

# Analisi della caratteristica tensione corrente di un diodo

Giovanni Bugli

Giovanni Postacchini

Novembre 2021, Postazione 11

## Abstract

In questa esperienza di laboratorio è stata studiata la caratteristica tensione corrente per un diodo al germanio e per un diodo al silicio. Dalle misure effettuate è stato possibile stimare il prodotto  $\eta V_T$ , dove  $\eta$  è l'indice di idealità e  $V_T$  la tensione termica, e la corrente di saturazione  $I_0$ . I valori numerici stimati per il diodo al germanio e al silicio sono rispettivamente:  $\eta_{Ge} V_T = (43 \pm 3)mV$ ,  $\eta_{Si} V_T = (50 \pm 4)mV$ ,  $I_{0Ge} = (2.6 \pm 0.6)\mu A$ ,  $I_{0Si} = (2.0 \pm 1.5)nA$ .

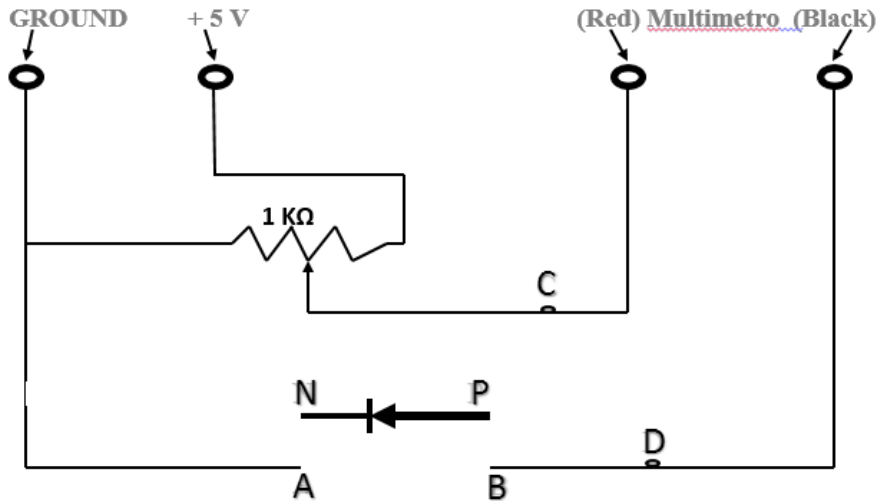
## 1 Introduzione

Lo scopo di questa prova è quello di studiare il comportamento di una giunzione pn polarizzata (diodo) analizzando i valori della corrente in funzione della tensione ai capi del diodo stesso. La caratteristica tensione-corrente di un diodo è espressa dall'equazione di Shockley:

$$I_D = I_0(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1) \quad (1)$$

dove  $I_D$  e  $V_D$  sono rispettivamente la corrente e la tensione ai capi del diodo,  $I_0$  la corrente di saturazione,  $\eta$  il fattore di idealità e  $V_T$  la tensione termica.

## 2 Apparato sperimentale e svolgimento



**Figura 1:** Schema del circuito realizzato. Sono rappresentati i terminali del generatore e del multimetro. In fase di misurazione, si è collegata la giunzione pn ai punti A e B.

Il circuito realizzato, come mostrato in Fig. 1, è formato dai seguenti componenti: un generatore di tensione costante da 5V, un potenziometro con fondoscala da 1kΩ, una giunzione pn al germanio o al silicio. Per le misure di tensione si è utilizzato un oscilloscopio analogico GW modello GOS-652G mentre per quelle di corrente un multimetro digitale FLUKE modello 8022.

La risoluzione e la precisione specifiche del multimetro e dell'oscilloscopio relativi ai valori di fondo scala utilizzati nelle misure sono riportate in Tab 1. Le incertezze associate alle misure di tensione e corrente sono state calcolate come discusso in appendice.

