delta T} \equiv TCR \quad (2)$$

Semiconduttori

Nei **semiconduttori** la conducibilità elettronica σ è influenzata dalla temperatura T sia attraverso la mobilità μ sia, soprattutto, tramite la concentrazione dei portatori liberi n . All'aumentare della temperatura, μ diminuisce, approssimativamente come nei conduttori metallici ($\mu \propto T^{-1,5}$), mentre la concentrazione n aumenta fortemente (in modo esponenziale) determinando un altrettanto forte aumento della conducibilità. Nella Figura (3), è riportata, in un diagramma logaritmico-lineare, una famiglia di curve che mostrano l'andamento della resistività in funzione della temperatura per semiconduttori tipici (silicio, germanio, ecc..) e per un conduttore di platino. La figura mostra inoltre come tale andamento indichi, per i due tipi di materiale, una variazione di resistività in senso opposto.

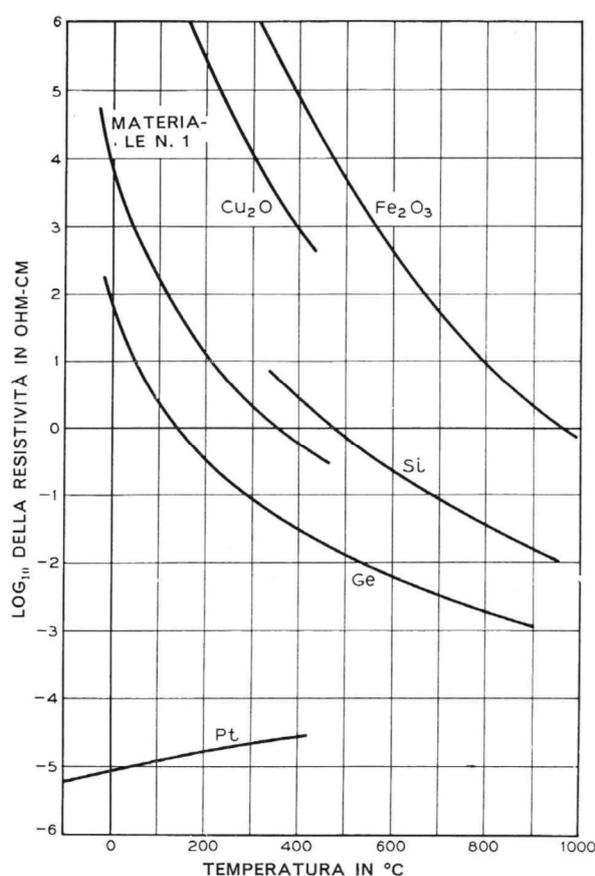


Fig. 3

All'aumentare della temperatura la resistività dei semiconduttori, indicati in figura, diminuisce, mentre quella del conduttore (platino) aumenta.

L'interpretazione di questo comportamento è basata sul modello a **bande di energia** che permette di spiegare le proprietà di conduzione dei solidi in termini di occupazione di livelli energetici degli elettroni.

Richiami sul modello a bande di energia e significato da attribuire alla stima, per via sperimentale, del "gap energetico" del termistore NTC.

La **meccanica quantistica** dimostra che quando gli atomi isolati si uniscono per formare il solido cristallino la struttura dei livelli energetici degli elettroni più esterni di ciascun atomo viene drasticamente modificata. Avvicinando due atomi identici, i livelli energetici più interni (vicini al nucleo) vengono pochissimo perturbati dalle normali forze interatomiche. Invece, i livelli energetici più esterni di ogni atomo interagiscono fortemente uno con l'altro.

*Al posto dei livelli energetici, presenti e nettamente distinti nell'atomo isolato, l'aggregazione degli atomi nella costituzione della fase solida porta alla formazione di una fitta **banda** di livelli energetici a cui corrispondono stati elettronici delocalizzati.*

Quando N atomi isolati si aggregano nel solido ogni livello energetico originale dell'atomo si divide in N differenti livelli vicinissimi, formando una banda di livelli energetici che potrà alloggiare fino a N elettroni. Un elettrone che occupa uno dei livelli della banda non è più vincolato ad un atomo ma è condiviso da diversi atomi, tra loro legati, del solido cristallino.

