

## Esperimenti con i semiconduttori:

### caratteristica corrente-tensione di diodi a semiconduttore

#### Fondamenti teorici

I diodi a semiconduttore sono tra i più semplici componenti dei circuiti elettronici. Sono formati da due strati di semiconduttore cristallino drogati n e p affacciati. I semiconduttori drogati (sia di tipo n che di tipo p) conducono tanto meglio quanto più elevato è il drogaggio. Il sistema si chiama “giunzione p-n” e possiede alcune interessanti proprietà che vengono sfruttate nell'elettronica moderna: le giunzioni p-n sono comunemente usate come diodi, cioè dispositivi elettronici che permettono un flusso di corrente elettrica in una direzione, ma non in quella opposta.

In assenza di campo esterno la giunzione si presenta come nella figura seguente. Le cariche positive mobili della zona p migrano verso la zona n, mentre le cariche negative mobili nella zona n migrano verso la zona p per ridurre la differenza di concentrazione di cariche che c'è alla giunzione (fenomeno della diffusione), creando così due zone non neutre, dovute alle cariche fisse. All'interfaccia tra i due semiconduttori si forma quindi un sottile strato, chiamato regione di svuotamento o “di carica spaziale”, sede di un campo elettrico, detto “di giunzione”.

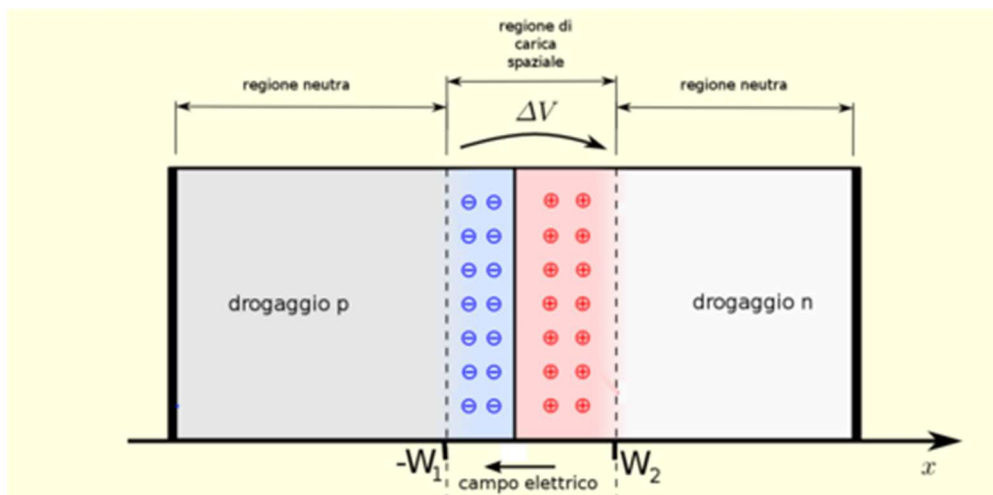


Figura 1

La dimensione di questa regione si può aumentare applicando un campo elettrico che rinforza il campo di giunzione. Chiameremo questa situazione “polarizzazione inversa” della giunzione (vedi figura 2a). Poiché la regione di tipo p è connessa al terminale negativo dell'alimentazione, le lacune nella regione di tipo p vengono spinte lontano dalla giunzione, facendo crescere l'ampiezza della zona svuotata. Lo stesso succede nella zona di tipo n, dove gli elettroni vengono spinti lontano dalla giunzione a causa dell'azione del terminale positivo dell'alimentazione. Questo aumenta l'ampiezza della zona svuotata e la tensione applicata al dispositivo si concentra quasi completamente ai capi della zona di carica spaziale. In questa situazione la corrente è, quindi, praticamente nulla.

Viceversa, se applichiamo un campo elettrico esterno che si oppone al campo di giunzione, (situazione di polarizzazione diretta, vedi figura 2b) le lacune nella regione di tipo p e gli elettroni nella regione di tipo n sono spinti verso la giunzione. Questo riduce la larghezza della zona svuotamento e produce una corrente elettrica intensa che attraversa il diodo.