	Fondo scala	Risoluzione	Precisione
Multimetro	$2mA$ $20mA$	$1\mu A$ $10\mu A$	$0.75\% + 1 \text{ digit}$
	$200mV$ $2V$	$100\mu V$ $1mV$	$0.25\% + 1 \text{ digit}$
Oscilloscopio	$10mV/div$ $20mV/div$ $50mV/div$ $100mV/div$ $200mV/div$	$1mV$ $2mV$ $5mV$ $10mV$ $20mV$	$3\%$

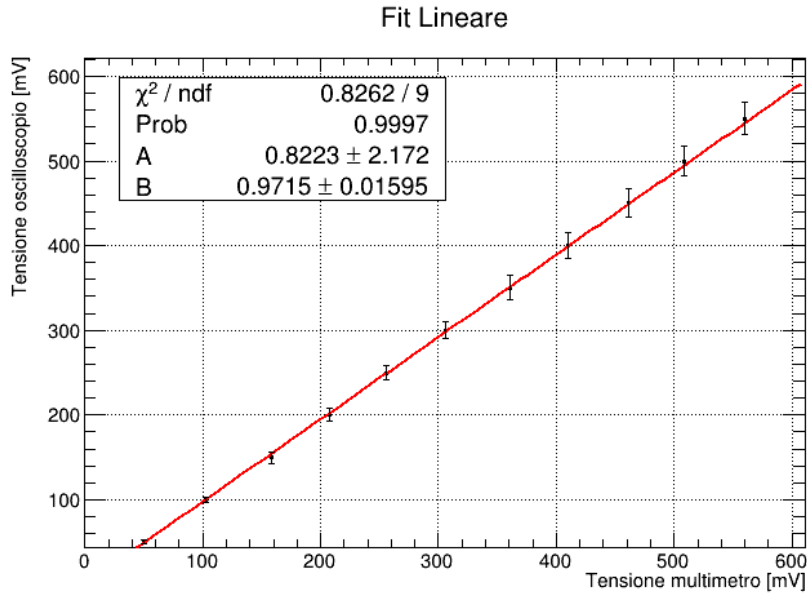
**Tabella 1:** Risoluzione e precisione degli strumenti di misura nei fondo scala utilizzati. La risoluzione dell'oscilloscopio è stata calcolata come  $fondoscala/10$ .

I componenti sono stati montati su una scheda millepori alla quale sono stati collegati opportunamente anche il generatore di tensione e gli strumenti di misura quali il multimetro e l'oscilloscopio. In un primo momento è stato tolto il diodo dal circuito ed è stata verificata la corretta calibrazione tra i due strumenti nel misurare i valori di tensione. Sono state effettuate così una serie di misure di tensione, riportate in Tab. 2, che hanno confermato l'assenza di errori sistematici nella misura della tensione tra l'oscilloscopio e il multimetro. Infatti, come mostrato in Fig. 2, è stato eseguito un fit attraverso la relazione lineare  $V_{oscilloscopio} = A + BV_{multimetro}$ , ottenendo le seguenti stime per i parametri:  $A = (1 \pm 2)mV$ ,  $B = (0.972 \pm 0.016)$ . I prametri stimati, sono compatibili, entro  $2\sigma$ , ai valori attesi  $A = 0mV$  e  $B = 1$ .

$V_{multimetro}(mV)$	Fscala (mV)	$V_{oscilloscopio} (mV)$	Fscala (mV/div)
$50.1 \pm 0.2$	200	$50 \pm 2$	10
$102.9 \pm 0.4$	200	$100 \pm 4$	20
$157.8 \pm 0.5$	200	$150 \pm 7$	50
$208 \pm 2$	2000	$200 \pm 8$	50
$256 \pm 2$	2000	$250 \pm 9$	50
$306 \pm 2$	2000	$300 \pm 10$	50
$361 \pm 2$	2000	$350 \pm 15$	100
$410 \pm 2$	2000	$400 \pm 16$	100
$461 \pm 2$	2000	$450 \pm 17$	100
$509 \pm 2$	2000	$500 \pm 18$	100
$560 \pm 2$	2000	$550 \pm 19$	100

**Tabella 2:** Tensione misurata ai capi del multimetro e dell'oscilloscopio. Accanto ad ogni dato è riportato il valore di fondo scala adoperato in fase di misurazione.

