

Costruzione della caratteristica di un diodo e Misura Sperimentale della Costante di Boltzmann

Introduzione

L'esperienza di laboratorio si propone di determinare in via sperimentale attraverso la misura della tensione e della corrente che attraversa un diodo alimentato in polarizzazione diretta un valore approssimato della costante di Boltzmann attraverso la determinazione del coefficiente angolare della retta che deriva dalla proporzionalità tra la corrente e l'emissione di elettroni di una superficie metallica che viene riscaldata (emissione termoionica)

$$i \propto e^{-\frac{e\Delta V}{kBT}} \quad (1)$$

ricavata dalla legge Richardson-Fermi

$$J = AT^2 e^{-\frac{E}{kBT}}$$

dove :

J la densità di corrente emessa dal materiale ovvero numero di elettroni emessi per unità di superficie e di tempo misurata in A/m^2

A costante di Richardson (detta anche "costante di emissione termoionica")

kB costante di Boltzmann $1.380649 \cdot 10^{-23} J/K$

E energia minima necessaria per estrarre un elettrone dal metallo $\rightarrow E = e\Delta V$

T temperatura espressa in Kelvin

Applicando i logaritmi alla (1) e rappresentando i valori calcolati in un grafico semilogaritmico si ottiene una retta

$$y = mx + q$$

in cui il coefficiente angolare della retta è :

$$m = -\frac{e}{kBT}$$

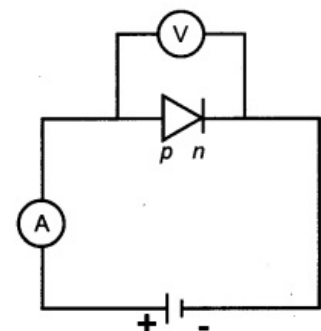
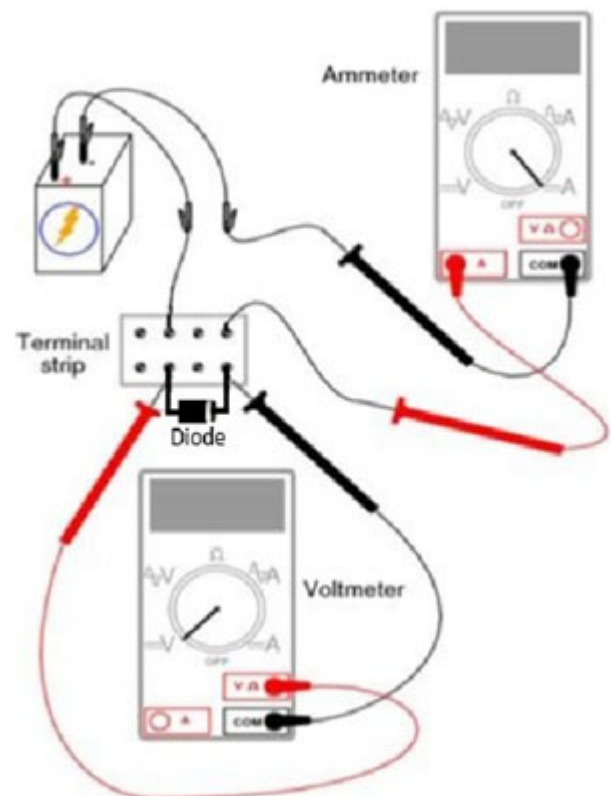
e : carica dell'elettrone $-1,602 \cdot 10^{-19} C$

Dalla formula inversa si ricava il valore sperimentale della costante di Boltzmann

$$kB = -\frac{e}{mT}$$

da confrontare con il valore teorico

$$Kb = \text{costante di Boltzmann} = 1.380649 \cdot 10^{-23} J/K$$



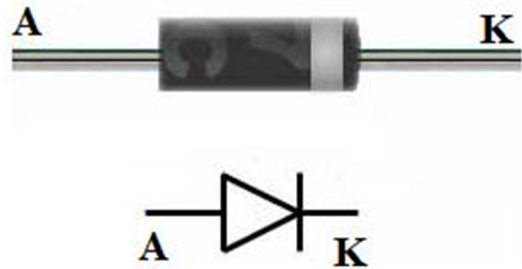
Elenco dei Materiali e degli Strumenti impiegati

Elenco dei materiali usati in laboratorio per le esperienze con i diodi

Alimentatore 12V – 2A corrente continua



Diodo



Multimetro impostato come amperometro
sensibilità 10 A



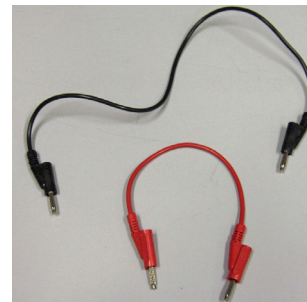
Multimetro impostato come voltmetro
sensibilità 20 V