*Come nel caso dei livelli energetici di un singolo atomo, le bande possono essere separate tra di loro da un intervallo di energia in cui gli elettroni, anche nel solido cristallino, non possono stare per regole quanto-meccaniche (**intervallo di energia proibita o energy gap E_g**), oppure venire a contatto con le bande contigue creando bande ancora più larghe.*

*Sono proprio gli elettroni della banda, chiamata **banda di valenza**, che, non essendo confinati all'interno di un singolo atomo, possono contribuire alla conduzione elettrica.*

Al di sotto della banda di valenza ma, in genere anche al di sopra, si ha la formazione di altre bande di energia separate l'una dall'altra da intervalli (gaps) proibiti di energia.

*La banda immediatamente superiore a quella di valenza è chiamata **banda di conduzione** e alla temperatura dello zero assoluto essa è una banda vuota (effettivamente alla temperatura di zero gradi Kelvin tutti gli elettroni stanno nella banda di valenza e nessuno nella banda di conduzione). Ad ogni temperatura al di sopra dello zero assoluto è presente nella banda di conduzione un piccolo numero di elettroni che provengono dai livelli superiori della banda di valenza dai quali sono portati via attraverso un processo di trasferimento termico.*

Ad ogni temperatura gli atomi di un solido vibrano, come già accennato, intorno alle loro posizioni di equilibrio nel reticolo cristallino e la vibrazione è tanto più energica quanto più la temperatura è elevata. Una parte di questa energia può essere impartita a un elettrone, che così è in grado di saltare dalla banda piena (di valenza) alla banda (vuota) di conduzione. Il processo implica la presenza, in ogni istante, di un certo numero di elettroni nella banda di conduzione, numero che aumenta esponenzialmente all'aumentare della temperatura.

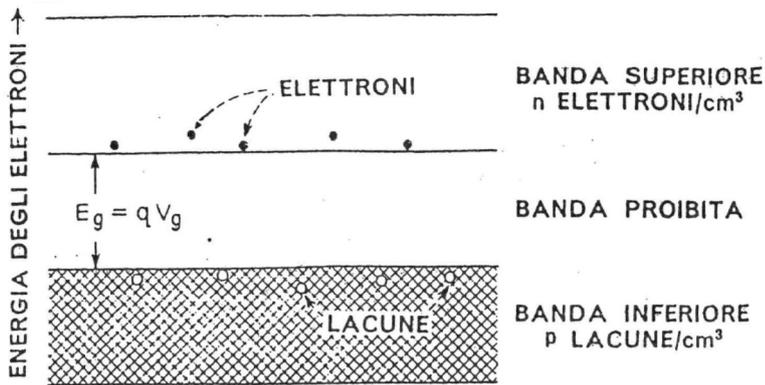
*Quando degli elettroni sono trasferiti da una banda all'altra, in quella di valenza, rimangono degli stati energetici vuoti chiamati **lacune** (o mancanze di elettroni). Benché le lacune non siano in effetti delle vere entità fisiche (anzi rappresentano "una assenza di elettroni" in certi stati energetici), si può mostrare che esse hanno un comportamento molto simile a quello di particelle cariche positivamente e che sono usualmente trattate come se fossero vere particelle.*

*Il processo di trasferimento elettronico prende il nome di **attivazione termica**; esso comporta una piccola percentuale di riempimento della banda di conduzione e di svuotamento della banda di valenza e quindi una limitata conducibilità in entrambe le bande.*

Gli elettroni e le lacune, come particelle cariche, possono pertanto essere accelerate da un campo elettrico e fungere da portatori di corrente.

Il numero di lacune nella banda inferiore di valenza è uguale al numero di elettroni nella banda immediatamente superiore e la corrente di conduzione nel solido è dovuta al movimento dei portatori dei due tipi (Fig. 3).