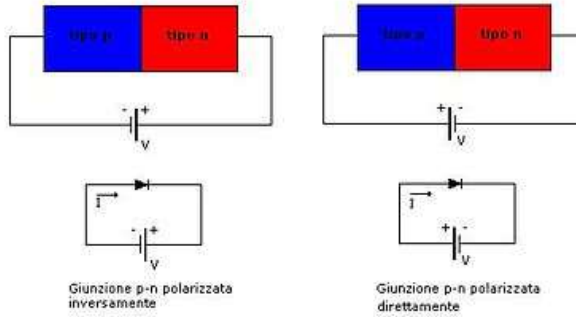


figura 2a

figura 2b

La formula che descrive la  $I(U)$  per il diodo si dimostra, dopo calcoli non banali che qui omettiamo, essere la seguente:

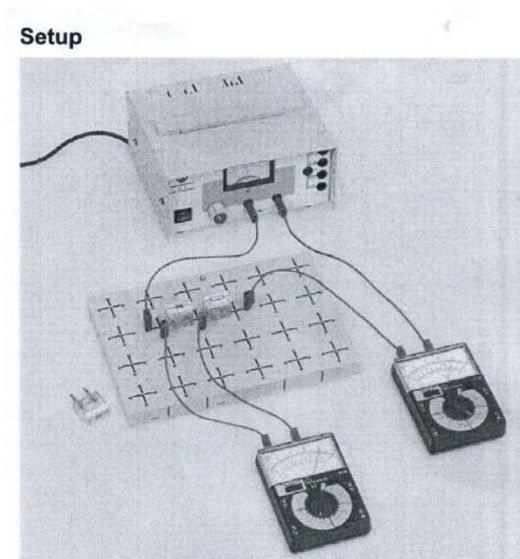
$$I = I_S \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$

Quando  $|eU| \ll kT$   $I \cong 0$ . Quando, invece,  $|eU| \gg kT$   $I \cong I_S e^{\frac{eU}{kT}}$  se  $U$  è positivo, mentre  $I \cong -I_S$  se  $U$  è negativo.

Nell'esperimento misureremo la caratteristica  $I(U)$  di diodi al Silicio e al Germanio, di due speciali diodi chiamati "Zener" e infine di diodi emettitori di luce (LED). Riporteremo le misure in grafico confrontando il comportamento elettrico in diretta e in inversa dei vari diodi.

### L'apparato sperimentale

L'apparato sperimentale per misurare la  $I(U)$  di un diodo è illustrato in figura.



## Conduzione dell'esperimento

Collegate il diodo secondo lo schema di figura a illustrato in appendice (polarizzazione in diretta). FARE ATTENZIONE a selezionare un intervallo di valori di ddp sul multimetro che non danneggi in dispositivo (la corrente non deve superare 25 mA). Aumentare lentamente la ddp U partendo da 0V e annotare la corrente. Riempire una tabella simile alla Tabella 1.

Table 1 : Diodes in conducting-state (forward) direction

Si-Diode 1 N 4007		Ge-Diode AA 118	
$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$
0	0	0	0
0.2	0	0.2	0
0.4	0.1	0.3	0.6
0.5	0.2	0.4	1.3
0.62	5	0.5	2.0
0.67	10	0.6	3.0
0.69	15	0.75	5
0.71	20	1.05	10
0.72	25	1.30	15
0.73	30	1.55	20
		1.75	25
		1.95	30

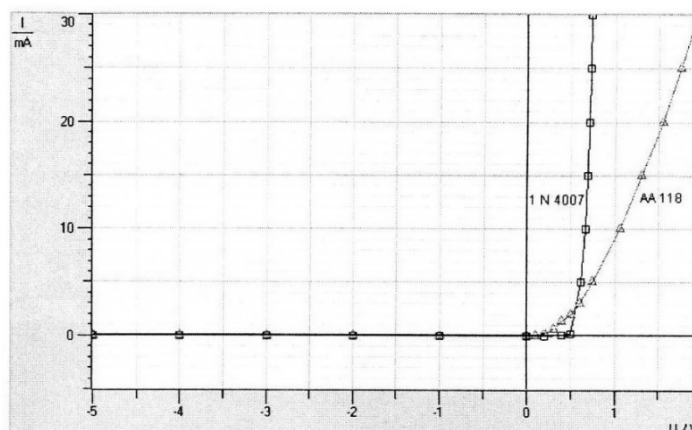
Invertire ora i collegamenti del circuito con i poli del generatore come nello schema di figura b, polarizzando così il diodo in inversa, e aumentare lentamente il potenziale partendo da 0 V, fino ad un valore massimo di 5 V e riempire una tabella simile alla Tabella 2.

Table 2 : Diodes in reverse direction

	Si-Diode 1 N 4007	Ge-Diode AA 118
$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{I}{mA}$
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0

Ripetere lo stesso esperimento col diodo al Ge.