Cavo a coccodrillo



Cavetti a banana



termometro

Introduzione Teorica Generale

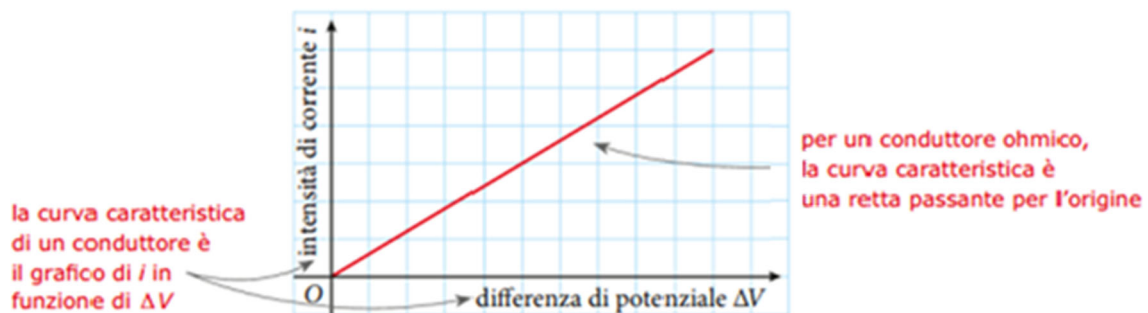
Introduzione

I materiali si distinguono in conduttori, semiconduttori e isolanti in base al loro comportamento elettrico, determinato dalla disposizione degli elettroni negli orbitali energetici.

- Conduttori: La banda di valenza e la banda di conduzione sono sovrapposte, permettendo il libero movimento degli elettroni e quindi la conduzione elettrica.
- Isolanti: Esiste un ampio gap energetico tra la banda di valenza e quella di conduzione, impedendo il passaggio degli elettroni e quindi la conduzione.
- Semiconduttori: Hanno un gap energetico ridotto, che può essere superato fornendo energia (es. calore o fotoni). Un esempio è il silicio, che forma legami covalenti e può diventare conduttivo se stimolato.

I semiconduttori sono fondamentali nell'elettronica, poiché permettono di controllare il flusso di corrente in dispositivi come i transistor e i microchip.

Il fisico tedesco Georg Simon Ohm (1789-1854) verificò per via sperimentale che per un'ampia classe di conduttori, che comprende i metalli e le soluzioni di acidi, basi e sali, la curva caratteristica è una retta passante per l'origine. Dal suo nome, i conduttori di questo tipo sono detti conduttori ohmici

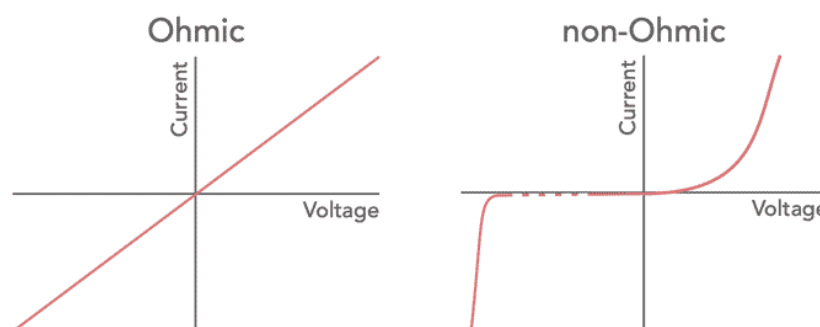


Come mostra la curva caratteristica, la relazione sperimentale tra i e ΔV che vale per i metalli e per gli altri conduttori ohmici è una **proporzionalità diretta**.

Conduttori Ohmici e non Ohmici

I componenti che hanno una linea lineare o rettilineo e seguono la legge Ohm e sono conosciuti come conduttori Ohmici. Tuttavia, non tutti i componenti elettronici elettrici hanno un grafico a linea retta per tensione e corrente. Per una serie di motivi possono avere una diversa caratteristica di rapporto tra la tensione e corrente. Questi conduttori sono spesso detti non-Ohmici.

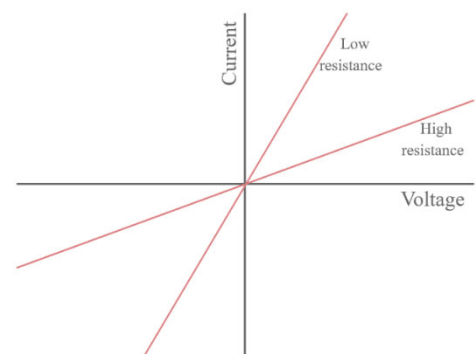
I conduttori ohmici possono anche essere chiamati componenti elettronici lineari, mentre gli altri non sono lineari in quanto non hanno una relazione lineare tra tensione e corrente.



I conduttori ohmici sono quei conduttori elettrici che seguono la legge Ohm. In altre parole c'è una relazione lineare tra tensione e corrente per tutti i valori

I metalli, il carbonio e molte leghe metalliche rientrano nella categoria dei conduttori Ohmici.

Se la tensione e la corrente per un componente elettrico o elettronico sono riportate in un grafico un componente a bassa resistenza avrà una linea molto più bassa e un dispositivo di resistenza più elevata avrà una linea molto più ripida sul grafico del conduttore Ohmici.