*Il meccanismo descritto rappresenta la **conduzione intrinseca** che si osserva in un solido sufficientemente **puro** dove gli effetti dovuti alle impurezze possono essere trascurati, oppure che si trovi a temperatura così elevata, che quegli effetti sono più piccoli di quelli attribuibili al meccanismo intrinseco*



L'attivazione termica mantiene una concentrazione di elettroni liberi (n) e di lacune (p) in un semiconduttore intrinseco (puro).

Fig. 3

Il numero n di elettroni per unità di volume trasferiti nella banda di conduzione dipende dalla temperatura T del solido e dal salto energetico (gap) E_g tra le due bande. Tale numero è proporzionale all'eponenziale:

$$n \sim e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad \text{oppure} \quad n \sim e^{-\frac{qV_g}{2kT}}$$

dove q rappresenta la carica dell'elettrone ($1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb), k la costante di Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ joule / K) e qV_g il gap energetico E_g in eV.

*Gli elettroni attivati in questo modo nella banda di conduzione hanno una vita breve (dell'ordine di qualche microsecondo) e si ricombinano con le lacune, positive, nella banda inferiore di valenza. Il numero n risulta in realtà da un equilibrio tra i due processi competitivi di **attivazione termica** e **ricombinazione** che procedono entrambi con la stessa velocità.*

Sulla base del modello a bande di energia la conduzione elettrica è un fenomeno che può avere luogo solo in bande che siano parzialmente piene o parzialmente vuote.

Riferendoci ai casi più semplici, se la banda di valenza è parzialmente occupata, di modo che vi siano in essa livelli energetici superiori liberi, disponibili per gli elettroni, il solido è un conduttore. Nei conduttori metallici la banda di valenza si sovrappone, o è molto vicina, in energia a quella di conduzione e gli elettroni possono occupare facilmente uno qualsiasi dei livelli non occupati. C'è così un'abbondanza di elettroni, liberi di muoversi, che rende i metalli ottimi conduttori di corrente.

Se, invece, la banda di valenza è completamente occupata (banda piena di elettroni), il solido può essere un semiconduttore o un isolante a seconda dell'ampiezza del gap energetico E_g .

In particolare, alla temperatura T , il solido è un semiconduttore se l'ampiezza E_g del gap è confrontabile o non molto più grande dell'energia termica kT . Per questo tipo di mezzo E_g è minore di 2 eV. In esso il moto di agitazione termica del reticolo cristallino permette ad un certo numero di elettroni di passare nella banda superiore di conduzione, in cui gli elettroni sono liberi di muoversi, e rispondere ad un campo elettrico. Il loro numero, nell'ipotesi che non vengano somministrate al solido altre forme di energia, è l'effetto del fenomeno di attivazione termica. La presenza di un campo elettrico determina un moto di deriva (o di trascinamento) degli elettroni e delle lacune lungo la sua direzione, e questo dà luogo alla corrente elettrica.

Il solido è un isolante se E_g è molto maggiore di kT ; la banda di valenza, tutta occupata, è molto distante (in energia) dalla banda di conduzione. Gli elettroni non possono partecipare al meccanismo di conduzione perché non esistono livelli energetici liberi nei quali un campo elettrico possa trasferirli. E' necessario fornire energia pari, almeno ad E_g , affinché un elettrone passi dalla banda di valenza a quella di conduzione dove sarebbe libero da vincoli quanto-meccanici. Questa energia negli isolanti è ben maggiore di quella termica kT per cui il passaggio è altamente

improbabile (ad esempio, nel diamante $E_g \cong 6 \text{ eV}$). In termini di legami tra gli atomi costituenti il solido, gli isolanti sono interessati da legami tanto forti che difficilmente vengono rotti per mettere in libertà un elettrone che possa trasportare corrente.

In Figura 4 è riportato uno schema a bande semplificato e ridotto per i tre tipi di mezzo materiale.

