

CIRCUITI 1

Laboratorio di Fisica II - CdL in Fisica dell'Università di Milano-Bicocca

4 marzo 2024

Obiettivi generali

- Configurare opportunamente gli strumenti per effettuare misure di resistenze
- Verificare la legge di Ohm
- Caratterizzazione corrente-tensione di un dispositivo non lineare

1 Caratteristica corrente-tensione di un resistore

Obiettivi specifici

- Valutazione della migliore configurazione degli strumenti
- Verifica della legge di Ohm

1.1 Valutazione della migliore configurazione degli strumenti

I due circuiti in Figura 1 vanno utilizzati in relazione al valore della resistenza di carico R e al valore delle resistenze parassite degli strumenti. La configurazione **(I)** va usata per resistenze R “piccole” rispetto alla resistenza interna del Voltmetro, mentre la configurazione **(II)** va utilizzata per resistenze R “grandi” rispetto alla resistenza interna dell'Amperometro

Si consideri prima la configurazione **(I)** in Figura 1. Per individuare il valore della resistenza interna del Voltmetro, R_V , è sufficiente applicare la legge di Ohm al parallelo

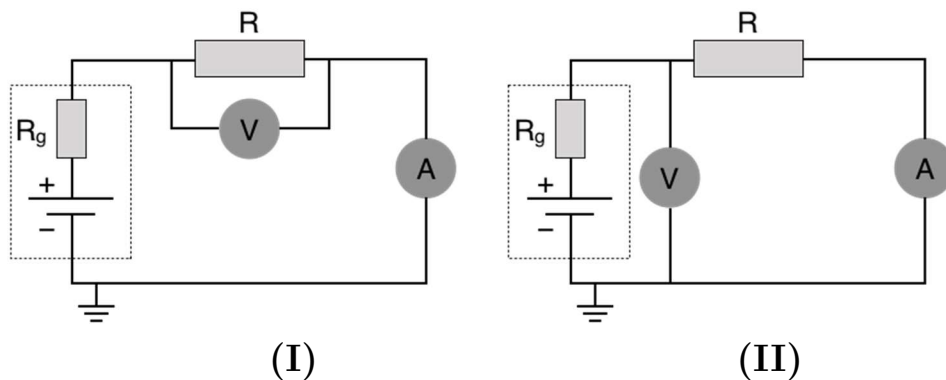


Figura 1: Configurazioni di misura di una resistenza.

delle resistenze R ed R_V (con R nota). Utilizzare valori di R dell'ordine di qualche centinaio di kilo Ohm, o un Mega Ohm

Si consideri ora la configurazione (II) in Figura 1. Per individuare il valore della resistenza interna dell'Amperometro, R_A , è sufficiente applicare la legge di Ohm alla serie delle resistenze R ed R_A (con R nota). Utilizzare valori di R dell'ordine di qualche Ohm.

Domande e considerazioni guida per la relazione

1. *Giustificare* quale dei due circuiti è più idoneo per la misura di resistenze “piccole” e quale per la misura di resistenze “grandi” in base all'ordine di grandezza delle resistenze interne del Voltmetro e dell'Amperometro

1.2 Verifica della legge di Ohm

Scelta la configurazione degli strumenti di misura si vari la tensione di alimentazione del circuito e si misuri la differenza di potenziale ai capi di un resistore e la corrente che lo attraversa (si raccolgano almeno una ventina di misure). Si costruisca il grafico $V(I)$:

- si valutino gli errori sui singoli punti V_i , I_i (l'indice i identifica la misura i -esima)
- si verifichi la validità della legge di Ohm (in modo quantitativo)
- si determini il valore della resistenza e la relativa incertezza

1.3 Misura di resistenze composite

- Si realizzi il parallelo di due resistori (scelti in maniera tale che abbiano lo stesso ordine di grandezza) e se ne misuri il valore dalla caratteristica corrente-tensione (si esegua nuovamente la misura mettendo i due resistori in serie). Si confrontino, in fine, i valori ottenuti con quelli previsti.

