

Dispositivi elettronici – AA2018/19

Homework 05

Valerio Nappi

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

Consegna

Si consideri la giunzione p-n realizzata in *Figura 1* con $N_A=1\cdot 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ed $N_D=1\cdot 10^{17}\text{cm}^{-3}$. Le dimensioni del dispositivo sono riportati in *Tabella 1*.

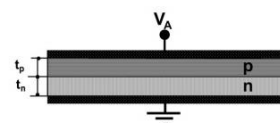


Figura 1. Giunzione p-n.

- Calcolare il potenziale di built-in, Φ_{bi} , ai capi della giunzione
- Determinare valore e verso della tensione di polarizzazione da applicare per raggiungere un campo elettrico massimo di 200kV/cm .
- Riportare in grafico l'andamento della densità di carica spaziale e del campo elettrico, quotando chiaramente l'estensione della zona svuotata e l'estensione delle zone neutre residue.

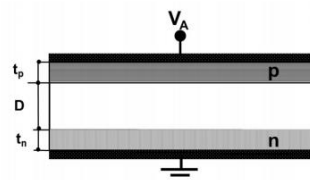


Figura 2. Giunzione p-i-n.

Spessore strato p:	$t_p=500\text{nm}$
Spessore strato n:	$t_n=500\text{nm}$
Spessore strato intrinseco:	$D=500\text{nm}$
Area giunzione	$A=100\mu\text{m}^2$

Tabella 1. Parametri

Si supponga ora di inserire tra le due zone n e p uno strato di silicio non drogato di spessore $D=500\text{nm}$ (*Figura 2*) e si polarizzi il componente per raggiungere il campo elettrico massimo di 200kV/cm :

- Riportare in grafici quotati gli andamenti della densità di carica spaziale e del campo elettrico.
- Che tensione V_A si deve applicare ai capi del dispositivo in *Figura 2* per portarsi nelle condizioni di campo elettrico richieste?
- Che valore ha la capacità del dispositivo attorno a questo punto di lavoro?

1 Analisi del problema

Si richiede lo studio di due giunzioni $p-n$ simmetriche realizzate su silicio. Si assume di studiare il dispositivo a temperatura ambiente (300 K). Si assume come concentrazione dei portatori intrinseci $n_i=1\cdot 10^{10}\text{cm}^{-3}$

1.1 Potenziale di built-in

Il potenziale di built-in della giunzione è funzione dei drogaggi delle due regioni della giunzione, della concentrazione di portatori intrinseci n_i e della temperatura, secondo la relazione:

$$\Phi_{b.i.} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right)$$

Studiando il dispositivo a temperatura ambiente ($\frac{kT}{q} = 25.86 \text{ mV}$), la tensione di built-in sarà:

$$\Phi_{b.i.} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) = 837 \text{ mV}$$

1.2 Polarizzazione al campo elettrico massimo

La polarizzazione diretta di una giunzione tende ad annullare la differenza di potenziale alla giunzione, e quindi il suo campo elettrico. Per sviluppare il campo elettrico massimo sulla giunzione, sarà necessario polarizzare il dispositivo in inversa.

Ci si aspetta di riscontrare il campo elettrico massimo nel punto di giunzione delle due regioni, essendo il punto in cui è massimo il numero di cariche contrapposte ai due lati. In questo punto viene collocata l'origine dell'asse x , che viene orientato dalla regione p alla regione n . La distribuzione di carica nel dispositivo sarà data da:

$$\rho(x) = \begin{cases} -qN_A & -x_p < x < 0 \\ qN_D & 0 < x < x_n \end{cases}$$

Dove x_p e x_n sono rispettivamente l'estensione della regione di deplezione nella zona p e nella zona n . Il campo elettrico sarà dato da:

$$E(x) = \frac{\int \rho(x) dx}{\epsilon_{Si}} = \frac{1}{\epsilon_{Si}} \begin{cases} -qN_A \int 1 dx & -x_p < x < 0 \\ qN_D \int 1 dx & 0 < x < x_n \end{cases}$$

$$E(x) = \begin{cases} -\frac{qN_A}{\varepsilon_{Si}}x + c_1 & -x_p < x < 0 \\ \frac{qN_D}{\varepsilon_{Si}}x + c_2 & 0 < x < x_n \end{cases}$$