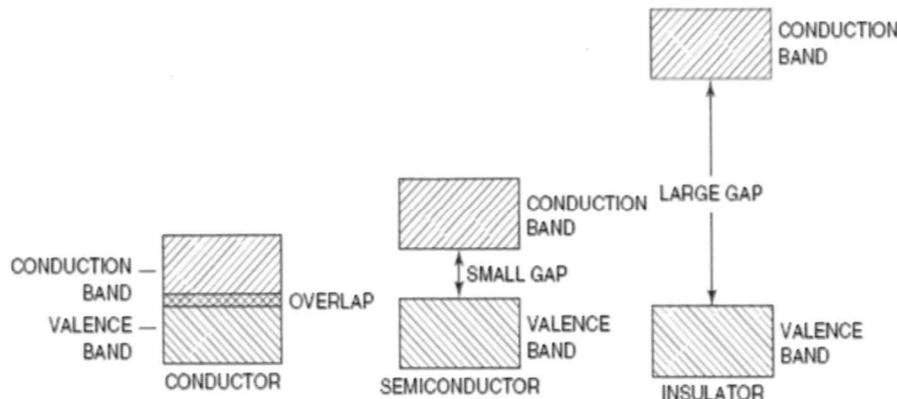


Fig. 4
 Schema a bande di energia:
 (a sinistra) un conduttore (inesistenza del gap energetico);
 (al centro) un semiconduttore (ampiezza del gap piccola, inferiore a 2 eV);
 (a destra) un isolante (ampiezza maggiore di 2 eV)

Termistori NTC

Per stimare la conducibilità elettrica σ di un materiale si usa la relazione: $\sigma = nq\mu$ che evidenzia come questa grandezza dipenda dalla concentrazione dei portatori liberi cioè da quelli in grado di portare corrente. Nei semiconduttori tale concentrazione aumenta al crescere della temperatura mentre la mobilità μ diminuisce (come nei conduttori) a causa dell'aumentata ampiezza delle vibrazioni reticolari che ostacolano il flusso orientato di elettroni indotto dalla presenza di un campo elettrico. Quest'ultimo effetto però, nei semiconduttori, è completamente sommerso dalla crescita esponenziale del numero di elettroni liberi disponibili e ciò determina un aumento di conducibilità (o una diminuzione di resistività ρ) al crescere della temperatura. E' questo un fenomeno caratteristico di tutte le sostanze che hanno un gap nella loro struttura a bande di energia.

La resistività in funzione della temperatura è ben rappresentata dalla relazione:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{nq\mu} = \frac{1}{n_i e^{-\frac{E_g}{2kT}} q\mu} = \frac{1}{n_i q\mu} e^{\frac{E_g}{2kT}}$$

dove n_i è la concentrazione (intrinseca) di portatori del semiconduttore puro (non drogato). (Nel silicio cristallino, ad esempio, n_i è dell'ordine di 10^{15} elettroni per cm^3 alla temperatura ambiente di 300 K).

Passando ai logaritmi naturali si ottiene:

$$\ln(\rho) = \ln\left(\frac{1}{n_i q \mu}\right) + \frac{E_g}{2k} \cdot \frac{1}{T}$$

da cui si evince che $\ln(\rho)$ è linearmente dipendente da $\frac{1}{T}$ e che la relazione è rappresentata da una retta in un diagramma cartesiano che riporta in ascisse $1/T$ e in ordinate $\ln(\rho)$. La pendenza di questa retta fornisce un dato utile per risalire al valore del gap energetico E_g di quel semiconduttore.