Conduttori non ohmici e componenti elettronici

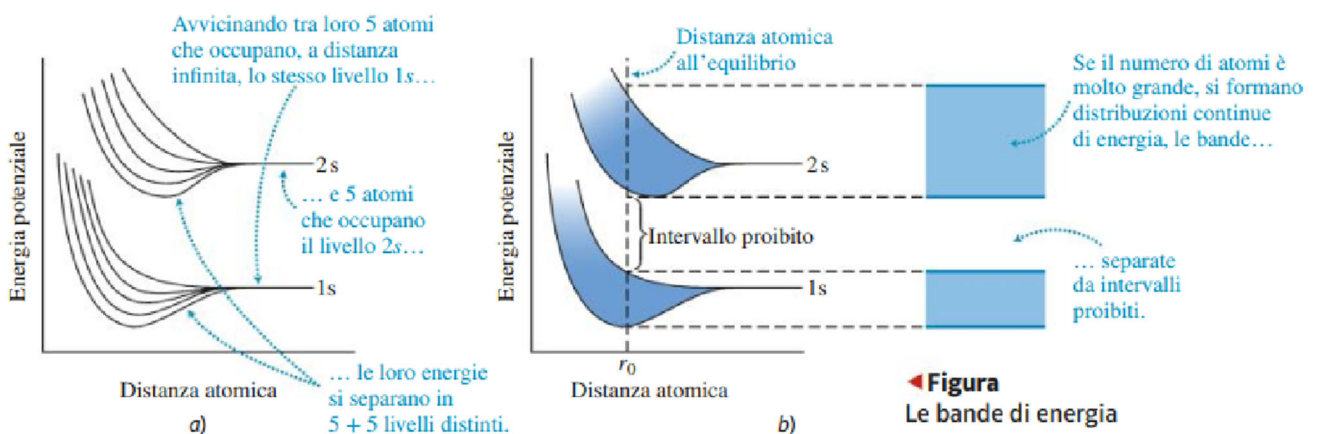
I conduttori non-Ohmici sono quei conduttori elettrici che non seguono la legge Ohm ovvero la relazione tra tensione e corrente non è lineare per tutti i valori. Il diverso comportamento elettrico è dovuto dalla differente struttura atomica dei materiali

Bande di energia

Secondo la teoria della meccanica quantistica l'energia degli atomi è quantizzata, cioè gli elettroni possono occupare solo livelli energetici discreti. Tuttavia, in un solido gli atomi sono molto vicini tra loro, e le loro orbite elettroniche si sovrappongono, creando bande di energia al posto di livelli discreti. Quando gli atomi si avvicinano:

- I livelli energetici si sdoppiano e si avvicinano, formando una banda.
- Più atomi ci sono, più livelli si addensano fino a creare bande quasi continue.

Le bande di energia sono fondamentali per comprendere il comportamento elettronico dei materiali e derivano dalla teoria della meccanica quantistica applicata ai solidi. Le bande di energia sono regioni di energia in cui possono trovarsi gli elettroni di un solido. Derivano dall'interazione tra gli atomi che formano il materiale e determinano il comportamento elettrico del solido stesso.



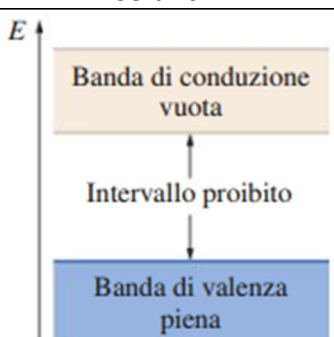
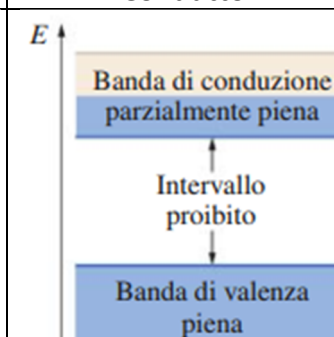
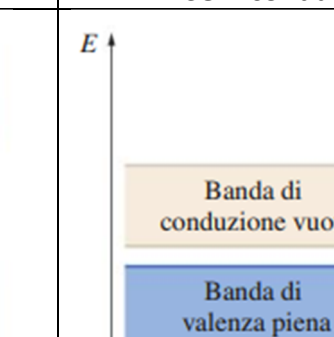
◀ **Figura**
Le bande di energia

Le principali bande di energia si dividono nelle seguenti categorie:

- **Banda di valenza:**
 - Contiene gli elettroni di valenza, quelli più esterni degli atomi.
 - È responsabile dei legami chimici tra gli atomi.
 - Negli isolanti e semiconduttori, è separata dalla banda di conduzione da un gap energetico.

- **Banda di conduzione:**
 - Contiene gli elettroni liberi che possono muoversi nel materiale.
 - È responsabile della conduzione elettrica.
 - Nei metalli è parzialmente occupata o sovrapposta alla banda di valenza, permettendo una conduzione facile.
- **Banda proibita (Gap energetico):**
 - È l'intervallo di energia tra la banda di valenza e la banda di conduzione.
 - Nei conduttori, è inesistente o molto piccolo.
 - Nei semiconduttori, è piccolo e può essere superato con energia esterna (luce, calore, elettricità).
 - Negli isolanti, è molto grande, impedendo il passaggio degli elettroni nella banda di conduzione.