Si considerano le condizioni al contorno per determinare i valori di c_1 e c_2 . In particolare, si considera che il campo elettrico sarà nullo al di fuori della regione di deplezione.

$$E(-x_p) = 0 \Rightarrow \frac{qN_A}{\varepsilon_{Si}}x_p + c_1 = 0 \Rightarrow c_1 = -\frac{qN_A}{\varepsilon_{Si}}x_p$$

$$E(x_n) = 0 \Rightarrow \frac{qN_D}{\varepsilon_{Si}}x_n + c_2 = 0 \Rightarrow c_2 = -\frac{qN_D}{\varepsilon_{Si}}x_n$$

L'espressione del campo elettrico sarà quindi:

$$E(x) = \begin{cases} -\frac{qN_A}{\varepsilon_{Si}}(x + x_p) & -x_p < x < 0 \\ \frac{qN_D}{\varepsilon_{Si}}(x - x_n) & 0 < x < x_n \end{cases}$$

Il campo elettrico dovrà essere inoltre continuo nel punto di contatto delle due regioni, si impone dunque:

$$-\frac{qN_A}{\varepsilon_{Si}}(0 + x_p) = \frac{qN_D}{\varepsilon_{Si}}(0 - x_n) \Rightarrow \frac{qN_A}{\varepsilon_{Si}}x_p = \frac{qN_D}{\varepsilon_{Si}}x_n \Rightarrow N_A x_p = N_D x_n$$

Essendo $N_A = N_D$, si avrà $x_p = x_n$. Questo risultato si sarebbe potuto anticipare osservando la simmetria del dispositivo. Nel punto di ascissa zero il campo elettrico è noto e massimo, è quindi possibile calcolare l'ampiezza delle regioni di carica scoperta.

$$x_p = x_n = \frac{\varepsilon_{Si}}{qN_D} E_{Max} = 131 \text{ nm}$$

Integrando il campo elettrico tra $-x_p$ e x_n si ricava la tensione ai capi della giunzione:

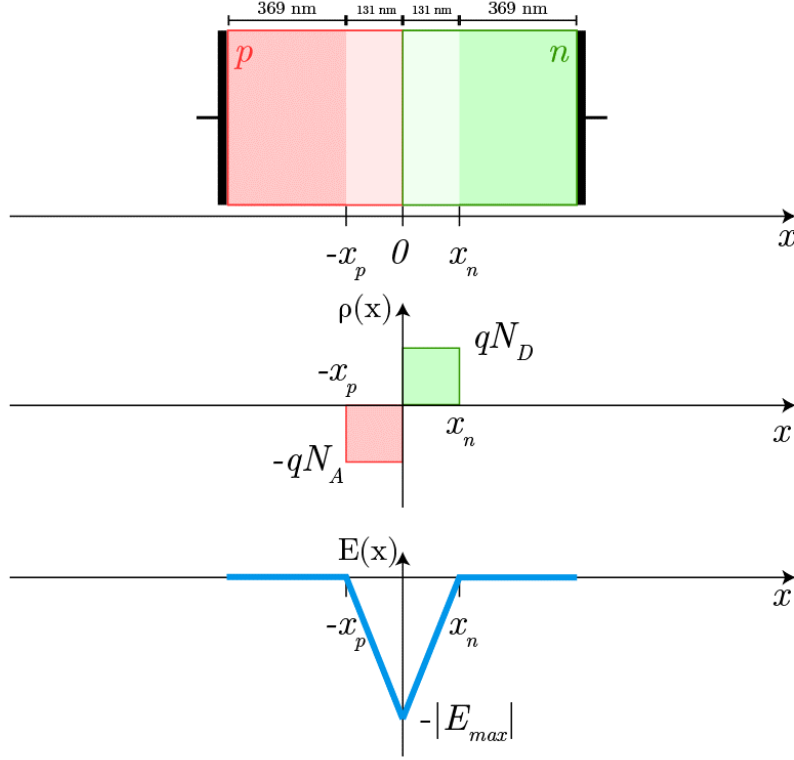
$$V = - \int_{-x_p}^{x_n} E(x) dx = - \int_{-x_p}^0 \frac{qN_A}{\varepsilon_{Si}}(x + x_p) dx - \int_0^{x_n} \frac{qN_D}{\varepsilon_{Si}}(x - x_n) dx$$

$$V_{bd} + \Phi_{b.i.} = \frac{qN_A}{\varepsilon_{Si}}x_p^2 = \frac{qN_D}{\varepsilon_{Si}}x_n^2$$