I **termistori NTC** sono dei resistori termicamente sensibili il cui coefficiente di temperatura della resistenza (TCR) è negativo. NTC, appunto, è la contrazione di: *Negative Temperature Coefficient*. Sono dispositivi costituiti da materiali semiconduttori che utilizzano la dipendenza delle loro proprietà dalla temperatura. Questi materiali sono usualmente basati su miscele di ossidi di metalli di transizione che quando sono adeguatamente preparati deviano dalla stechiometria in maniera attentamente controllata. Quelli più comunemente impiegati nella realizzazione di un termistore sono ossidi di manganese, rame, nickel, cobalto e zinco opportunamente miscelati. La loro resistività ρ dipende dal gap energetico E_g il cui valore può essere variato miscelando opportunamente i diversi ossidi. Inoltre, ρ dipende dalla concentrazione dei portatori liberi n forniti dalla deviazione dalla stechiometria. La legge di variazione della resistività dalla temperatura è

(usualmente) esponenziale e può essere espressa come: $\rho(T) = \rho_0 e^{\frac{E_g}{kT}}$ che può anche scriversi come:

$$\rho(T) = \rho_0 e^{\frac{B}{T}}$$

dove ρ_0 è la resistività estrapolata a temperatura infinita; B è la costante caratteristica del termistore:

$$B = \frac{E_g}{2k} \quad (*)$$

e il suo valore descrive il gradiente della curva R-T (cioè la variazione della resistenza R) su uno specifico range di temperatura, ed è determinato dal materiale che lo costituisce.

Se risulta difficile pensare alla temperatura infinita, al posto della relazione precedente si può usare la seguente:

$$\rho(T) = \rho_{T_0} e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

dove T_0 rappresenta una temperatura di riferimento (per esempio 273,15K) e ρ_{T_0} la resistività a quella temperatura.

Riscrivendo questa relazione rispetto alla resistenza R del termistore si ottiene:

$$R(T) = R_{T_0} e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} = R_{T_0} \frac{e^{\frac{B}{T}}}{e^{\frac{B}{T_0}}} = \frac{R_{T_0}}{e^{\frac{B}{T_0}}} e^{\frac{B}{T}} = \mathbf{A} e^{\frac{B}{T}} \quad (**)$$

dove: $\mathbf{A} = \frac{R_{T_0}}{e^{\frac{B}{T_0}}} = \text{costante}$.

In Figura (5) è mostrata, come esempio, la rappresentazione grafica della funzione (**). Essa mette in evidenza la diminuzione della resistenza elettrica del termistore all'aumentare della temperatura.

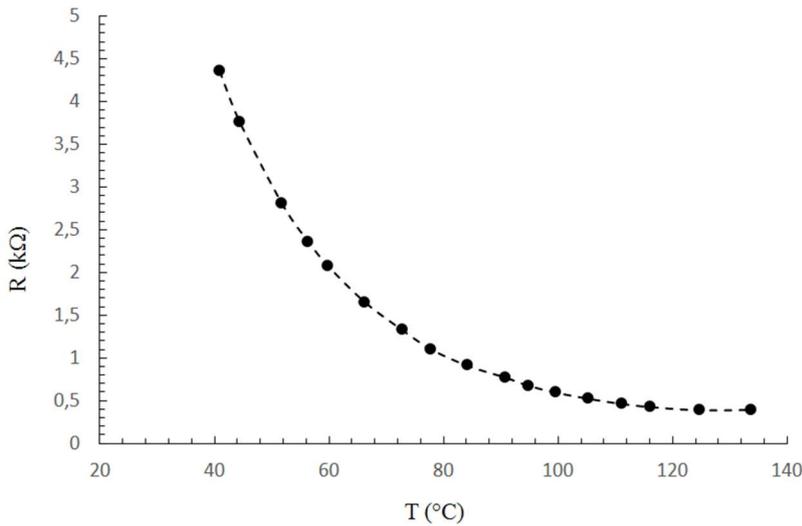


Fig. 5
 Caratteristica $R(T)$, in un diagramma lineare-lineare, di un termistore NTC. Si osservi che i punti neri, corrispondenti a valori di R e T misurati in un esperimento, approssimano bene l'andamento della curva teorica tratteggiata.

Passando ai logaritmi naturali nella relazione (**), si ottiene la seguente equazione lineare :

$$\ln(R) = \ln(A) + B\left(\frac{1}{T}\right) \quad (***)$$

la cui rappresentazione grafica è una retta nel diagramma cartesiano che riporta in ascisse l'inverso della temperatura assoluta $1/T$ e in ordinate $\ln(R)$ (Figura 6).

