

PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 1 luglio 2026

ESERCIZIO 1

Una giunzione pn a drogaggio simmetrico ($\mu_n = 1100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, lunghezza di ciascuna base $W_n = W_p = 4 \text{ }\mu\text{m}$, $S = 1 \text{ mm}^2$, basi corte) è polarizzato in inversa, con una caduta di tensione totale tra parte n e parte p pari a 21 V. Il campo elettrico massimo è risultato pari a 14 MV/m.

- 1) Determinare il drogaggio delle basi e la tensione esterna applicata.[4]
- 2) Tracciare il profilo quotato dei portatori minoritari nelle basi e il profilo dell'eccesso dei portatori minoritari nelle basi.[3]
- 3) Determinare la corrente nel diodo, e confrontarla con quella che si avrebbe con una tensione esterna applicata pari a $V = -0.5 \text{ V}$. [3]

ESERCIZIO 2

Un transistor n -MOS polysilicon gate, $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t_{ox} = 20 \text{ nm}$, $\mu_n = 0.09 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $W = L = 1 \text{ }\mu\text{m}$, è polarizzato con $V_{GS} = 3 \text{ V}$, $V_{DS} = 1.5 \text{ V}$.

- 1) Una volta determinata la corrente I_{DS} , usando le approssimazioni usuali determinare la concentrazione delle cariche fisse e mobili in $y = 0$ e $y = L$. [3]
- 2) Si consideri l'ampiezza della regione di svuotamento variabile da Source a Drain, dipendente dalla tensione nel canale. Determinare la concentrazione delle cariche fisse in $y = 0$ e $y = L$. [3]
- 3) Si ripercorra la dimostrazione che permette di ricavare I_{DS} in funzione di V_{DS} , sottolineando le approssimazioni necessarie. Si determini l'espressione $I_{DS}(V_{DS})$ che si ha nel caso in cui non si trascuri la dipendenza della Q_W dalla tensione nel canale. [4]

ESERCIZIO 3

Il germanio ha un bandgap di 0.67 eV (a temperatura ambiente); le densità equivalenti degli stati sono simili per gli elettroni e le lacune, e uguali a circa 10^{19} cm^{-3} a temperatura ambiente.

La mobilità degli elettroni (a temperatura ambiente) risulta $0.39 \text{ m}^2/\text{Vs}$ (silicio: $0.14 \text{ m}^2/\text{Vs}$) per gli elettroni e $0.19 \text{ m}^2/\text{Vs}$ (silicio: $0.045 \text{ m}^2/\text{Vs}$).

- 1) Determinare la resistività del germanio intrinseco, e compararla con quella del silicio. Esprimere la resistività in Ωm e in Ωcm . [4]
- 2) Un pezzo di germanio e un pezzo di silicio vengono drogati con atomi donatori $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Confrontare le due resistività, assumendo che le mobilità si degradino del 30% a causa dell'introduzione delle impurezze. [3]
- 3) Considerare i due pezzi di semiconduttore drogati del punto 2. Determinare la concentrazione di portatori nel germanio a $300 \text{ }^\circ\text{C}$ confrontandola con quella del silicio alla stessa temperatura. Discutere il risultato. [3]

ESERCIZIO 1

Una giunzione pn a drogaggio simmetrico ($\mu_n = 1100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, lunghezza di ciascuna base $W_n = W_p = 4 \text{ }\mu\text{m}$, $S = 1 \text{ mm}^2$, basi corte) è polarizzato in inversa, con una caduta di tensione totale tra parte n e parte p pari a 21 V. Il campo elettrico massimo è risultato pari a 14 MV/m.

- 1) Determinare il drogaggio delle basi e la tensione esterna applicata.[4]
- 2) Tracciare il profilo quotato dei portatori minoritari nelle basi e il profilo dell'eccesso dei portatori minoritari nelle basi.[3]
- 3) Determinare la corrente nel diodo, e confrontarla con quella che si avrebbe con una tensione esterna applicata pari a $V = -0.5 \text{ V}$. [3]

SOLUZIONE 1

1) Per prima cosa, dobbiamo calcolare l'ampiezza della regione di svuotamento. Possiamo usare la relazione $W\mathcal{E}_{max}/2 = 21 \text{ V}$, cioè l'area del profilo del campo elettrico in funzione di x è pari alla differenza di tensione totale:

$$\begin{aligned} 21 &= \frac{W\mathcal{E}_{max}}{2} \\ W &= 2\frac{21}{\mathcal{E}_{max}} = 3 \text{ }\mu\text{m} \end{aligned}$$

Quindi ($N_A = N_D = N$):

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{max} &= \frac{qN_A x_p}{\epsilon_s} = \frac{qN_D x_n}{\epsilon_s} = \frac{qN W}{\epsilon_s} \\ N_A = N_D = N &= \frac{2\epsilon_s \mathcal{E}_{max}}{qW} = 6 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \\ V_0 &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} = 0.67 \text{ V} \\ V_{applicata} &= 21 - V_0 = 20.33 \text{ V} \end{aligned}$$

Questo è il valore assoluto, la tensione esterna applicata è pari a $V = -20.33 \text{ V}$.