La tensione inversa massima applicabile sarà quindi:

$$V_{bd} = \frac{qN_A}{\varepsilon_{Si}}x_p^2 - \Phi_{b.i.} = 2.62V - 0.837V = 1.78V$$

1.3 Grafici

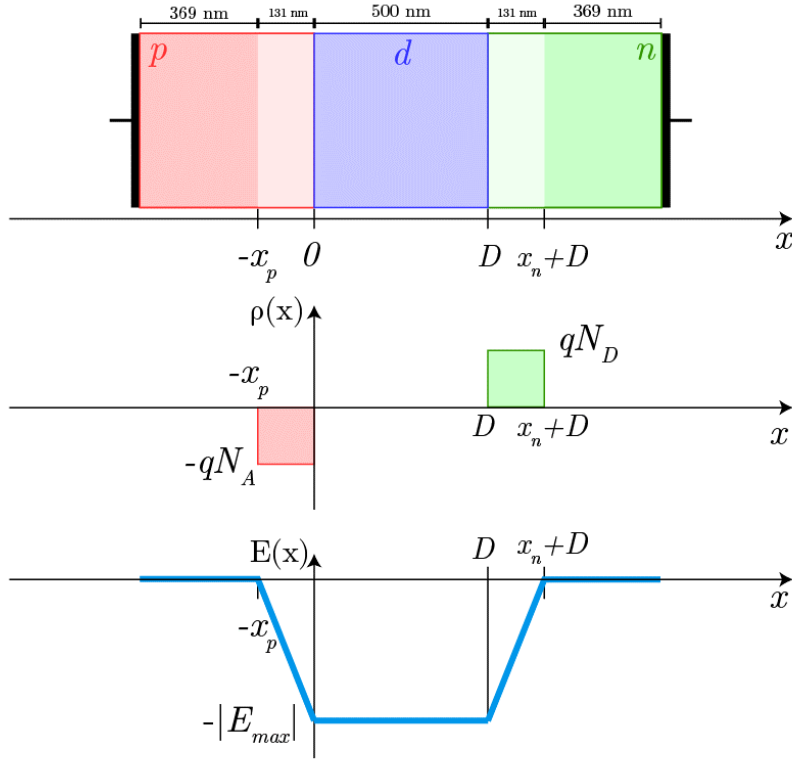


Si noti che il segno del campo elettrico è dipendente dalla scelta del verso dell'asse x , e con la convenzione utilizzata risulta negativo. Si noti inoltre che essendo il potenziale elettrico definito come integrale del campo elettrico, si sarebbe potuto ottenere, in modo del tutto equivalente, per via geometrica dal grafico. Infatti:

$$V_{bd} + \Phi_{b.i.} = \frac{(x_n + x_p)E_{Max}}{2} = 2.62V$$

1.4 Grafici del dispositivo con regione intrinseca

Nel caso di un dispositivo con una regione di silicio intrinseco inserita tra le regioni p ed n, la densità di carica nelle regioni svuotate resta immutata, e non si presenterà carica elettrica nella regione di silicio intrinseco. Non essendo presente carica nella regione intrinseca, il campo elettrico è costante attraverso la lunghezza D della zona intrinseca. Le grandezze richieste per questo dispositivo saranno quindi:



1.5 Tensione V per $E_{max} = 200kV/cm$

Applicando il metodo grafico dimostrato ai punti 1.2 e 1.3, è possibile ricavare la tensione da applicare alla giunzione, tale per cui si sviluppi il campo elettrico massimo ammissibile. Rispetto al dispositivo studiato nei punti precedenti, si considera l'aggiunta di un'area rettangolare di base D e di altezza E_{max} . La tensione sarà quindi:

$$V_{bd} + \Phi_{b.i.} = \frac{(x_n + x_p)E_{Max}}{2} + E_{Max} D = 12.62V$$

1.6 Capacità di giunzione

In polarizzazione inversa si presenterà ai capi del dispositivo solo la capacità di svuotamento, data dalla variazione della quantità di carica esposta nelle zone svuotate. La capacità di svuotamento è data da:

$$C_j = \frac{\varepsilon_{Si} A}{W} = \frac{\varepsilon_{Si} A}{x_n + x_p + D} = 13.83 \text{ fF}$$