La conducibilità elettrica è quindi determinata dalla struttura delle bande che qui si riassume:

| Comportamento nei diversi materiali | | |
|---|---|---|
| Isolanti | Conduttori | Semiconduttori |
|  <p>a) Isolante</p> |  <p>b) Conduttore</p> |  <p>c) Semiconduttore</p> |
| Banda proibita è ampia | Banda di valenza e conduzione si sovrappongono | Banda proibita è piccola |
| Gli elettroni non possono passare alla banda di conduzione | Gli elettroni si muovono facilmente | Serve energia esterna per la conduzione |
| La banda di conduzione è vuota e l'ampiezza intervallo proibito è > 5eV | La banda di conduzione è parzialmente occupata da elettroni | La banda di conduzione è vuota e l'ampiezza dell'intervallo proibito è relativamente basso circa 1eV ma può essere superato se gli elettroni possiedono la necessaria energia |

I Semiconduttori

I semiconduttori sono materiali che hanno una conducibilità elettrica intermedia tra conduttori (come i metalli) e isolanti e hanno un intervallo proibito tra la banda di valenza e la banda di conduzione relativamente basso. I semiconduttori più comuni sono il silicio (Si) e il germanio (Ge), utilizzati principalmente nell'elettronica per la produzione di transistor, diodi, circuiti integrati e celle solari. La loro conducibilità può essere modificata tramite l'applicazione di campi elettrici, magnetici, luce, temperatura oppure tramite aggiunta di impurità ovvero aggiunte di atomi di un altro elemento chimico (drogaggio)

La conducibilità dipende dalla temperatura e dalla presenza di impurità ed essi possono essere:

- Semiconduttori di tipo p (se hanno lacune, ovvero carenza di elettroni).
- Semiconduttori di tipo n (se hanno elettroni in eccesso)

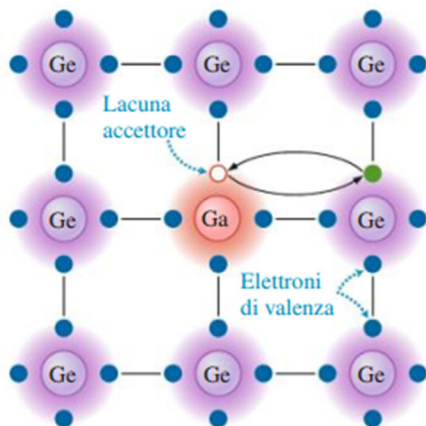
Portatori di carica nei semiconduttori

I portatori di carica sono le particelle responsabili del trasporto di corrente elettrica all'interno di un materiale conduttore o semiconduttore. Nei semiconduttori, esistono due tipi principali di portatori di carica:

- Lacune (cariche positive) : Sono le principali portatrici di carica nei semiconduttori di tipo p. Una lacuna è un'assenza di elettrone nella banda di valenza, che si comporta come una carica positiva mobile.
- Elettroni (cariche negative) : Sono i principali portatori di carica nei semiconduttori di tipo n. Si muovono liberamente nella banda di conduzione e trasportano corrente.

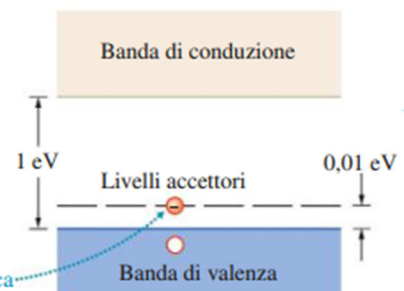
Semiconduttore di tipo p

Un semiconduttore di tipo *p* è un materiale in cui la conduzione elettrica avviene principalmente grazie alle lacune cioè la mancanza di elettroni. Si realizza drogando un semiconduttore puro (come il Silicio o il Germanio) con un elemento del Gruppo III della Tavola Periodica, come Boro (B), Alluminio (Al) o Gallio (Ga). Questi atomi hanno solo tre elettroni di valenza, quindi non riescono a completare tutti i legami covalenti nel reticolo cristallino. Questo crea delle lacune, che possono essere "riempite" dagli elettroni vicini, permettendo il movimento delle cariche nel materiale.



a) L'atomo accettore attrae un quarto elettrone da un atomo vicino.

L'elettrone attratto dall'accettore si colloca in un livello di energia al di sopra della banda di valenza.



b) Bande e livelli di energia.

| Semiconduttore | Intervallo proibito (eV) |
|----------------|--------------------------|
| Si | 1,12 |
| Ge | 0,67 |
| InAs | 0,35 |
| InP | 1,35 |
| GaP | 2,26 |
| GaAs | 1,43 |
| CdS | 2,42 |
| CdSe | 1,74 |

Larghezza degli intervalli proibiti per alcuni semiconduttori ($T = 300 \text{ K}$)