2) Il profilo dei portatori minoritari è lineare, perchè la base è corta. Vale 0 in $-x_p = -1.5 \text{ }\mu\text{m}$ e in $x_n = 1.5 \text{ }\mu\text{m}$, e vale $\frac{n_i^2}{N}$ in W_n e W_p . Il profilo dell'eccesso è traslato di $-\frac{n_i^2}{N}$: vale $-\frac{n_i^2}{N}$ in $-x_p$ e x_n e vale 0 in W_n e W_p .

3) La corrente è quella di saturazione inversa:

$$\begin{aligned} D_n &= \frac{kT}{q} \mu_n = 2.84 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \\ D_p &= \frac{kT}{q} \mu_p = 1.03 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \\ I &= -qS \frac{n_i^2}{N} \left(\frac{D_n}{W_p - x_p} + \frac{D_p}{W_n - x_n} \right) = -9 \text{ pA} \end{aligned}$$

Per $V = -0.5$ V cambia l'ampiezza della regione di svuotamento:

$$\begin{aligned}
 W(0.5 \text{ V}) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{2}{N} (0.5 + 0.67)} = 0.7 \text{ } \mu\text{m} \\
 x_n = x_p &= \frac{W}{2} = 0.35 \text{ } \mu\text{m} \\
 I &= -qS \frac{n_i^2}{N} \left(\frac{D_n}{W_p - x_p} + \frac{D_p}{W_n - x_n} \right) = -6 \text{ pA}
 \end{aligned}$$

ESERCIZIO 2

Un transistor n -MOS polysilicon gate, $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $t_{ox} = 20 \text{ nm}$, $\mu_n = 0.09 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $W = L = 1 \text{ } \mu\text{m}$, è polarizzato con $V_{GS} = 3 \text{ V}$, $V_{DS} = 1.5 \text{ V}$.

1) Una volta determinata la corrente I_{DS} , usando le approssimazioni usuali determinare la concentrazione delle cariche fisse e mobili in $y = 0$ e $y = L$. [3]

2) Si consideri l'ampiezza della regione di svuotamento variabile da Source a Drain, dipendente dalla tensione nel canale. Determinare la concentrazione delle carica fissa in $y = 0$ e $y = L$. [3]

3) Si ripercorra la dimostrazione che permette di ricavare I_{DS} in funzione di V_{DS} , sottolineando le approssimazioni necessarie. Si determini l'espressione $I_{DS}(V_{DS})$ che si ha nel caso in cui non si trascuri la dipendenza della Q_W dalla tensione nel canale. [4]

SOLUZIONE 1

1) Determiniamo la tensione di soglia, e notiamo che $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$, quindi siamo in zona triodo:

$$\begin{aligned}
 C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.726 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2 \\
 \psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \text{ V} \\
 \phi_{MS} &= -\frac{E_g}{2q} - \psi_B = -0.887 \text{ V} \\
 V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \phi_{MS} = 0.09 \text{ V} \\
 I_{DS} &= \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left((V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right) = 0.5 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

In $y = 0$ le due cariche (negative, per unità di superficie) risulteranno:

$$\begin{aligned}
 Q_n &= C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) = 5.02 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2 \\
 Q_W &= \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B} = 4.84 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2
 \end{aligned}$$

Con l'approssimazione di carica fissa costante nel canale, che abbiamo considerato usando la formula per I_{DS} , in $y = L$ avremo che Q_W si approssima come uguale a quella in 0, mentre Q_n risulta:

$$Q_n(y = L) = C_{ox} (V_{GS} - V_{TH} - V_{DS}) = 5.02 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2 \quad (1)$$

2) La carica fissa nel canale dipende da $V(y)$, e questa dipendenza viene trascurata quando usiamo le formule standard per calcolare la I_{DS} . Nel caso di $y = 0$ non cambia niente rispetto al punto 1), in quanto $V(y = 0) = 0$. Per $y = L$ avremo che la caduta di tensione nel silicio per la soglia dell'inversione è pari a $2\psi_B + V(y = l) = 2\psi_B + V_{DS}$:

$$Q_W(y = L) = \sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\psi_B + V_{DS})} = 4.84 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2 \quad (2)$$

3) Si rimanda alle pagine 254 e 255 delle dispense. Si chiede in particolare di sottolineare l'approssimazione di canale graduale e l'approssimazione di mobilità costante nel canale. Arrivati alla formula integrale, si procede analiticamente e si ottiene una espressione di I_{DS} funzione di $V_{DS}^{\frac{3}{2}}$, come riportato nelle dispense.