Note

- 1) La convenzione è di usare cavetti neri per la connessione verso il polo negativo, rossi per il polo positivo
- 2) Un *generatore reale di tensione* ben progettato ha la caratteristica di avere una resistenza parassita in serie “piccola”
- 3) Un *generatore reale di corrente* ben progettato ha la caratteristica di avere una resistenza parassita in parallelo “grande”
- 4) Un “lettore di tensione” reale (*Voltmetro*) ben progettato ha la caratteristica di avere una resistenza parassita in parallelo “grande”
- 5) Un “lettore di corrente” reale (*Amperometro*) ben progettato ha la caratteristica di avere una resistenza parassita in serie “piccola”

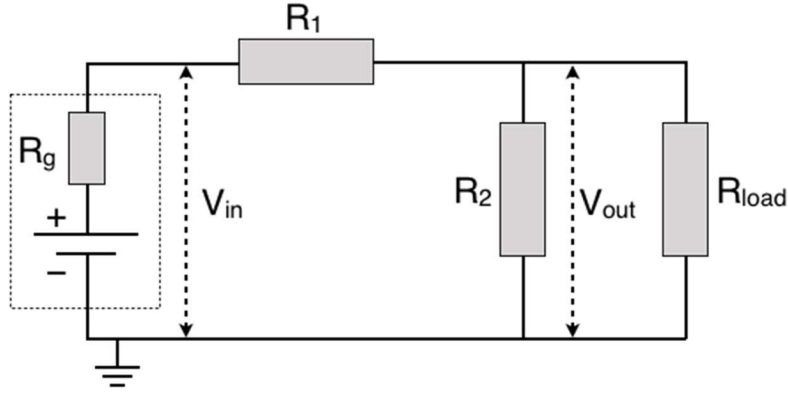


Figura 2: Partitore resistivo

2 Partitore resistivo

Si consideri un circuito come in Figura 2. Si consideri inoltre che il carico R_{Load} possa variare per esempio nell'intervallo da 10 kOhm a 1 MOhm. Si dimensionino R_1 ed R_2 in maniera tale che la tensione V_{out} sia $\sim 0.5V_{\text{in}}$ (senza R_{Load}) e tale che la caduta di tensione su R_{Load} non dipenda dal suo valore.

2.1 Approfondimento

Si immagini ora di avere il medesimo circuito, ma senza R_2 . Conoscendo R_1 , si dimensioni un ipotetico carico R_{Load} al fine di avere il *trasferimento massimo di potenza* sul carico

Questo è un problema comune in elettronica di potenza e si presenta quando la resistenza (R_1) della linea che porta la corrente è un parametro esterno, non modificabile. Si vuole di conseguenza adattare il carico (R_{Load}) per massimizzare il trasferimento di potenza. La potenza assorbita, P_{Load} , dal carico risulta (trascurando R_g):

$$P_{\text{load}} = V_{\text{load}} \cdot I = \frac{V_g}{R_{\text{load}} + R_1} \frac{V_g}{R_{\text{load}} + R_1} R_{\text{load}} = \frac{V_g^2}{R_{\text{load}} + R_1} \frac{R_{\text{load}}}{R_{\text{load}} + R_1} = P_g \frac{R_{\text{load}}}{R_{\text{load}} + R_1} \quad (1)$$

Si osserva inoltre che l'*efficienza del trasferimento di potenza*, P_{Load}/P_g , dipende dal valore relativo di R_1 e R_{Load} . Ponendosi ora in un regime di *corrente alternata* e facendo uso di un *trasformatore* prima del carico che riduce la tensione di un fattore a (più grande di 1), e quindi moltiplica la corrente per lo stesso fattore a , l'equazione precedente diventa:

$$P_{\text{load}} = P_g \frac{a^2 R_{\text{load}}}{a^2 R_{\text{load}} + R_1} \quad (2)$$

In altre parole, trasferire la potenza dal generatore, P_g , al carico tramite alte tensioni, consente una perdita inferiore di potenza per effetto Joule lungo la linea di trasmissione. Ecco perché la tensione lungo i tralicci dell'ENEL è molto maggiore (400 kV) dei 220 V disponibili in casa

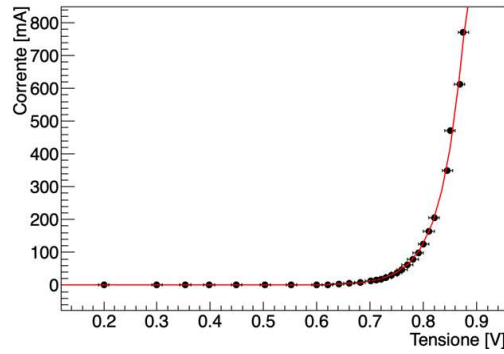


Figura 3: Esempio di fit lineare della caratteristica corrente-tensione di un diodo volto a determinare la tensione di soglia.