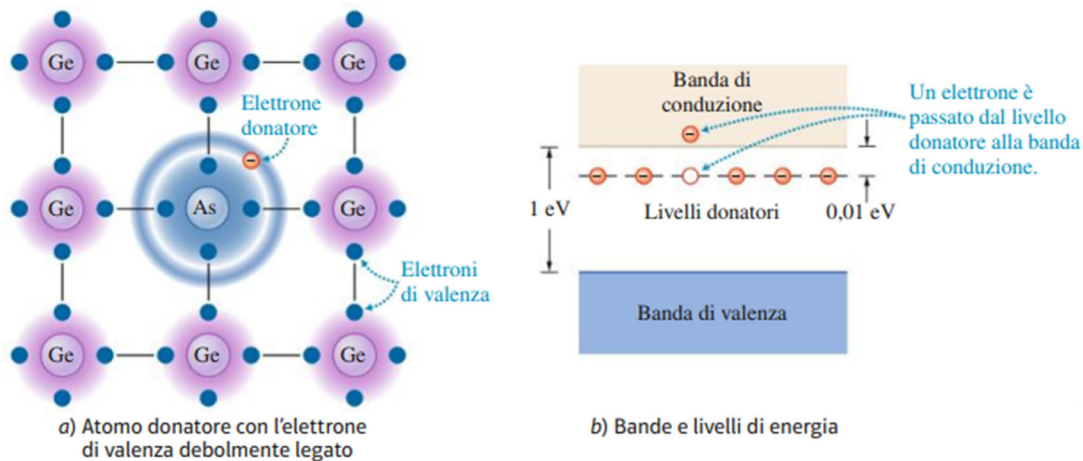
Caratteristiche principali dei **semiconduttori di tipo p**

- Portatori di carica maggioritari: lacune (cariche positive).
- Portatori di carica minoritari: elettroni liberi.
- Quando si applica un campo elettrico, le lacune sembrano muoversi verso il polo negativo, facilitando il passaggio di corrente.

Semiconduttore di tipo **n**

Un semiconduttore di tipo *n* è un materiale semiconduttore nel quale la conduzione elettrica è dovuta principalmente agli elettroni.

Si realizza drogando un semiconduttore puro (come il silicio o il germanio) con un elemento del Gruppo V della Tavola Periodica, come per esempio il fosforo (P), l'arsenico (As) o l'antimonio (Sb). Questi atomi hanno cinque elettroni di valenza, quindi uno di essi rimane libero e può muoversi nel cristallo, contribuendo alla conduzione elettrica.



L'atomo di arsenico As mette a disposizione l'elettrone donatore che ha un livello di energia che è distante solo 0.01 eV dalla banda di conduzione e che può essere facilmente superato applicando un basso campo elettrico

Caratteristiche principali dei **semiconduttori di tipo n**

- I portatori di carica maggioritari sono gli elettroni liberi.
- I portatori di carica minoritari sono le lacune (cariche positive).
- Quando viene applicato un campo elettrico, gli elettroni si spostano verso il polo positivo, facilitando il passaggio della corrente.

Dispositivi a semiconduttore

I semiconduttori di tipo p sono utilizzati insieme ai semiconduttori di tipo n per creare le giunzioni p-n, fondamentali per dispositivi elettronici. I più elementari dispositivi a semiconduttore sono:

Diodo

- Composto da una giunzione p-n.
- Permette il passaggio di corrente in un solo verso (polarizzazione diretta) e la blocca nell'altro (polarizzazione inversa).
- Utilizzato nei raddrizzatori, LED e fotodiodi.

Fotodiode

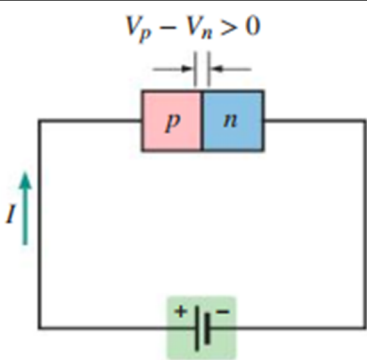
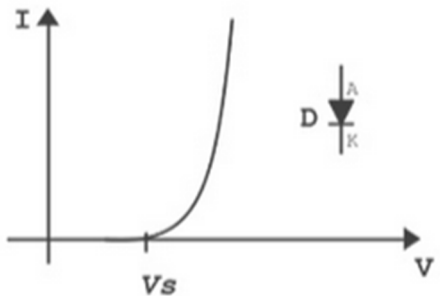
- Sensibile alla luce, converte la radiazione luminosa in corrente elettrica.
- Usato in sensori di luce, telecomunicazioni e celle solari.

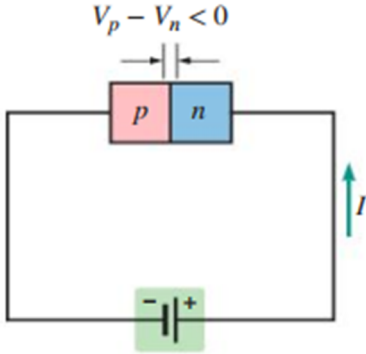
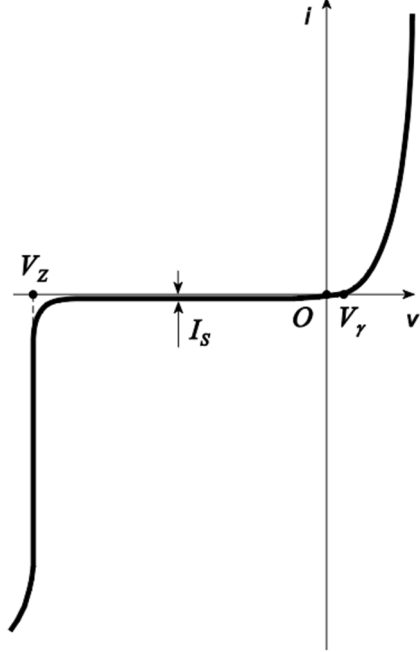
LED (Light Emitting Diode)

- Emette luce quando è attraversato da corrente.
- Ampiamente usato in illuminazione, display e segnaletica.