Produrre infine il grafico seguente:



In polarizzazione diretta ( $U > 0$ ). Dalla curva sperimentale possiamo calcolare il “potenziale di soglia”  $U_s$  come quel potenziale esterno applicato al di sotto del quale la corrente nel diodo è praticamente zero, mentre al di sopra del quale la corrente aumenta molto rapidamente con la tensione applicata. Il potenziale di soglia  $U_s$  si determina interpolando con una retta due punti consecutivi delle nostre misure che corrispondono ad una corrente significativa.

Se andiamo sopra soglia la corrente aumenta molto rapidamente con  $U$ . Per il diodo al Si  $U_s \approx 0,7$  V, mentre per il diodo al Ge  $U_s \approx 0,3$  V. In polarizzazione inversa ( $U < 0$ ) la corrente è praticamente nulla.

**Misuriamo ora nello stesso modo la caratteristica  $I(U)$  dei due diodi Zener.** Sia per la polarizzazione diretta che per quella inversa teniamo sempre 25 mA come massimo valore di corrente. Le tabelle che otteniamo sono del tipo di quelle riportate sotto.

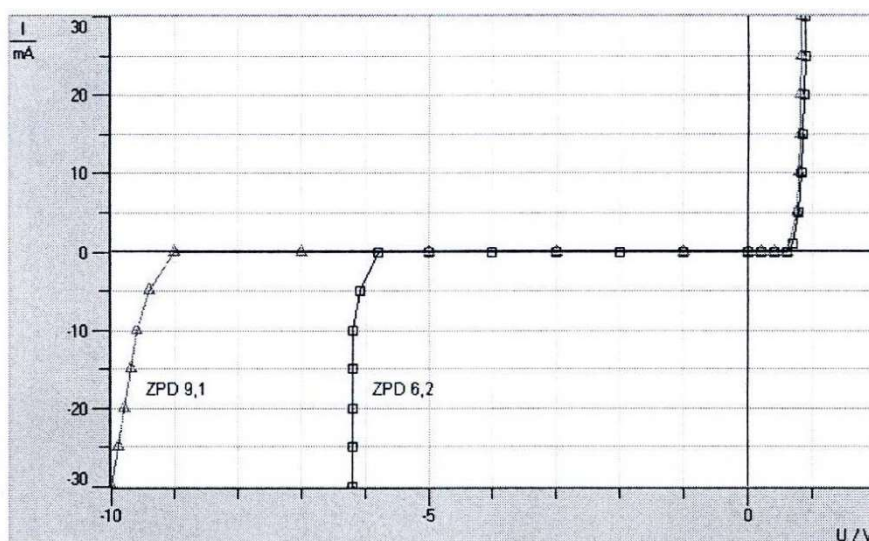
Table 1 : Z-diodes in conducting-state direction

Z-Diode ZPD 6,2		Z-Diode ZPD 9,1	
$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$
0	0	0	0
0.2	0	0.2	0
0.4	0	0.4	0
0.6	0	0.6	0
0.7	1.0	0.7	0
0.78	5	0.76	5
0.82	10	0.78	10
0.84	15	0.80	15
0.86	20	0.81	20
0.88	25	0.82	25
0.90	30	0.83	30

Table 2 : Z-diodes in reverse direction

Z-Diode ZPD 6,2		Z-Diode ZPD 9,1	
$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$
0	0	0	0
1	0	1	0
2	0	3	0
3	0	5	0
4	0	7	0
5.8	0	9	0
6.1	5	9.4	5
6.2	10	9.6	10
6.2	15	9.7	15
6.2	20	9.8	20
6.2	25	9.9	25
6.2	30	10	30

Il grafico della  $I(U)$  è il seguente:



In polarizzazione diretta i diodi Zener si comportano come i diodi al Si e al Ge. In polarizzazione inversa esiste un potenziale di soglia, detto di “breakdown” a cui si manifesta un effetto “valanga” e la resistenza del diodo diventa piccolissima. Aumentando la corrente la ddp ai capi del diodo rimane

praticamente costante. Dunque questo diodo, a differenza dei due diodi precedentemente esaminati, è capace di resistere al forte passaggio di corrente e mantiene ai suoi capi la tensione  $U_z$ . Per questa caratteristica, i diodi Zener sono spesso impiegati come limitatori di tensione.