Successivamente è stato montato prima il diodo al germanio e poi quello al silicio in polarizzazione diretta e sono state effettuate misure di corrente e di tensione variando la resistenza del potenziometro. Le misure sono state effettuate in un range di tensioni da 50 a 800 mV circa, in modo tale da sottoporre i diodi ad una corrente non superiore a 1 - 2 mA.



**Figura 2:** Retta di calibrazione per verificare l'assenza di errori sistematici nelle misure di tensione tra il multimetro e l'oscilloscopio. La linea rossa raffigura il fit lineare eseguito sui punti misurati.

### 3 Risultati e discussione

I dati sperimentali relativi alla tensione e alla corrente presenti nel diodo sono visibili in Tab 3(Ge) e Tab 4(Si).

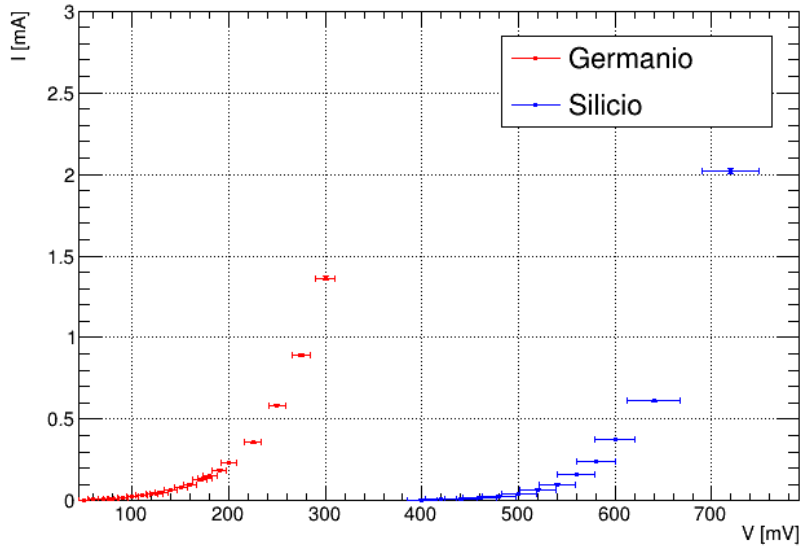
$V_{Ge}$ (mV)	Fscala (mV/div)	$I_{Ge}$ (mA)	Fscala (mA)
$50 \pm 5$	50	$0.005 \pm 0.001$	2
$60 \pm 5$	50	$0.008 \pm 0.001$	2
$70 \pm 5$	50	$0.010 \pm 0.001$	2
$75 \pm 5$	50	$0.012 \pm 0.001$	2
$80 \pm 6$	50	$0.014 \pm 0.001$	2
$90 \pm 6$	50	$0.018 \pm 0.001$	2
$100 \pm 6$	50	$0.025 \pm 0.001$	2
$110 \pm 6$	50	$0.032 \pm 0.001$	2
$120 \pm 6$	50	$0.042 \pm 0.001$	2
$125 \pm 6$	50	$0.046 \pm 0.001$	2
$130 \pm 6$	50	$0.054 \pm 0.001$	2
$140 \pm 7$	50	$0.066 \pm 0.001$	2
$150 \pm 7$	50	$0.084 \pm 0.002$	2
$160 \pm 7$	50	$0.101 \pm 0.002$	2
$170 \pm 7$	50	$0.126 \pm 0.002$	2
$175 \pm 7$	50	$0.140 \pm 0.002$	2
$180 \pm 7$	50	$0.152 \pm 0.002$	2
$190 \pm 8$	50	$0.189 \pm 0.002$	2
$200 \pm 8$	50	$0.234 \pm 0.003$	2
$225 \pm 8$	50	$0.359 \pm 0.004$	2
$250 \pm 9$	50	$0.585 \pm 0.005$	2
$(27.5 \pm 1.0) \cdot 10$	50	$0.890 \pm 0.008$	2
$(30.0 \pm 1.0) \cdot 10$	50	$1.362 \pm 0.011$	2

**Tabella 3:** Tensione misurata con l'oscilloscopio e corrente misurata dal multimetro per il diodo al germanio. Accanto ad ogni dato è riportato il valore di fondo scala adoperato in fase di misurazione.

