

TRABAJO PRÁCTICO #2

Dispositivos Semiconductores 2024

Maestría en Ciencias de la Ingeniería – FI UBA

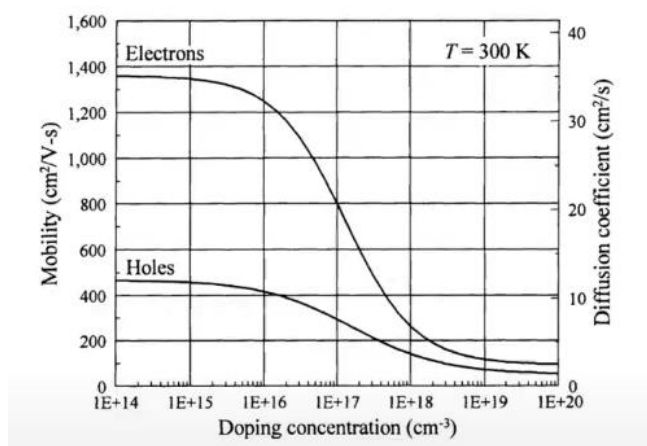
ING. MARIANO MOREL

DIODO PN

1. Hallar las movilidades y coeficientes de difusión para electrones y huecos de ambos lados de la juntura usando los datos de dopaje de la Tabla 1. Además, estimar la longitud característica de difusión y determinar si es válida la hipótesis de diodo corto.

N_a [1/cm ³]	N_d [1/cm ³]	W_n [μm]	W_p [μm]	$\tau_{n,p}$ [μs]	V_{app} [mV]
2×10^{14}	1×10^{15}	30	30	1 – 100	300

Usando el siguiente gráfico que representa la movilidad de los electrones en función de la concentración de dopaje, para ambos lados del material semiconductor, obtenemos cuatro valores de movilidad, según los valores de dopaje que se muestra en la tabla anterior.



Aproximadamente, se obtiene:

Para N_d :

$$\mu_n = 0.135 \text{ m}^2/\text{V.s}$$

$$\mu_p = 0.045 \text{ m}^2/\text{V.s}$$

Para N_a :

$$\mu_n = 0.138 \text{ m}^2/\text{V.s}$$

$$\mu_p = 0.48 \text{ m}^2/\text{V.s}$$

Para el cálculo del coeficiente de difusión y la longitud de difusión para cada dopaje, utilizamos las siguientes ecuaciones, tomando el peor caso τ_{np} que es el mínimo dado en la tabla:

$$D_n = \frac{\mu_n \cdot k \cdot T}{q}$$

$$L = \sqrt{D \cdot \tau}$$

Para Nd :

$$D_n = 0.0035 \text{ m}^2/\text{s}; \quad L_n = 5.912 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$D_p = 0.0012 \text{ m}^2/\text{s}; \quad L_p = 3.413 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Para Na :

$$D_n = 0.0036 \text{ m}^2/\text{s}; \quad L_n = 5.977 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$D_p = 0.0012 \text{ m}^2/\text{s}; \quad L_p = 3.525 \times 10^{-5} \text{ m}$$

* Los valores del coeficiente de difusión podrían haberse aproximado también del gráfico

La hipótesis de diodo corto asume que la región de depleción (zona sin portadores de carga) es mucho más pequeña que las longitudes de difusión de los portadores mayoritarios. Esto sugiere que los portadores mayoritarios difunden fácilmente a través de las regiones de depleción y el diodo se comporta principalmente como un dispositivo de contacto. Matemáticamente, esta hipótesis se puede expresar como:

$$W_p, W_n \ll L_p, L_n$$

En nuestro caso se cumple la hipótesis, incluso es menos restrictiva para el valor máximo de τ_{np} .

