# Dispositivi elettronici – AA2018/19

## Homework 02

Valerio Nappi

https://5n44p.github.io/triennale-elettronica-polimi/

**Consegna**

E1 – La Figura 1 rappresenta schematicamente un resistore integrato realizzato in uno strato di silicio drogato con atomi di fosforo in concentrazione $N_D=5x10^{15}$ $cm^{-3}$. Le dimensioni geometriche sono $\Delta$=1μm, W=5μm, L=50μm.

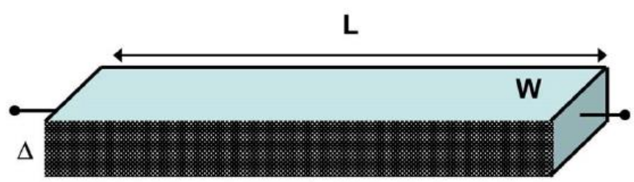


*Figura 1. Resistore integrato*

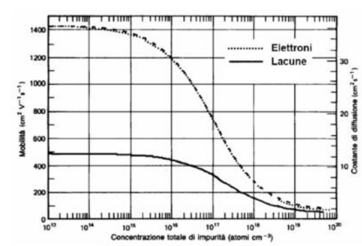


*Figura 2. Mobilità di lacune ed elettroni in strati di silicio drogato*

a) Calcolare la concentrazione di maggioritari e minoritari.

b) Calcolare la resistività e la resistenza del resistore ricavando la mobilità di elettroni e lacune dal grafico in Figura 2.

c) Sapendo che le masse efficaci di elettroni e lacune sono pari a $m_n$*= $0.26m_0$, $m_h$*= $0.39m_0$ con $m_0$=$9.11x10^{-31}$ Kg, stimare il tempo medio di urto di elettroni e lacune.

d) Determinare la corrente che lo attraversa quando ai suoi morsetti è applicata una tensione, $V_B$=0.5V.

e) Calcolare il tempo necessario ad un elettrone e ad una lacuna per attraversare il componente.

f) Quotare il numero medio di urti subito rispettivamente da lacune ed elettroni durante il transito lungo il componente.

# 1 Analisi del problema

Il problema consiste nello studio di un resistore a semiconduttore, realizzato su silicio con drogaggio di fosforo. Avendo il fosforo valenza 5, introdurrà nel cristallo semiconduttore un elettrone in più per ciascun atomo drogante. Assumendo che il dispositivo sia operato a temperatura ambiente, gli elettroni in più introdotti dal drogante saranno liberi per via termica. Parte degli elettroni liberi prenderà parte alla conduzione, e parte invece si ricombinerà con le lacune generate per via termica dagli atomi di silicio. Questo fenomeno è descritto dalla legge dell'azione di massa.

## 1.1 Concentrazione dei portatori

La legge dell'azione di massa prescrive che il prodotto tra concentrazione dei portatori di tipo $n$ e concentrazione dei portatori di tipo $p$ sia uguale al quadrato della concentrazione intrinseca dei portatori, che per il silicio vale $n_i = 1.45 \cdot 10^{10} cm^{-3}$. Essendo la concentrazione di drogante $N_d$ » $n_i$, si avrà che:

$$n \approx N_d = 5 \cdot 10^{15} cm^{-3}$$

E di conseguenza:

$$p \approx \frac{{n_i}^2}{N_d} = 4.2 \cdot 10^4 cm^{-3}$$

Si noti che, come ci si aspettava, la concentrazione dei portatori minoritari nel semiconduttore drogato è sensibilmente inferiore alla concentrazione dei portatori nel semiconduttore intrinseco.