La pendenza di questa retta corrisponde al coefficiente B dell'equazione e dalla sua determinazione si può risalire al valore dell'energia E_g tramite la relazione (*).

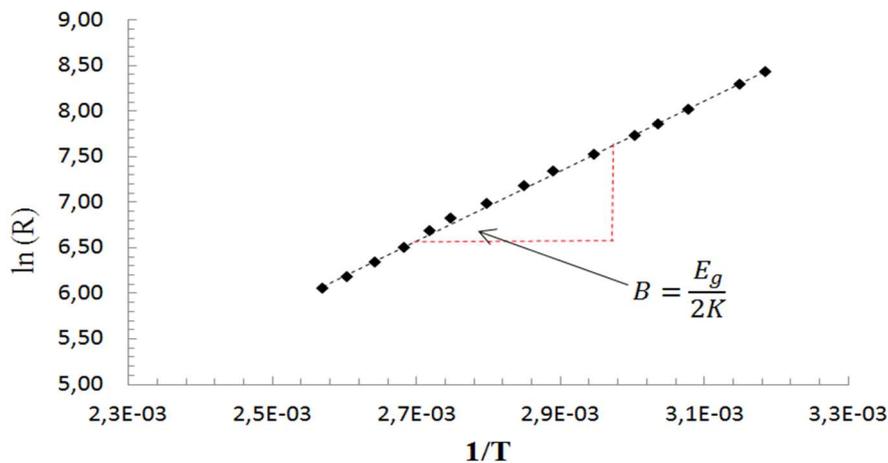


Fig. 6
 Diagramma logaritmico-lineare della funzione $R(T)$. In ascisse è riportato l'inverso della temperatura T (in gradi Kelvin) e in ordinate il logaritmo naturale della resistenza.

Apparato sperimentale, misure e risultati

Per procedere alla misura dei valori di resistenza occorre portare i campioni a varie temperature e rilevare sia l'indicazione di un multimetro digitale, selezionando in esso la funzione "ohm", sia quella della temperatura alla quale si trovano i campioni stessi.

L'apparato sperimentale complessivo è riportato nella seguente Figura 7 dove sono visibili:

- 1) **camera climatica** - consente di creare un ambiente in cui mantenere in forma stabile un valore qualunque di temperatura entro un prescelto intervallo: nel presente caso: dall'ambiente a 130°C ;
- 2) **multimetro** per la misura di resistenza;
- 3) **misuratore di temperatura**.

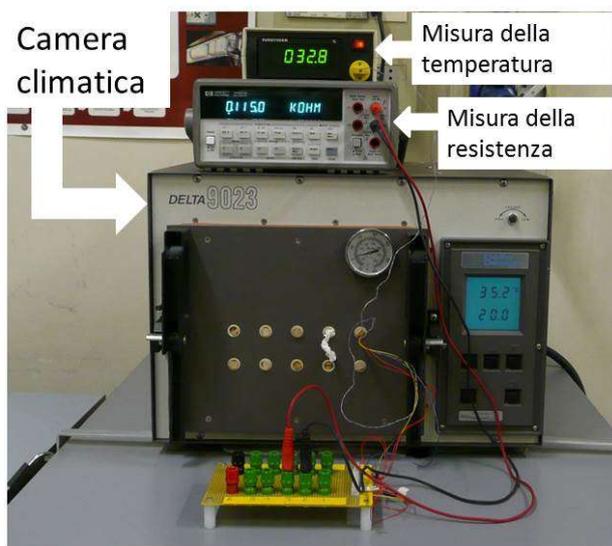


Fig. 7

Apparato di misura
E' composto da:
a) una camera climatica per impostare e mantenere un qualunque valore di temperatura al suo interno;
b) una strumentazione dedicata alla misura di resistenza e di temperatura;
c) collegamenti elettrici fra l'interno e l'esterno della camera climatica.