2. Calcular los siguientes parámetros para la juntura en equilibrio termodinámico (ETD): ψ_m ; x_n ; x_p y E_m

Para obtener $\psi_m = \psi_{bi}$ en ETD :

$$\psi_{bi} = \frac{E_{in} - E_{ip}}{-q} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_{no} p_{po}}{n_i^2} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d N_a}{n_i^2} \right)$$

Usamos esta ecuación (con $k = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ y $E_g = 1.12 \text{ eV}$):

$$n_i = \sqrt{N_v N_c} \exp \left[-\frac{E_c - E_v}{2kT} \right] = \sqrt{N_v N_c} \exp \left[-\frac{E_g}{2kT} \right]$$

$$\psi_{bi} = 0.5456 \text{ V y } n_i = 1.184 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

Así calculamos W_d (con $e_{si} = 11.7 \times e_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) :

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_{si} (N_a + N_d) \psi_m}{q N_a N_d}}$$

Dando $W_d := 2.0585 \times 10^{-6} \text{ m}$

Ahora con la siguiente ecuación obtenemos E_m :

$$\psi_m = \frac{\mathcal{E}_m (x_n + x_p)}{2} = \frac{\mathcal{E}_m W_d}{2}$$

Por lo tanto, $E_m = 5.3014 \times 10^5 \text{ V/m}$

Finalmente con la siguiente ecuación obtendremos x_n :

$$\mathcal{E}_m = \left| -\frac{d\psi_i}{dx} \right|_{x=0} = \frac{q N_{d,a} x_{n,p}}{\epsilon_{Si}}$$

Así $x_n = 3.4308 \times 10^{-7} \text{ m}$

Como conocemos $W_d = x_n + x_p$ despejando se obtiene $x_p = 1.7154 \times 10^{-6} \text{ m}$. Se podría haber calculado desde la ecuación de E_m y hubiera dado el mismo resultado.

3. Repetir el ítem anterior al aplicar la tensión V_{app} especificada en la Tabla 1.

La $\psi_{bi} = 0.5456 \text{ V}$, ya calculada en el punto anterior. Así es posible obtener $\psi_m = \psi_{bi} - V_{app} = 0.5456 - 0.3 \text{ V} = 0.2456 \text{ V}$.

Como $\psi_m < \psi_{bi}$ (juntura en directa). En las condiciones que estamos volviendo a usar las mismas ecuaciones del punto 2 para calcular los parámetros pedidos.

$W_d = 1.3812 \times 10^{-6} \text{ m}$
 $E_m = 3.5571 \times 10^5 \text{ V/m}$
 $x_n = 2.3020 \times 10^{-7} \text{ m}$
 $x_p = 1.1510 \times 10^{-6} \text{ m}$

4. Calcular la densidad de corriente que circula por el diodo cuando se aplica V_{app} . ¿Qué porcentaje de la corriente corresponde a electrones y huecos?

Combinando las siguientes ecuaciones:

$$J_n = q D_n \frac{dn_p}{dx} = -\frac{q D_n n_i^2}{W_p N_a} \left[\exp \left(\frac{V_{app}}{V_{th}} \right) - 1 \right]$$

$$J_p = -q D_p \frac{dp_n}{dx} = -\frac{q D_p n_i^2}{(W_n - W_d) N_d} \left[\exp \left(\frac{V_{app}}{V_{th}} \right) - 1 \right]$$

$$J = J_n + J_p = -J_o \left[\exp \left(\frac{V_{app}}{V_{th}} \right) - 1 \right]$$

$$J_o = q n_i^2 \left(\frac{D_n}{W_p N_a} + \frac{D_p}{(W_n - W_d) N_d} \right)$$

Así se obtienen las corrientes:

$$\begin{aligned} J_p &= -0.1 \text{ A/m}^2 \\ J_n &= -1.342 \text{ A/m}^2 \\ J_0 &= 1.406 \times 10^{-5} \text{ A/m}^2 \\ J &= -1.442 \text{ A/m}^2 \end{aligned}$$

El porcentaje que representan cada densidad de corriente es:

$$\begin{aligned} \% J_n / J &= 93.07; \\ \% J_p / J &= 6.93; \end{aligned}$$

5. Verificar la hipótesis de cuasi-equilibrio. Para ello, en la condición de ETD:
- Calcular la diferencia de potencial eléctrico en $x = 0$ respecto de $x = -x_p$.
 - Determinar la densidad de electrones y de huecos en $x = 0$ usando las relaciones de Boltzmann.
 - Obtener la corriente de arrastre de electrones y huecos considerando que en $x = 0$ el campo eléctrico E es igual a E_m .
 - Cómo se compara esta corriente con la corriente del diodo calculada en el ítem 4?