3 Misura della caratteristica corrente-tensione di un diodo

Obiettivi specifici

- Verificare la legge di Shockley che lega la corrente alla tensione in un diodo
- Valutare la tensione oltre la quale il diodo inizia a condurre (tensione di soglia, V_{soglia})

La legge di Shockley che lega la corrente alla tensione in un diodo è

$$I = I_0(e^{\frac{qV}{gkT}} - 1), \quad (3)$$

dove I_0 è la corrente di saturazione inversa, q è la carica dell'elettrone (1.6×10^{19} Coulomb), k è la costante di Boltzmann (1.38×10^{23} J/K), g è una costante dipendente dal tipo di diodo (adimensionale e dell'ordine dell'unità) e T è la temperatura del diodo in Kelvin. A temperatura ambiente ($T \sim 300$ K) il prodotto $q/kT \simeq 38.6$ V $^{-1}$.

Si sostituisca un diodo alla resistenza nel circuito riportato in Figura 1. Si scelga opportunamente la configurazione degli strumenti di misura e si vari la tensione di alimentazione del circuito misurando la differenza di potenziale ai capi del diodo e la corrente che lo attraversa.

Nonostante la caratteristica corrente-tensione di un diodo sia un esponenziale, per applicazioni pratiche si usa definire una tensione di soglia, oltre la quale il diodo viene considerato “in conduzione”, in quanto inizia a condurre una corrente “significativa” (circa 10 mA). La tensione di soglia è valutabile rappresentando graficamente i dati corrente-tensione in un intervallo indicativo di corrente tra 0 e 500 mA, e fittando i dati fissando l'estremo superiore del *range* di tensioni in corrispondenza dell'ultimo punto misurato, e aggiungendo punti verso le basse tensioni finché il χ^2 normalizzato non inizia a crescere oltre ~ 1 . Un esempio di questo fit è mostrato in Figura 3. In questo modo si identifica un *range* di tensioni in cui il diodo conduce e in cui la sua caratteristica è approssimabile con una legge tensione-corrente lineare. La V_{soglia} risulta essere l'intercetta della retta con l'asse x (tensione).

Si provi poi a fittare le misure con la relazione di Shockley, o con la sua approssimazione per tensioni sufficientemente alte (i.e. passando ai logaritmi, ed ottenendo una relazione

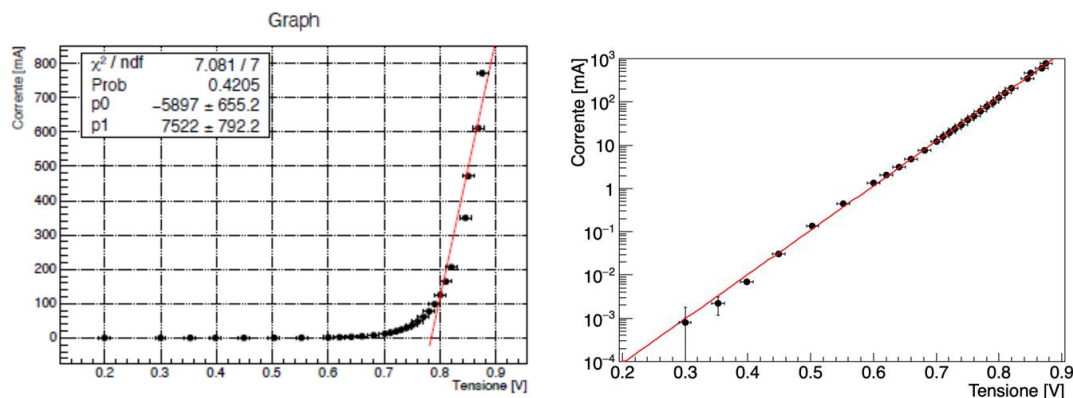


Figura 4: Esempi di fit della legge di Shockley alla caratteristica corrente-tensione di un diodo.

lineare), ottenendo così una stima della costante del diodo e della corrente di saturazione inversa. Esempi di questi fit sono mostrati in Figura 4.