L'elemento fondamentale di un dispositivo a semiconduttore è la giunzione p-n che si realizza mettendo a contatto un semiconduttore di tipo p (ricco di lacune) e uno di tipo n (ricco di elettroni).

La giunzione p-n si realizza unendo un semiconduttore di tipo p e uno di tipo n, assicurando un contatto perfetto a livello atomico. Quando viene applicata una tensione:

| Polarizzazione diretta $V_p - V_n > 0$ | Curva caratteristica tensione/corrente |
|---|---|
| <div data-bbox="347 1003 715 1361" data-label="Diagram">  </div> <p data-bbox="406 1377 702 1411">a) Polarizzazione diretta</p> <p data-bbox="268 1496 785 1568">Le lacune (cariche positive) si muovono dalla zona p alla zona n.</p> <ul data-bbox="268 1612 762 1765" style="list-style-type: none"> • Gli elettroni (cariche negative) si muovono dalla zona n alla zona p. • La corrente fluisce attraverso la giunzione. | <div data-bbox="880 1093 1321 1388" data-label="Figure">  </div> <p data-bbox="842 1505 1372 1581">Il diodo conduce quando la tensione supera il valore di soglia</p> <ul data-bbox="893 1621 1362 1697" style="list-style-type: none"> • Per diodi al silicio $V_s = 0.6V$ • Per diodi al germanio $V_s = 0.2 V$ |

| Polarizzazione inversa $V_p - V_n < 0$ | Curva caratteristica tensione/corrente |
|--|---|
| <div data-bbox="338 510 705 862" data-label="Diagram">  </div> <p data-bbox="363 880 657 913">b) Polarizzazione inversa</p> <ul data-bbox="271 967 798 1232" style="list-style-type: none"> • Il campo elettrico si oppone al flusso delle cariche. • Solo una corrente molto piccola di portatori minoritari attraversa la giunzione. • La corrente è quasi completamente bloccata. | <div data-bbox="890 533 1311 1182" data-label="Figure">  </div> <p data-bbox="849 1227 1375 1449">Il diodo conduce pochissimo e all'aumentare della tensione inversa tende ad un valore costante I_s (Corrente inversa di saturazione) fino al valore di tensione limite V_z oltre la quale la Corrente cresce molto rapidamente</p> |

Caratteristica di un diodo

L'espressione matematica che rappresenta la curva caratteristica è espressa in forma approssimata dall'equazione del diodo (di Shockley) :

$$i = i_s \left(e^{\frac{eV}{\eta k_B T}} - 1 \right)$$

dove

i_s = corrente di saturazione

e = carica dell'elettrone $-1,602 \times 10^{-19}$ C

k_B = costante di Boltzmann

T = temperatura assoluta (in Kelvin)

η coefficiente numerico $\rightarrow \eta = 2$ per silicio , $\eta = 1$ per germanio

V = tensione applicata al diodo

Infatti se la polarizzazione è diretta $V > 0$ la corrente cresce esponenzialmente con la tensione mentre se è $V < 0$ la corrente è molto piccola

La **costante di Boltzmann** k_B è una costante fondamentale della fisica che compare in quasi tutte le formulazioni statistiche della fisica classica e quantistica.

La costante prende il nome da **Ludwig Boltzmann**, un fisico austriaco del XIX secolo che ha contribuito in modo significativo alla fondazione e allo sviluppo della **meccanica statistica**, un ramo della fisica teorica.

La costante di Boltzmann ha un valore definito di 1.380649×10^{-23} J/K

La costante di Boltzmann k_B è un ponte tra il mondo microscopico (le particelle) e il mondo macroscopico (grandezze termodinamiche come temperatura ed energia)

Collega temperatura ed energia, nella meccanica statistica lega l'entropia al numero di configurazioni possibili, governa la distribuzione delle particelle in funzione della temperatura (distribuzione di Boltzmann) - probabilità di trovare una particella in funzione della temperatura

La costante dei gas R che si trova nell'equazione di stato dei gas perfetti che lega la pressione P , il volume V e la temperatura T di n moli di un gas :

$$PV = n R T$$

è definita come il prodotto del **numero di Avogadro** e della costante di Boltzmann.

Il significato fisico di k_B è che fornisce una misura della quantità di energia (cioè di calore) associata ai **moti termici casuali** delle particelle che compongono una sostanza.

Legge di Richardson- Fermi

Cenni storici : Nel 1884, durante un esperimento per migliorare l'efficienza delle sue lampadine, Thomas Edison (1847-1931) scoprì accidentalmente il fenomeno del diodo termoionico. Egli cercava di evitare che le lampadine si annerissero a causa del deposito di particelle di carbone, ma notò che si verificava un passaggio di corrente solo quando l'elettrodo era positivo, non quando era negativo. Sebbene l'esperimento non avesse l'obiettivo di studiare questo fenomeno, Edison aveva inconsapevolmente scoperto il principio che sta alla base del diodo termoionico. La spiegazione quantitativa di questo fenomeno arrivò con la legge di Richardson-Fermi, che descrive il numero di elettroni emessi da un metallo in funzione della sua temperatura.

