



Guía de Ejercicios N° 1: Física de Semiconductores

Datos generales: $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C; $m_0 = 9.109 \times 10^{-31}$ kg; $k = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K = 8.617×10^{-5} eV/K; $h = 6.626 \times 10^{-34}$ Js = 4.136×10^{-15} eVs; $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m; $\varepsilon_r(Si) = 11.7$; $\varepsilon_r(SiO_2) = 3.9$.

- Dado un bloque semiconductor intrínseco a temperatura ambiente, responda si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas.
 - La cantidad de portadores libre aumenta si aumenta la temperatura.
 - Si no hay fuentes externas que entreguen energía, la cantidad de electrones libres y de huecos debe ser exactamente igual.
 - En equilibrio térmico, existe generación de portadores.
- El Silicio (*Si*) es un material semiconductor con las siguientes características: $m_n^* = 1.1 m_0$; $m_p^* = 0.56 m_0$; $E_g = 1.12$ eV.
 - Determinar la concentración intrínseca de portadores (n_i) del silicio a temperatura ambiente ($T = 27^\circ\text{C}$).
 - Repetir para $T = 0^\circ\text{C}$ y $T = 100^\circ\text{C}$.
- Calcular la concentración intrínseca de portadores libres (n_i) a temperatura ambiente para los siguientes materiales semiconductores:
 - Germanio (*Ge*): $m_n^* = 0.56 m_0$; $m_p^* = 0.29 m_0$; $E_g = 0.66$ eV.
 - Arsenurio de Galeo (*GaAs*): $m_n^* = 0.068 m_0$; $m_p^* = 0.47 m_0$; $E_g = 1.42$ eV.
- Dado un bloque de Silicio intrínseco a temperatura ambiente, responda:
 - Explicar cualitativamente por qué es semiconductor, cuáles son sus propiedades principales y qué lo diferencia de un metal.
 - Si en equilibrio térmico existe generación de portadores, ¿implica esto que la concentración tanto de electrones libres como de huecos puede aumentar indefinidamente?
 - ¿Cuál es la finalidad de contaminar una muestra de silicio puro con átomos dopantes?
- Una oblea de Silicio a temperatura ambiente está dopada con átomos donores con una concentración de $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.
 - ¿Cuál es la concentración de electrones n_0 (cm^{-3}) a temperatura ambiente?
 - ¿Cuál es la concentración de huecos p_0 (cm^{-3}) a temperatura ambiente?
 - ¿Cómo cambian las concentraciones de portadores de carga n_0 y p_0 si el dopaje tiene una concentración $N_D = 10^8 \text{ cm}^{-3}$?
- Una oblea de Silicio a temperatura ambiente está dopada con átomos aceptores con una concentración de $N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.
 - ¿Cuál es la concentración de electrones n_0 (cm^{-3}) a temperatura ambiente?
 - ¿Cuál es la concentración de huecos p_0 (cm^{-3}) a temperatura ambiente?
 - ¿Cómo cambian las concentraciones de portadores de carga n_0 y p_0 si el dopaje tiene una concentración $N_A = 10^5 \text{ cm}^{-3}$?
- Tres obleas, cada una de un material semiconductor distinto (*Si*, *Ge* y *GaAs*) son dopadas con átomos donores con una concentración $N_D = 5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$. ¿Cuál es la concentración de electrones y huecos en cada uno de los materiales a temperatura ambiente? ¿Cuánto cambian en cada caso respecto de las concentraciones para los materiales intrínsecos?
- Se tiene una oblea de Silicio a temperatura ambiente dopada con una concentración de átomos aceptores de $N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Se agregan átomos donores con una concentración de $N_D = 7.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ en una región de la oblea.