Note

- 1) **ATTENZIONE:** il diodo deve essere polarizzato in modo corretto, cioè in maniera tale che risulti polarizzato direttamente (la polarizzazione diretta avviene collegando l'anodo al polo positivo dell'alimentatore)
- 2) **ATTENZIONE:** per raggiungere correnti *superiori* a **500 mA** è necessario usare la boccia con la scritta **A** (Ampere), e non **mA** (milliAmpere), sull'Amperometro
- 3) In un diodo i due reofori hanno forma differente per distinguere catodo da anodo (e quindi poterli polarizzare in modo corretto). In alternativa i Multimetri palmari hanno una modalità di "test diodo" che vi consente di individuare anodo (polo positivo) e catodo (polo negativo)
- 4) Si abbia cura di scegliere la configurazione Amperometro/Voltmetro più adatta alla misura, tenendo conto che la resistenza è variabile (in alternativa si faccia la misura sempre nella stessa configurazione ma si tenga conto della resistenza interna dei Multimetri, come ricavata nella Sezione 1 della scheda)
- 5) Come varia la definizione di V_{soglia} al variare dell'intervallo di fit?

Domande e considerazioni guida per la relazione

- 1) Come mai nella misura della resistenza interna degli strumenti nella Sezione 1 è necessario usare resistenze "grandi" per la configurazione **(I)** e resistenze "piccole" per la configurazione **(II)**?
- 2) Per definire in maniera quantitativa in che misura il modello descrive i dati è necessario effettuare un test d'ipotesi. Quale?
- 3) Una volta note le resistenze interne dei Multimetri è possibile valutare quantitativamente la loro influenza sulle misure effettuate (si determini se l'averne trascurato l'effetto sia compatibile con l'errore assunto sulle grandezze misurate)

Riferimenti bibliografici

- [1] Dispense sulle lezioni introduttive disponibili sul sito e-learning.
- [2] Mazzoldi, Nigro, Voci. *Fisica. Volume II*. Capitolo 6.
- [3] Purcell, Morin. *Electricity and Magnetism*. Paragrafi da 4.7 a 4.12.

Ulteriori informazioni utili per l'esecuzione dell'esperienza

In questa esperienza si studiano circuiti alimentati in corrente continua, in particolare si costruisce la caratteristica tensione corrente di un conduttore Ohmico (un resistore) e di un conduttore non Ohmico (un diodo). In entrambi i casi è necessario ottimizzare il disegno del circuito in modo che gli strumenti utilizzati per misurare tensione e corrente non ne alterino il comportamento.

L'esperimento utilizza basse tensioni e basse correnti, va posta attenzione a due cose:

- evitare di far passare una corrente troppo elevata nelle resistenze del range 1-50 Ohm perché si scaldano fino al completo danneggiamento
- ricordarsi che il diodo va alimentato con la corretta scelta del polo positivo e di quello negativo, in caso contrario si danneggia

Uso della bread-board, realizzazione del circuito e alimentazione

Il circuito viene realizzato su una breadboard (Figura ??): l'alimentatore viene collegato alle boccole mediante un cavetto con connettori a banana e da ciascuna boccola un filo conduttore isolato consente di portare la corrente sulle piste conduttive che sono sotto il grigliato bianco.

La Figura 6 mostra una delle breadboard usate in laboratorio: qui è montato un led (rosso illuminato) alimentato tramite i due fili rosso e nero. Uno dei due capi di ciascun filo è inserito nella serie di fori orizzontali che corrispondono alla stessa pista conduttiva.

In questa serie di fori è anche inserito uno dei reofori del led. L'altro estremo del filo è collegato ad una boccola nella quale è inserito il cavetto che porta l'alimentazione.