La **legge di Richardson-Fermi** descrive il numero di elettroni che un materiale emette quando è riscaldato, un fenomeno chiamato **emissione termoionica**. Questo fenomeno si verifica quando un metallo viene riscaldato e gli elettroni ricevono abbastanza energia per superare la barriera energetica (il **lavoro di estrazione**) e lasciare la superficie del materiale.

La legge prende il nome da **Owen Richardson** (1879-1959) e **Enrico Fermi** (1901-1954), che hanno contribuito a svilupparla. La formula che descrive l'emissione termoionica è la seguente:

$$J = A T^2 e^{-\frac{E}{k_B T}}$$

dove :

J densità di corrente emessa dal materiale ovvero numero di elettroni emessi per unità di superficie e di tempo misurata in A/m^2

A costante chiamata costante di Richardson (detta anche "costante di emissione termoionica")

k_B costante di Boltzmann $1.380649 \cdot 10^{-23}$ J/K

E energia minima necessaria per estrarre un elettrone dal metallo $\rightarrow E = e \Delta V$

T temperatura espressa in Kelvin

Ne consegue che esiste la proporzionalità diretta tra l'intensità di corrente il fattore $e^{-\frac{E}{k_B T}}$:

$$i \propto e^{-\frac{e\Delta V}{k_B T}}$$

Per cui le legge di Richardson-Fermi può essere scritta come :

$$i = K \cdot e^{-\frac{e\Delta V}{k_B T}}$$

dove $K = A T^2 S$

Applicando i logaritmi :

$$\ln i = -\frac{e\Delta V}{k_B T} + \ln K$$

In un grafico semilogaritmico la formula rappresenta una retta

$$y = mx + q$$

in cui il coefficiente angolare della retta è :

$$m = -\frac{e}{k_B T}$$

dove :

e carica dell'elettrone $-1,602 \times 10^{-19}$ C

kB costante di Boltzmann

T temperatura in Kelvin

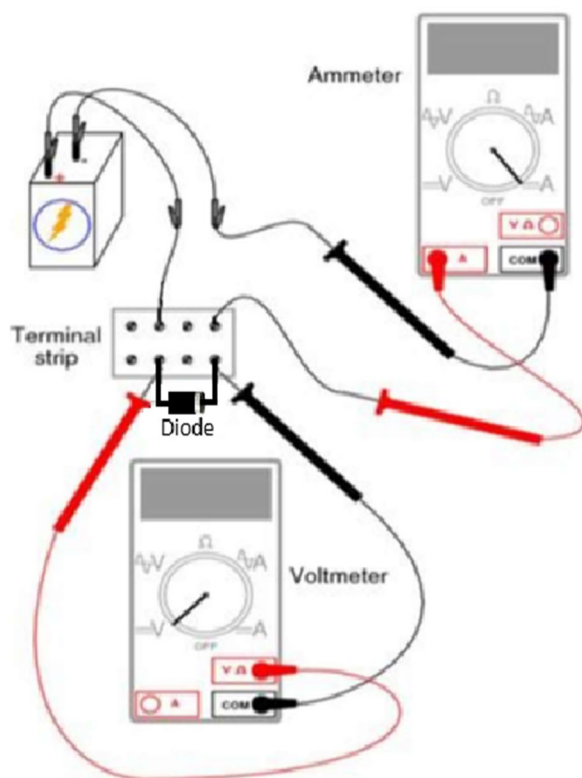
Dalla determinazione sperimentale del coefficiente angolare della retta si ricava il valore sperimentale della costante di Boltzmann

$$k_B = -\frac{e}{m T}$$

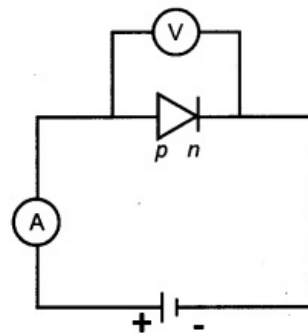
Esecuzione dell'esperienza misura sperimentale della costante di Boltzmann
e descrizione dei risultati ottenuti

In laboratorio abbiamo realizzato un circuito elettrico costruito da un diodo alimentato da un generatore e due multimetri utilizzati per misurare l'intensità di corrente e la tensione posti in un ambiente in cui è stata misurata la temperatura

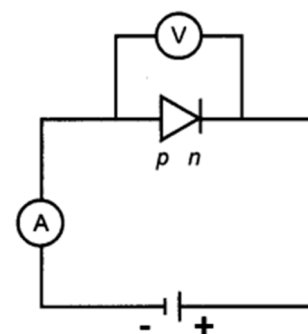
Circuito equivalente



Collegamento polarizzazione diretta



Collegamento polarizzazione inversa



Sperimentalmente abbiamo accertato che in un collegamento a polarizzazione inversa il diodo non è attraversato da corrente