Para el primer punto, volviendo a utilizar la siguiente ecuación, se puede calcular el potencial eléctrico, teniendo en cuenta que W_d es igual $-x_p$ ($x_p = 1.1510 \times 10^{-6} \text{ m}$). En este caso $E_m = 5.3014 \times 10^5 \text{ V/m}$:

$$\psi_m = \frac{\mathcal{E}_m (x_n + x_p)}{2} = \frac{\mathcal{E}_m W_d}{2}$$

Se obtiene:

$$\psi_m = 0.4547 \text{ V}$$

En el segundo punto, utilizamos las ecuaciones siguientes, teniendo en cuenta que $\psi_m = \psi_f - \psi_i$:

$$n_o = n_i \exp \left[-\frac{(E_i - E_f)}{kT} \right] = n_i \exp \left[-\frac{q(\psi_f - \psi_i)}{kT} \right]$$

$$n_i^2 = n_o p_o$$

$$\begin{aligned} n_o &= 5.032 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \\ p_o &= 2.789 \times 10^2 \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

Para el siguiente punto, $E_m = 5.3014 \times 10^6 \text{ V/m}$. Así utilizamos la ecuación:

$$J_a = J_{a_n} + J_{a_p} = q n v_{d_n} + q p v_{d_p} = q (n \mu_n + p \mu_p) \mathcal{E}$$

$$\begin{aligned} J_{a_n} &= 5.762 \times 10^9 \text{ A/m}^2 \\ J_{a_p} &= 1.135 \times 10^{-6} \text{ A/m}^2 \end{aligned}$$

(no me da consistente, no encuentro el error. Creo que arrastro error en el cálculo de n_o y p_o y en el último ψ_m calculado)

- Cómo se compara esta corriente con la corriente del diodo calculada en el ítem 4?

La hipótesis de cuasi-equilibrio me dice que en valor absoluto, J , es mucho menor a J_{ARR} o J_{DIF} en ETD, sin embargo no se está cumpliendo. Considero un error de cálculos.

6. Calcular el exceso de portadores minoritarios en los bordes de la zona de carga espacial (SCR). Se verifica la hipótesis de bajo nivel de inyección?

Usando las siguientes ecuaciones y despejando apropiadamente se obtienen la concentración de portadores minoritarios en los bordes de la SRC:

$$\frac{n(x_n)}{n(-x_p)} \approx \exp\left(\frac{\psi(x_n) - \psi(-x_p)}{kT/q}\right) = \exp\left(\frac{\psi_{bi} - V_{app}}{kT/q}\right)$$

$$\frac{p(x_n)}{p(-x_p)} \approx \exp\left(-\frac{\psi(x_n) - \psi(-x_p)}{kT/q}\right) = \exp\left(-\frac{\psi_{bi} - V_{app}}{kT/q}\right)$$

$$n(x_n) = N_d \text{ y } p(-x_p) = N_a$$

$$n(x_p) = 7.568 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$p(x_n) = 1.513 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

Analizamos si se cumple la condición de BNI con las siguientes ecuaciones:

$$n(-x_p) = N_d \exp\left(-\frac{\psi_{bi} - V_{app}}{kT/q}\right) = \frac{n_i^2}{N_a} \exp\left(\frac{V_{app}}{V_{th}}\right)$$

$$p(x_n) = N_a \exp\left(-\frac{\psi_{bi} - V_{app}}{kT/q}\right) = \frac{n_i^2}{N_d} \exp\left(\frac{V_{app}}{V_{th}}\right)$$

$$n(x_p) = 7.199 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$p(x_n) = 1.439 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

Los valores no son exactamente iguales, sin embargo están en el mismo orden de magnitud, por lo que podemos decir que se cumple la hipótesis.