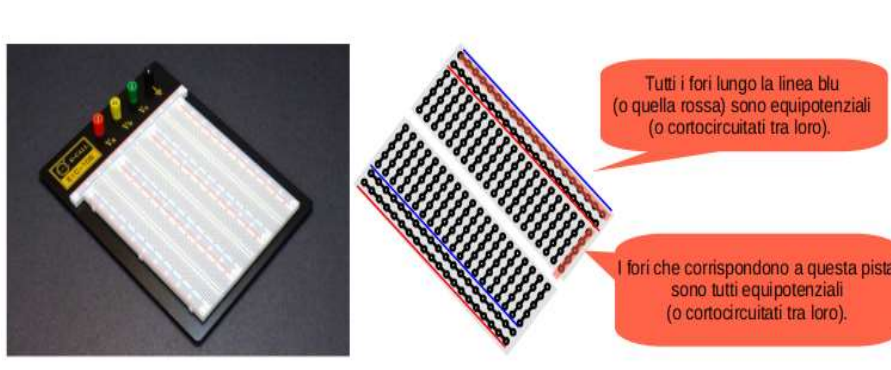


Figura 5: Use della bread-board

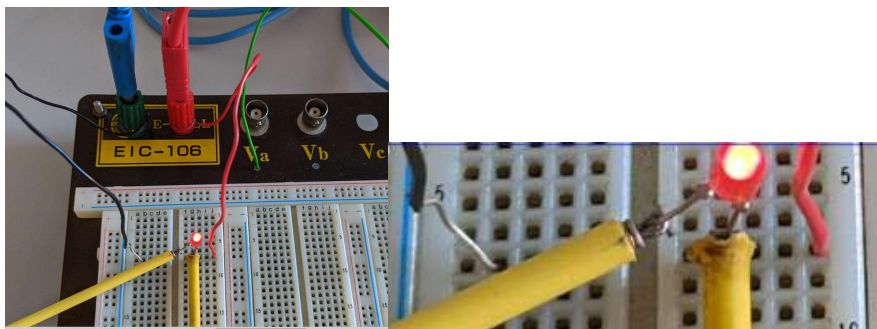


Figura 6: Esempio di circuito montato sulla bread-board.

Misura della corrente e della tensione

In laboratorio sono a disposizione due tipi di strumenti, uno palmare (Figura 7) e uno da banco (Figura 8), che possono essere utilizzati sia per la misura della corrente (lo strumento va messo in serie nel ramo di circuito in cui si vuole misurare la corrente) o per la misura di tensione (lo strumento va messo in parallelo al/ai componenti ai capi dei quali si vuole misurare la differenza di potenziale).

Il suggerimento è di utilizzare il multimetro da banco per la misura delle correnti (le correnti negli esperimenti del nostro laboratorio sono molto piccole, quindi serve uno strumento sensibile a bassi amperaggi) e il multimetro palmare per la misura delle tensioni. Questi strumenti consentono anche di misurare direttamente il valore di resistenza e capacità di un conduttore. Gli strumenti sono collegati al circuito con dei cavetti con connettore a banana, questi possono essere inseriti uno sull'altro e possono essere inseriti nelle boccole. È anche possibile collegare direttamente lo strumento su un componente mediante apposite pinzette.

La caratteristica di maggior rilievo per la misure realizzate in laboratorio è la resistenza interna dello strumento (si veda il manuale).



Figura 7: Multimetro palmare. Il selettore consente di scegliere il tipo di misura: in questo caso è la misura di una corrente continua. I cavetti per la connessione con il circuito devono essere inseriti in posizione differente per effettuare misure di corrente o di tensione/resistenza/capacità. Questo strumento consente anche la misura di correnti o tensioni alternate, in questo caso funziona solo in un range di frequenza basso e restituisce il valore efficace di queste grandezze.



Figura 8: Multimetro da banco. Consente la misura di tensioni, correnti e resistenze con alta sensibilità e accuratezza. In laboratorio suggeriamo di usarlo per la misura delle correnti perchè nei circuiti che vengono realizzati queste sono molto piccole e difficili da misurare con il multimetro palmare.

Misura caratteristica di un diodo

In Figura 9 è mostrata la disposizione degli strumenti per la misura della caratteristica di un diodo. I due strumenti da banco a destra sono l'alimentatore che dà tensione al diodo (strumento superiore) e un multimetro da banco usato per la misura della corrente che attraversa il diodo (strumento inferiore, è collegato in serie nel circuito). Il multimetro palmare a sinistra è invece inserito in parallelo al diodo (mediante le due pinzette con i puntali gialli).

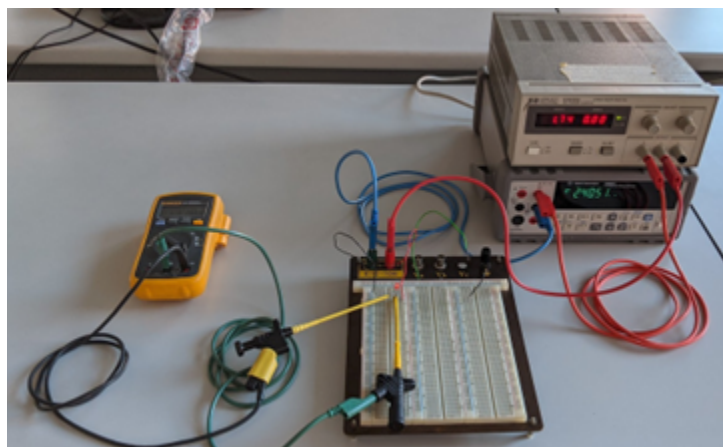


Figura 9: Disposizione degli strumenti per la misura della caratteristica di un diodo.