**Misuriamo infine nello stesso modo la caratteristica  $I(U)$  di diodi LED di colore diverso.**

### Ancora fondamenti teorici

I LED producono luce attraverso il processo di ricombinazione elettrone-lacuna. Gli elettroni e le lacune vengono iniettati nella zona della giunzione, dove avviene la ricombinazione, dalle due regioni del diodo drogate con impurità di tipo diverso (cioè di tipo n per gli elettroni e p per le lacune) quando il diodo è sottoposto ad una tensione diretta che riduce la barriera di potenziale della giunzione. Gli elettroni della banda di conduzione del semiconduttore si ricombinano con le lacune della banda di valenza rilasciando energia sufficiente sotto forma di fotoni. A causa dello spessore ridotto del chip, un ragionevole numero di questi fotoni può abbandonarlo ed essere emesso come luce. Il LED è quindi un trasduttore elettro-ottico.



Simbolo circuitale del LED

Il colore o frequenza della radiazione emessa è definito dalla distanza in energia tra i livelli energetici di elettroni e lacune e corrisponde tipicamente al valore della banda proibita (energy gap) del semiconduttore in questione. L'esatta scelta dei semiconduttori determina dunque la lunghezza d'onda dell'emissione di picco dei fotoni e l'efficienza nella conversione elettro-ottica e quindi l'intensità luminosa in uscita.

I LED possono essere formati da GaAs (arseniuro di gallio), GaP (fosfuro di gallio), GaAsP (fosfuro arseniuro di gallio), SiC (carburo di silicio) e GaInN (nitruro di gallio e indio). Ricordando che l'energia dei fotoni è legata alla frequenza dalla formula  $E=h\nu$  e che lunghezza d'onda e frequenza sono legate alla velocità  $c$  di propagazione dei fotoni dalla formula:  $\lambda\nu = c$ , la relazione che lega l'energy gap  $\Delta$  alla lunghezza d'onda della luce emessa è:

$$\Delta = h \frac{c}{\lambda}$$

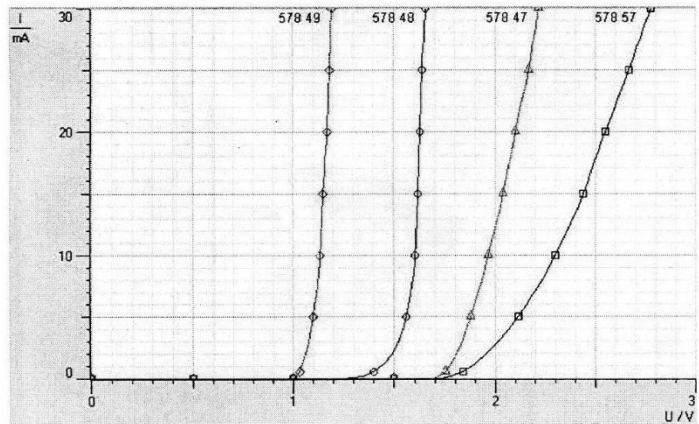
dove  $e$  è la carica dell'elettrone ( $1,6 \times 10^{-19}$  C),  $h$  è la costante di Planck ( $h=6,62 \times 10^{-34}$  Js),  $c$  la velocità della luce nel vuoto (che coincide in pratica con la velocità della luce in aria e vale  $3 \times 10^8$  m/s) e  $\lambda$  è la lunghezza d'onda della luce emessa dal LED. Da un punto di vista sperimentale una stima della lunghezza d'onda della luce emessa si può ottenere misurando il potenziale di soglia dalla caratteristica  $I(U)$  in diretta del diodo e sostituendolo a primo membro dell'uguaglianza precedente.

### Apparato Sperimentale

Abbiamo a disposizione diodi che emettono nell'I.R., nel rosso, nel giallo e nel verde. Per la polarizzazione diretta (unica ad essere interessante per questo diodo) teniamo **10 mA come massimo valore di corrente** (vedi figura e in appendice). La tabella che otteniamo è del tipo di quella riportata sotto.