7. Calcular la corriente de difusión de mayoritarios de cada lado de la juntura, suponiendo válida la hipótesis de cuasi-neutralidad en las regiones cuasi-neutrales (QNRs).
 - En qué sentido se difunden los portadores mayoritarios?
 - Es consistente con la corriente calculada en el ítem 4?

Tanto para la corriente de difusión de mayoritarios n y p , respectivamente utilizamos las siguientes ecuaciones, teniendo en cuenta la hipótesis de cuasi-neutralidad en QNRs

$$n'_p(x) = \frac{n_i^2}{N_a} \left[\exp\left(\frac{V_{app}}{V_{th}}\right) - 1 \right] \left(1 - \frac{x}{W_p} \right)$$

$$J_n = qD_n \frac{dn_p}{dx} = -\frac{q D_n n_i^2}{W_p N_a} \left[\exp\left(\frac{V_{app}}{V_{th}}\right) - 1 \right]$$

$$p'_n(x) = \frac{n_i^2}{N_d} \left[\exp\left(\frac{V_{app}}{V_{th}}\right) - 1 \right] \left(1 + \frac{x + W_d}{W_n - W_d} \right)$$

$$J_p = -qD_p \frac{dp_n}{dx} = -\frac{q D_p n_i^2}{(W_n - W_d) N_d} \left[\exp\left(\frac{V_{app}}{V_{th}}\right) - 1 \right]$$

Por lo tanto las corrientes son

$$J_{pd} = 0.1025 \text{ A/m}^2$$

$$J_{nd} = 1.3420 \text{ A/m}^2$$

En qué sentido se difunden los portadores mayoritarios?

Es consistente con la corriente calculada en el ítem 4?

Debe existir una corriente de arrastre de mayoritarios que compense las corrientes de difusión en las zonas QNRs

8. Determinar la corriente de arrastre de mayoritarios usando los valores de las corrientes netas de electrones y huecos calculadas en el ítem 4.

Las corrientes netas serán la suma de las corrientes de arrastre y difusión de cada mayoritario. Por lo tanto para obtener la corriente de arrastre hacemos la diferencia entre la corriente neta y la de difusión calculada en el punto anterior:

Siendo (en valor absoluto):

$$J_p = 0.1 \text{ A/m}^2$$

$$J_n = 1.342 \text{ A/m}^2$$

$$J_{pd} = 0.102 \text{ A/m}^2$$

$$J_{nd} = 1.342 \text{ A/m}^2$$

Comparando los valores, se puede concluir que las corrientes de arrastre, son despreciables frente a las de difusión.

9. A partir de la corriente de arrastre de mayoritarios calculada en el ítem anterior y suponiendo que se puede considerar la distribución de mayoritarios homogénea en las QNRs, cuál debe ser la intensidad del E en cada QNR que da lugar a esas corrientes? Cómo se comparan con E_m ? Es correcto suponer que las QNRs son cuasi neutrales?

Usar $J_{arr} = \mu \times q \times (\text{mayoritarios}) \times \epsilon$ (no llegué a calcularlo)

De aquí obtengo, el valor de los campos eléctricos, que deberían ser más pequeños en las zonas QNRs. De las QNRs, se puede decir que no son neutrales sino casi. Así es que existe una pequeña distribución de carga que da un ϵ . Se cumple la HBNI. Se debe cumplir que

$$\epsilon_{ARR} \ll \epsilon_M$$

10. Cuánto es la corriente de arrastre de minoritarios para los E calculados en las QNRs? (Calcular en los bordes de la SCR, donde la densidad de minoritarios es máxima). Es comparable esta corriente de arrastre con la corriente de difusión de minoritarios en las QNRs?