## 1.2 Resistenza e resistività

Utilizzando la definizione di ampere come quantità di carica che attraversa la sezione del dispositivo in un secondo, si ha che:

$$I = q\ n\ (v_{d,n}\ A) + q\ p\ (v_{d,p}\ A)$$

Dove $q$ è la carica del portatore, $n$ e $p$ le densità dei portatori, $v_{d,n}$ i $v_{d,p}$ le velocità di deriva, A l'area della sezione del dispositivo. Esprimendo le velocità di deriva come il prodotto delle mobilità $\mu_n$ e $\mu_p$ per il campo elettrico $F$, e considerando il campo elettrico come uniforme con valore $F = V\ /\ L$, dove $V$ è la tensione ai capi del dispositivo e $L$ la sua lunghezza, si avrà:

$$I = q\ (\mu_n\ n + \mu_p\ p) \frac{A}{L}\ V$$

Considerando la prima legge di Ohm, si ottiene:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{V}{q\ (\mu_n\ n + \mu_p\ p)\ \frac{A}{L}\ V} = \frac{1}{q\ (\mu_n\ n + \mu_p\ p)}\ \frac{L}{A} = 96.2\ k\Omega$$

Dove le mobilità $\mu$ considerate sono estrapolate dalla Figura 2 come $\mu_n = 1300\ cm^2\ V^{-1}s^{-1}$ e $\mu_p = 450\ cm^2\ V^{-1}s^{-1}$.

Si noti che il contributo dei portatori minoritari ha peso notevolmente inferiore a quello dei maggioritari, avendo concentrazione di molto inferiore. Si sarebbe, infatti, potuto trascurare il contributo dei portatori minoritari, senza influenzare il risultato.

Si considera ora la seconda legge di Ohm per ricavare la resistività:

$$\rho = R\ \frac{A}{L} = \frac{1}{q\ (\mu_n\ n + \mu_p\ p)} = 0.962\ \Omega\text{cm}$$

### 1.3 Tempo medio di urto

Si considera dapprima il tempo medio di urto degli elettroni. La mobilità dell'elettrone è definita come:

$$\mu_n = \frac{\overline{v_d}}{F} = \frac{q\ \tau_n}{{m_n}^*}$$

Il tempo medio di urto sarà quindi:

$$\tau_n = \frac{\mu_n\ {m_n}^*}{q} = \frac{\mu_n\ 0.26\ m_0}{q} = 192\ fs$$

Per le lacune si avrà, parimenti:

$$\tau_p = \frac{\mu_p\ {m_p}^*}{q} = \frac{\mu_p\ 0.39\ m_0}{q} = 99.9\ fs$$

### 1.4 Corrente per $V_B$=0.5V

Sfruttando la legge di Ohm, si ricava che:

$$I = \frac{V}{R} = 5.20\ \mu A$$

### 1.5 Tempo di attraversamento dei portatori

Conoscendo la velocità di deriva del portatore, assumendo di lavorare alle condizioni di cui al punto precedente ($V_B$=0.5V) e conoscendo la lunghezza del dispositivo, è possibile calcolare il tempo di attraversamento:

$$t_n = \frac{L}{v_{d,n}} = \frac{L}{\mu_n \ F} = \frac{L^2}{\mu_n \ V} = \ 38.46 \ ns$$

Per le lacune si avrà invece:

$$t_p = \frac{L}{v_{d,p}} = \frac{L}{\mu_p \ F} = \frac{L^2}{\mu_p \ V} = \ 111.1 \ ns$$

### 1.6 Numero di urti medio dei portatori

Per ottenere il numero di urti medio dei portatori durante il transito, è sufficiente calcolare il rapporto tra il tempo medio speso nel dispositivo ed il tempo medio d'urto, come segue. Per gli elettroni:

$$N_{urti,n} = \frac{t_n}{\tau_n} = 200\ 000 \ urti$$

E per le lacune:

$$N_{urti,p} = \frac{t_p}{\tau_p} = 1\ 112\ 112 \ urti$$

Dove il tempo speso nel dispositivo è riferito ad una tensione $V_B$ di $0.5V$, come nei punti 1.4 e 1.5.