Successivamente abbiamo collegato il diodo in polarizzazione diretta e tramite il reostato dell'alimentatore abbiamo alimentato il circuito misurando i valori dell'intensità di corrente e di tensione. Una volta ricavati i dati si rappresentano i valori di i e ΔV in scala semilogaritmica ottenendo una retta:

$$\ln i = - \frac{e \Delta V}{k_B T} + \ln K \quad \rightarrow \quad y = mx + q$$

dove:

e carica dell'elettrone $-1,602 \times 10^{-19}$ C

k_B costante di Boltzmann

T temperatura in Kelvin

Il coefficiente angolare della retta è quindi:

$$m = - \frac{e}{k_B T}$$

e dalla formula inversa si ricava il valore sperimentale della costante di Boltzmann

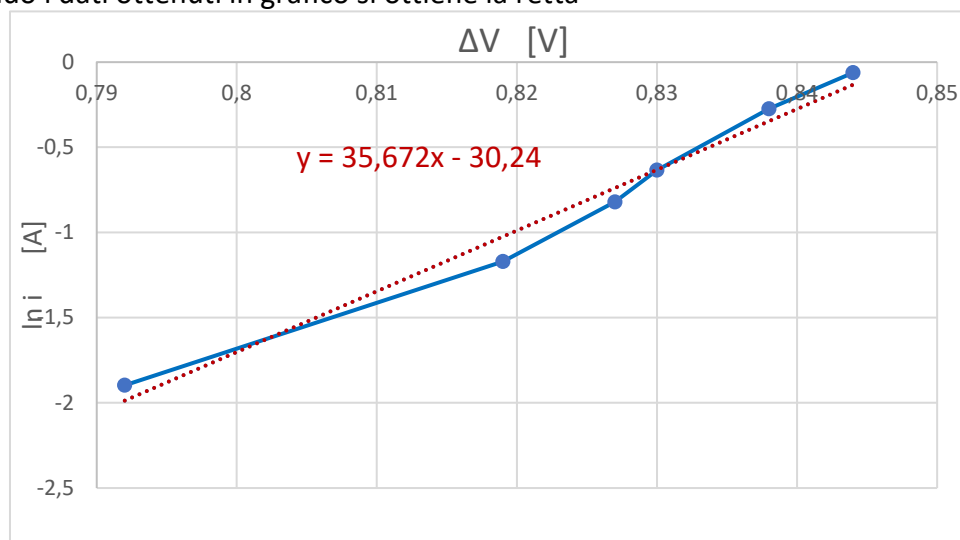
$$k_B = - \frac{e}{m T}$$

Dati sperimentali

La temperatura dell'ambiente misurata è di $T = 22^\circ \text{C}$ equivalenti a $T = 295,15 \text{ K}$

| prova | i [A] | ΔV [V] | $\ln i$ [A] |
|-------|------------|-------------------|----------------|
| 1 | 0,15 | 0,792 | -1,89712 |
| 2 | 0,31 | 0,819 | -1,17118 |
| 3 | 0,44 | 0,827 | -0,82098 |
| 4 | 0,53 | 0,830 | -0,63488 |
| 5 | 0,76 | 0,838 | -0,27444 |
| 6 | 0,94 | 0,844 | -0,06188 |

Rappresentando i dati ottenuti in grafico si ottiene la retta



di coefficiente angolare:

$$m = 35.672$$

da cui si ricava il valore della costante di Boltzmann sperimentale :

$$k_B = - \frac{e}{mT} = - \frac{(-1,6 \cdot 10^{-19})}{35.672 \cdot 295.15} = 1.5197 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

dove

e = carica dell'elettrone = $-1,6 \cdot 10^{-19}$ C

T = temperatura dell'ambiente = 295.15 K

Lo scarto percentuale rispetto al valore teorico k_B teorico = $1,38065 \cdot 10^{-23}$ J/K è :

$$\text{scarto } \% = \frac{A - B}{B} = \frac{1.5197 \cdot 10^{-23} - 1.38065 \cdot 10^{-23}}{1.5197 \cdot 10^{-23}} \times 100 = 9.15 \%$$

Conclusioni

Lo scarto sperimentale tra la costante di Boltzmann ottenuta e il suo valore teorico è inferiore al 10% per cui si può considerare l'esperienza riuscita anche considerando gli errori sperimentali presenti nell'esperienza

Bibliografia

Appunti alle lezioni di fisica

Foto e materiale didattico presenti nel sito dell'insegnante www.fmboschetto.it/

Walker - Corso di Fisica 3 – libro di testo classe quinta

Amaldi Blu Corso di Fisica 3

Ludwig Boltzmann è sepolto nel cimitero Centrale di Vienna , luogo molto visitato in quanto sono sepolti anche Ludwig van Beethoven, Franz Schubert, Johannes Brahms e Mozart

L'epigrafe sulla sua tomba riporta anche la formula

$$S = K \log W$$

dove S entropia, k la costante di Boltzmann, e W la molteplicità dei microstati.

Ludwig Boltzmann (1844-1906) è considerato uno dei più grandi fisici teorici della storia, grazie ai suoi contributi in termodinamica, meccanica statistica, elettromagnetismo, matematica e filosofia. Le sue idee erano rivoluzionarie per l'epoca in cui visse. Nonostante il successo accademico e una famiglia affettuosa, soffriva di problemi di salute, tra cui mal di testa, asma e problemi alla vista, oltre allo stress causato dalle critiche degli oppositori scientifici. Nel 1906, mentre era in vacanza vicino a Trieste, si tolse la vita, lasciando aperti interrogativi sulle cause del suo suicidio.