$V_{Si}$ (mV)	Fscala (mV/div)	$I_{Si}$ (mA)	Fscala (mA)
$(40.0 \pm 1.6) \cdot 10$	100	$0.006 \pm 0.001$	2
$(42.0 \pm 1.6) \cdot 10$	100	$0.008 \pm 0.001$	2
$(44.0 \pm 1.7) \cdot 10$	100	$0.013 \pm 0.001$	2
$(46.0 \pm 1.7) \cdot 10$	100	$0.019 \pm 0.001$	2
$(48.0 \pm 1.8) \cdot 10$	100	$0.030 \pm 0.001$	2
$(50.0 \pm 1.8) \cdot 10$	100	$0.042 \pm 0.001$	2
$(52.0 \pm 1.9) \cdot 10$	100	$0.069 \pm 0.001$	2
$(54.0 \pm 1.9) \cdot 10$	100	$0.101 \pm 0.001$	2
$(56 \pm 2) \cdot 10$	100	$0.159 \pm 0.001$	2
$(58 \pm 2) \cdot 10$	100	$0.241 \pm 0.002$	2
$(60 \pm 2) \cdot 10$	100	$0.375 \pm 0.002$	2
$(64 \pm 3) \cdot 10$	200	$0.611 \pm 0.003$	2
$(72 \pm 3) \cdot 10$	200	$2.020 \pm 0.015$	20
$(76 \pm 3) \cdot 10$	200	$5.72 \pm 0.02$	20

**Tabella 4:** Tensione misurata con l'oscilloscopio e corrente misurata dal multimetro per il diodo al silicio. Accanto ad ogni dato è riportato il valore di fondo scala adoperato in fase di misurazione.

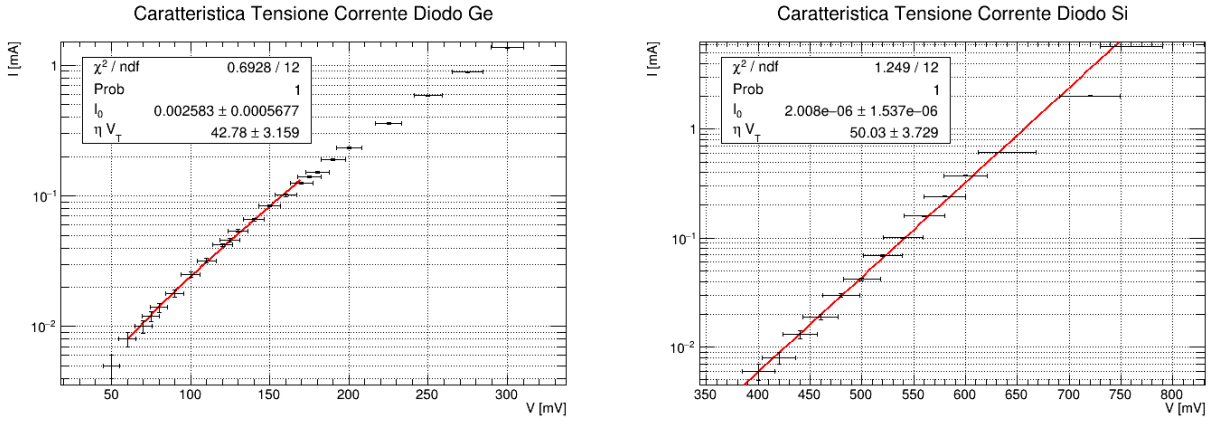
In Fig 3 sono graficati i punti sperimentali acquisiti sia per il diodo al germanio sia per quello al silicio. Sono ben visibili i due diversi valori di tensione di soglia, pari a  $V_\gamma \simeq 50mV$  per il germanio e  $V_\gamma \simeq 400mV$  per il silicio.