Table : Light emitting diodes in conducting-state direction

green 578 57		yellow 578 47		red 578 48		infrared 578 49	
$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$
0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0.5	0	0.5	0	0.5	0
1.0	0	1.0	0	1.0	0	1.0	0
1.5	0	1.5	0	1.40	0.5	1.03	0.5
1.84	0.5	1.75	0.5	1.56	5	1.10	5
2.12	5	1.88	5	1.60	10	1.13	10
2.30	10	1.97	10	1.61	15	1.15	15
2.43	15	2.03	15	1.63	20	1.16	20
2.57	20	2.10	20	1.64	25	1.18	25
2.67	25	2.17	25	1.66	30	1.19	30
2.78	30	2.22	30				



Determinando dal grafico il potenziale di soglia  $U_S$  è possibile stimare la lunghezza d'onda della luce emessa attraverso la formula precedente e confrontarla con quella dichiarata dal costruttore

Cat. No.	Colour	Threshold voltage $\frac{U_S}{V}$	Wave-length $\frac{\lambda}{nm}$
578 57	green (appr. 500...580 nm)	2.1	590
578 47	yellow (appr. 590 nm)	1.9	650
578 48	red (appr. 600...800 nm)	1.6	780
578 49	Infrared ( > 800 nm)	1.1	1100

La lunghezza d'onda misurata risulta sistematicamente più grande di quella dichiarata sul LED. Questo accade perché noi abbiamo ipotizzato che tutta l'energia potenziale elettrica si converta in luce, mentre in realtà una piccola frazione dell'energia fornita al diodo viene "persa" in altri processi non radiativi.

## Appendice: Schemi dei collegamenti elettrici

## DIODO al Silicio o al Germanio

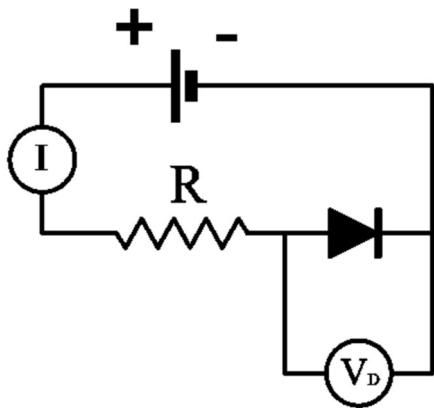


Figura a:  $I_{MAX} = 25 \text{ mA}$

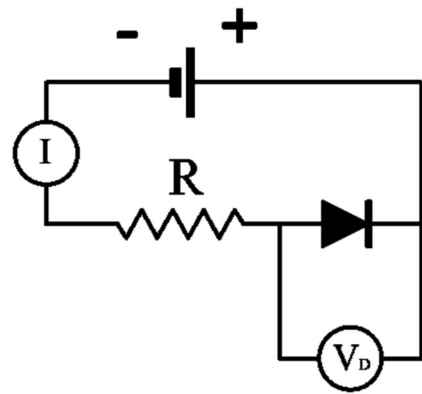


Figura b:  $-V_{D_{MAX}} = -5 \text{ volt}$

## DIODO ZENER (Zener 6.2 oppure Zener 9.1)

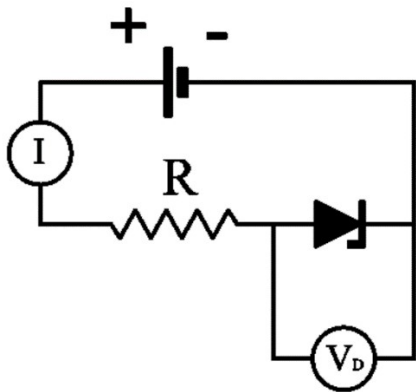


Figura c:  $I_{MAX} = 25 \text{ mA}$

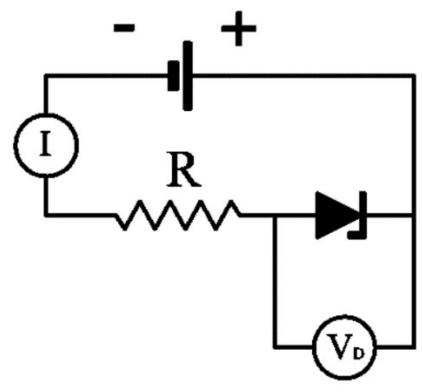


Figura d:  $-V_{D_{MAX}} = -7 \text{ V}$  (zener 6.2)  
 $-10 \text{ V}$  (zener 9.1)

## LED

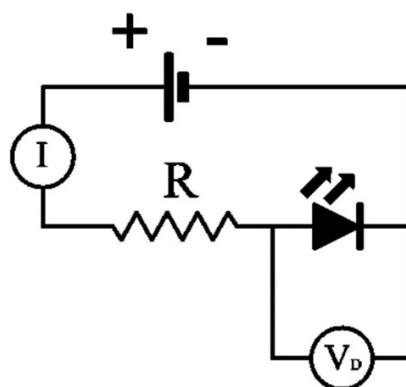


Figura e:  $I_{MAX} = 10 \text{ mA}$