ESERCIZIO 3

Il germanio ha un bandgap di 0.67 eV (a temperatura ambiente); le densità equivalenti degli stati sono simili per gli elettroni e le lacune, e uguali a circa 10^{19} cm^{-3} a temperatura ambiente.

La mobilità degli elettroni (a temperatura ambiente) risulta $0.39 \text{ m}^2/\text{Vs}$ (silicio: $0.14 \text{ m}^2/\text{Vs}$) per gli elettroni e $0.19 \text{ m}^2/\text{Vs}$ (silicio: $0.045 \text{ m}^2/\text{Vs}$).

1) Determinare la resistività del germanio intrinseco, e compararla con quella del silicio. Esprimere la resistività in Ωm e in Ωcm . [4]

2) Un pezzo di germanio e un pezzo di silicio vengono drogati con atomi donatori $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Confrontare le due resistività, assumendo che le mobilità si degradino del 30% a causa dell'introduzione delle impurezze. [3]

3) Considerare i due pezzi di semiconduttore drogati del punto 2. Determinare la concentrazione di portatori nel germanio a 300°C confrontandola con quella del silicio alla stessa temperatura. Discutere il risultato. [3]

SOLUZIONE 1

1) La concentrazione intrinseca vale:

$$\begin{aligned} n_i^2 &= N_C N_V e^{-\frac{E_G}{kT}} \\ n_i &= 2.35 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

Quindi è più alta di quella del silicio, come potevamo aspettarci visto il gap più piccolo. La conducibilità, e quindi la resistività, risultano:

$$\begin{aligned} \sigma &= q n_i (\mu_n + \mu_p) = 2.2 \frac{1}{\Omega\text{m}} \\ \rho &= \frac{1}{\sigma} = 0.46 \Omega\text{m} = 46 \Omega\text{cm} \end{aligned}$$

per il silicio avremo una resistività molto più elevata ($n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$):

$$\begin{aligned}\sigma &= qn_i(\mu_n + \mu_p) = 4.45 \times 10^{-4} \frac{1}{\Omega\text{m}} \\ \rho &= \frac{1}{\sigma} = 2250 \text{ } \Omega\text{m} = 22.5 \text{ k}\Omega\text{cm}\end{aligned}$$

2) A temperatura ambiente avremo anche nel germanio $N_D \gg n_i$, quindi il semiconduttore è drogato di tipo n , con $n = N_D$. Avremo dunque ($\mu_n = 0.7 \times 0.39 = 0.273$):

$$\begin{aligned}\sigma &= q\mu_n n = 437 \frac{1}{\Omega\text{m}} \\ \rho &= \frac{1}{\sigma} = 0.0023 \text{ } \Omega\text{m} = 0.23 \Omega\text{cm}\end{aligned}$$

per il silicio avremo ($\mu_n = 0.7 \times 0.14 = 0.098$):

$$\begin{aligned}\sigma &= q\mu_n n = 157 \frac{1}{\Omega\text{m}} \\ \rho &= \frac{1}{\sigma} = 0.0064 \text{ } \Omega\text{m} = 0.64 \Omega\text{cm}\end{aligned}$$

La differenza tra silicio drogato e silicio non drogato è molto più elevata, perché n_i per il silicio è tre ordini di grandezza inferiore a quella del germanio.

3) Calcoliamo N_C e N_V a 600 K (300 °C), e conseguentemente n_i :

$$\begin{aligned}N_C(600) &= N_C(300) \left(\frac{600}{300} \right)^{\frac{3}{2}} = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \\ N_V(600) &= N_C(600) \\ kT(600) &= kT(300) \frac{600}{300} = 0.0517 \\ n_i(600) &= \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{E_G}{2kT}} = 1.53 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}\end{aligned}$$

Quindi il germanio a 300 °C è praticamente intrinseco, anche se drogato 10^{16} . Il silicio invece rimane drogato, perchè siamo ancora nel range di temperature di svuotamento. Infatti per il silicio avremo:

$$\begin{aligned}N_C(600) &= N_C(300) \left(\frac{600}{300} \right)^{\frac{3}{2}} = 7.9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \\ N_V(600) &= N_V(300) \left(\frac{600}{300} \right)^{\frac{3}{2}} = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \\ kT(600) &= kT(300) \frac{600}{300} = 0.0517 \\ n_i(600) &= \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{E_G}{2kT}} = 1.36 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}\end{aligned}$$

Quindi avremo ancora $N_D > n_i$.

MORALE: il germanio ha una resistività più bassa a temperatura ambiente, rispetto al silicio intrinseco, quindi sarebbe meglio. Tuttavia, quando è drogato, le resistività sono comparabili- vince ancora il germanio per la mobilità che è più alta. Il problema è che il germanio ritorna intrinseco a temperature molto più basse che del silicio.