**Figura 3:** Caratteristica tensione-corrente dei diodi al germanio e al silicio osservata in polarizzazione diretta. Il grafico è stato ottenuto sovrapponendo i dati sperimentali osservati separatamente per i due diodi

Sui dati di tensione e corrente è stato eseguito un fit con l'Eq. 1. In Fig. 4 vengono rappresentate le curve caratteristiche in scala semilogaritmica per i due diodi.

In particolare per il germanio il fit è stato eseguito in un range ridotto di 60-170 mV poichè a tensioni maggiori il comportamento lineare in scala semilogaritmica non è ottimale, mentre per il diodo al silicio si è fittato in un range di 400 - 760 mV su tutti i dati acquisiti. In entrambi i casi il fit ha prodotto un buon  $\tilde{\chi}^2$  che permette di giustificare la validità dei parametri ottenuti. Numericamente  $\tilde{\chi}_{Ge} \simeq 0.06$ ,  $\tilde{\chi}_{Si} \simeq 0.1$  che risultano inferiori al valore ottimale  $\tilde{\chi}^2 \simeq 1$ . Il motivo di tale disaccordo si giustifica con l'elevato errore relativo associato alle misure di tensione eseguite con l'oscilloscopio.



**Figura 4:** Caratteristica tensione-corrente dei diodi in polarizzazione diretta. I dati sono rappresentati in scala semilogaritmica. Il dati sono stati fittati attraverso l'equazione di Shockley. I parametri ottenuti dal fit sono riportati nei grafici.

Come riportato in Fig. 4, i parametri caratteristici ricavati dal fit sono:  $\eta_{Ge}V_T = (43 \pm 3)mV$ ,  $\eta_{Si}V_T = (50 \pm 4)mV$ ,  $I_{0Ge} = (2.6 \pm 0.6)\mu A$ ,  $I_{0Si} = (2.0 \pm 1.5)nA$ .

Supponendo i diodi ad una temperatura pari alla temperatura ambiente  $T = 300K$ , possiamo supporre  $V_T \simeq 26mV$  e ricavare indirettamente l'indice di idealità dalle stime di  $\eta V_T$ :  $\eta_{Ge} = (1.65 \pm 0.11)$ ,  $\eta_{Si} = (1.92 \pm 0.15)$ . Questi parametri sono solo indicativi in quanto non è stata misurata la temperatura effettiva dei diodi né tantomeno è stato verificato che il valore risultasse costante durante le misure.

## 4 Conclusioni

L'esperimento effettuato in laboratorio ha confermato l'andamento esponenziale della corrente previsto dall'equazione di Shockley sia per il diodo al silicio che per quello al germanio. Infatti, le operazioni di best-fitting sui dati acquisiti hanno mostrato la compatibilità con l'andamento atteso dalla equazione di Shockley (Eq. 1). Dagli stessi fits, si sono ricavati i parametri caratteristici relativi ai due diodi:  $\eta_{Ge}V_T = (43 \pm 3)mV$ ,  $\eta_{Si}V_T = (50 \pm 4)mV$ ,  $I_{0Ge} = (2.6 \pm 0.6)\mu A$ ,  $I_{0Si} = (2.0 \pm 1.5)nA$ .

## Appendice: stima delle incertezze

L'incertezza sulle misure di corrente effettuate con il multimetro è 0.75% della lettura + 1 digit. L'incertezza sulle misure di tensione effettuate con l'oscilloscopio  $\sigma_{osc}$  è stata calcolata sommando in quadratura l'errore sulla lettura  $\sigma_L$ , l'errore sullo zero  $\sigma_Z$  e l'errore del costruttore  $\sigma_C$  secondo la formula:

$$\sigma_{osc} = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_Z^2 + \sigma_C^2} \quad (2)$$

dove l'errore sulla lettura è  $fondoscala/10$  mentre  $\sigma_C$  corrisponde al 3% della lettura.