La Figura 8 mostra i campioni usati nell'esperimento: il conduttore metallico (PT 100) e il semiconduttore (termistore NTC).

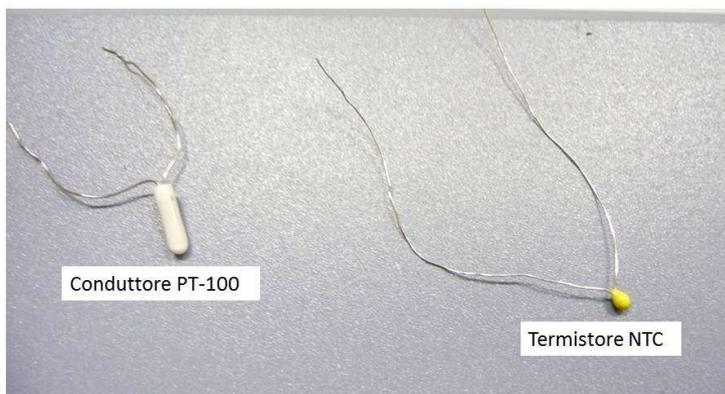


Fig. 8

I campioni che sono stati inseriti all'interno della camera climatica.

I valori delle resistenze dei due campioni sono misurati, nel corso dell'esperimento, dallo strumento multimetrico impostato sulla funzione: 2Ω . Quelli delle temperature corrispondenti, sono visualizzati sul display di un "misuratore di temperatura" che riceve l'informazione da un sensore termoelettrico (termocoppia) collocato all'interno della camera climatica in prossimità dei campioni. I valori misurati vanno inseriti in una tabella ed elaborati al fine di ottenerne una rappresentazione grafica.

Per il conduttore, la distribuzione dei punti sperimentali approssima un segmento di retta di cui va rilevata la pendenza: $\frac{\Delta R}{\Delta T} = \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1}$ e da questa determinato il valore del coefficiente di temperatura della resistenza α (TCR):

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{\Delta R}{\Delta T}.$$

Per il termistore NTC il grafico interessante è quello che, nel piano cartesiano, riporta in ascisse l'inverso della temperatura assoluta, $\frac{1}{T}$, (T espressa in gradi Kelvin) e in ordinate il logaritmo naturale di R. La distribuzione risultante dei punti sperimentali approssima la rappresentazione grafica dell'equazione di una retta la cui espressione analitica è quella della relazione (***) il cui coefficiente angolare è B. Il suo valore può dedursi agevolmente dal grafico stesso tramite la determinazione della sua pendenza:

$$\frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}.$$

Considerando che B è espresso dalla relazione (*), da essa si ricava il valore del gap energetico E_g del termistore NTC.

Per quanto attiene al coefficiente di temperatura del termistore NTC, β , esso è definito come:

$$\beta = \frac{dR}{dT} = \frac{d}{dT} \left[R_{T_0} e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \right] = - \frac{B}{T^2} \equiv \text{TCR}$$

Questa relazione evidenzia come il suo valore non sia costante entro un dato intervallo ΔT di temperatura. Esso cambia, infatti, ad ogni valore di T, diversamente da ciò che accade per il conduttore entro lo stesso intervallo termico. Ciò si constata direttamente osservando che la pendenza del grafico R(T), costruito come quello mostrato in Figura 5, varia proprio continuamente con la temperatura

Mettendo a confronto i due coefficienti termici α e β (TCR), rispettivamente per il conduttore e il termistore, si traggono alcune conclusioni riguardanti gli andamenti della resistenza R in funzione di T, l'ammontare dei rispettivi valori ad una stessa temperatura e il loro segno.

Tabelle dati

per il conduttore

t ($^{\circ}\text{C}$)	<i>PT-100</i> R (Ω)

per il semiconduttore

t ($^{\circ}\text{C}$)	<i>termistore</i> R ($k\Omega$)	T (K) $T=t+273,15$)	$1/T$	$\ln R$