- a) Esta región de la oblea, ¿es tipo n o tipo p?
 - b) ¿Cuál es la concentración de electrones n_0 (cm^{-3}) a temperatura ambiente en esta región?
 - c) ¿Cuál es la concentración de huecos p_0 (cm^{-3}) a temperatura ambiente en esta región?
9. Una oblea de Germanio en equilibrio térmico a temperatura ambiente está dopada con átomos aceptores con una concentración de $N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.
- a) Calcule la densidad de electrones y huecos en las bandas de conducción y valencia, respectivamente.
 - b) ¿Cómo cambian estas concentraciones si el equilibrio térmico es a una temperatura de 50°C ? ¿Y si $T = 150^\circ\text{C}$?
10. Determinar la concentración de electrones y huecos en las bandas de conducción y valencia, respectivamente, para una oblea de silicio dopada con impurezas donoras con una concentración $N_D = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ que se encuentra en equilibrio térmico a 125°C .
11. Calcular la conductividad de los siguientes materiales semiconductores intrínsecos a temperatura ambiente.
- a) Silicio (*Si*): $m_n^* = 1.1 m_0$; $m_p^* = 0.56 m_0$; $E_g = 1.12 \text{ eV}$; $\mu_n = 1450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $\mu_p = 500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.
 - b) Germanio (*Ge*): $m_n^* = 0.56 m_0$; $m_p^* = 0.29 m_0$; $E_g = 0.66 \text{ eV}$; $\mu_n = 3900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $\mu_p = 2300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.
 - c) Arseniuro de Galio (*GaAs*): $m_n^* = 0.068 m_0$; $m_p^* = 0.47 m_0$; $E_g = 1.42 \text{ eV}$; $\mu_n = 8500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.
12. Para los tres materiales del ejercicio anterior, calcular la conductividad de cada uno de los materiales a distintas temperaturas dentro del rango $T \in \{-50^\circ\text{C}; 125^\circ\text{C}\}$. Realizar un gráfico con los datos obtenidos. (Suponer que es válido considerar únicamente la variación térmica de la movilidad debido a la dispersión de los portadores por oscilaciones de la red cristalina.)
13. Una muestra semiconductor intrínseca de forma de cilindro de radio $R = 0.2 \text{ mm}$ y largo $L = 2 \text{ mm}$ se encuentra a $T = 300 \text{ K}$ y tiene las siguientes características: $E_g = 0.6 \text{ eV}$; $m_n^* = m_0$; $m_p^* = 0.5 \times m_0$; $\mu_n = 2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $\mu_p = 1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Calcular el valor de resistencia de la muestra.
14. Dado un bloque de semiconductor a temperatura ambiente, responda:
- a) Si por el semiconductor circula una densidad de corriente J , y suponiendo que éste es intrínseco, explique los posibles fenómenos de transporte involucrados.
 - b) El movimiento térmico de los portadores, ¿aporta a esta corriente? ¿Por qué?
15. Dado un bloque de silicio cristalino intrínseco, considerando equilibrio térmico, temperatura ambiente, $12 \mu\text{m}$ de largo y $4 (\mu\text{m})^2$ de sección, se pide:
- a) Calcule la resistencia entre los extremos de la barra de silicio.
 - b) Hallar la expresión de la corriente si se aplica una diferencia de potencial V_{EXT} entre los extremos del bloque. Indicar esquemáticamente el sentido del movimiento de los portadores.
16. Se tiene una oblea de Si a temperatura ambiente, dopada con B con una concentración de impurezas de $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Justificando brevemente y claramente responda:
- a) ¿Cuál es la concentración de electrones y huecos en el material?
 - b) Estime la movilidad de los electrones y huecos y calcule la resistividad del material.
 - c) Si con este material se construye un resistor de $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ de sección y $15 \mu\text{m}$ de largo, calcular la resistencia del resistor, vista entre sus caras externas.
 - d) ¿Cómo varía la resistencia si la temperatura aumenta a 100°C ?
17. Calcular la corriente que circula por una barra de silicio intrínseco de área $100 \mu\text{m}^2$ y largo 1 mm cuando se aplica una diferencia de potencial de 2 V entre sus extremos.
18. Considere una muestra de Silicio tipo P con una resistividad de $2 \Omega \text{ cm}$ a 300°K . Con la ayuda del gráfico de densidad de dopantes en función de la resistividad, estime la magnitud de:



- a) La concentración de huecos, p_0 .
 - b) La concentración de electrones, n_0 .
 - c) La movilidad de los huecos, μ_p .
 - d) La movilidad de los electrones, μ_n .
19. Considere la misma muestra del ejercicio anterior. La geometría de la muestra es tal que puede considerarse una situación unidimensional. En una cierta región de la muestra se mide una corriente de arrastre de 10^4 A/cm^2 . Estime a 300°K la magnitud de:
 - a) El campo eléctrico en esa región.
 - b) La contribución relativa de los electrones y los huecos a la corriente de arrastre total.
 - c) La velocidad de arrastre de los huecos y los electrones.
 - d) En el diseño de un dispositivo semiconductor de alta velocidad, ¿considera que es más conveniente emplear conducción por huecos o por electrones?
 20. En una muestra de Silicio que tiene una concentración de donores de $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, se aplica un campo eléctrico en la dirección $+x$ de magnitud 1 kV/cm .
 - a) ¿Cuál es la velocidad de arrastre de los electrones (magnitud y signo)?
 - b) ¿Cuál es la densidad de corriente de arrastre de los electrones (magnitud y signo)?
 - c) ¿Qué tiempo es necesario para que un electrón se desplace por arrastre, en promedio, una distancia de $1 \mu\text{m}$?
 - d) ¿Cuántas colisiones ocurren mientras se está desplazando? Puede suponer que el tiempo medio entre colisiones es $\tau_c = 0.1 \text{ ps}$.
 21. Calcular la corriente que circula por un bloque de silicio cristalino de sección $100 \mu\text{m}^2$ y largo 2 mm dopado con $N_D = 10^{16} \text{ at/cm}^3$ cuando se aplica una diferencia de potencial de 3 V . Datos: $\mu_n = 1200 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ y $\mu_p = 420 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$.
 22. Calcular la corriente que circula por un bloque de silicio cristalino de sección $50 \mu\text{m}^2$ y largo 1 mm dopado con $N_A = 1.5 \times 10^{16} \text{ at/cm}^3$ cuando se aplica una diferencia de potencial de 1 V . Datos: $\mu_n = 1200 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ y $\mu_p = 420 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$.
 23. A lo largo de una muestra de silicio de $2 \mu\text{m}$ de longitud se establece un exceso de concentración de huecos minoritarios que está dado por $\Delta p(x) = 10^8 \text{ cm}^{-4} \times x$, donde x es la coordenada en la dirección del gradiente de concentración. La concentración de donores en la muestra es $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.
 - a) Encuentre la densidad de corriente de difusión de huecos.
 - b) ¿Cuánto tiempo necesita un hueco para difundirse a lo largo de toda la muestra?
 24. En una muestra de silicio se establece un exceso de concentración de electrones minoritarios en la región $x \geq 0$ que está dado por $\Delta n(x) = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \exp(-0.5 x \mu\text{m}^{-1})$, donde x es la coordenada en la dirección del gradiente de concentración. La concentración de aceptores en la muestra es $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.
 - a) Encuentre la magnitud y signo de la densidad de corriente de difusión de electrones en $x = 0$.
 - b) Grafique la densidad de corriente de difusión de electrones en el intervalo $0 \leq x \leq 10 \mu\text{m}$.
 25. La distribución de carga en una muestra de silicio se muestra en la figura 1.
 - a) Determine el signo del campo eléctrico en $x = -750 \text{ nm}$, $x = -250 \text{ nm}$, $x = 250 \text{ nm}$ y $x = 750 \text{ nm}$.
 - b) Determine el valor del campo eléctrico en $x = -250 \text{ nm}$.
 - c) ¿Dónde es máximo el campo eléctrico? (Responda sin hacer cuentas)
 - d) Haga un gráfico del campo eléctrico en función de la posición.
 26. La distribución de carga en una muestra de silicio se muestra en la figura 2:

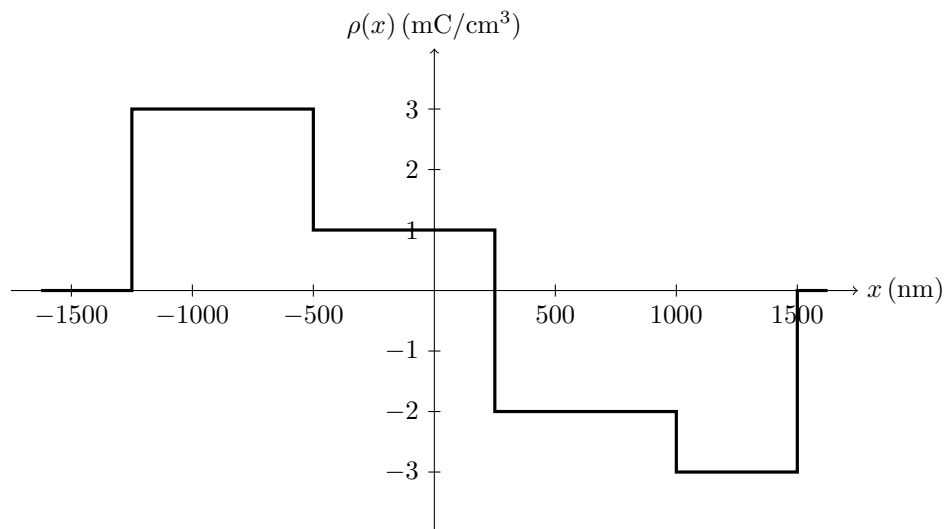


Figura 1

- Encuentre el espesor Δ para que la muestra sea eléctricamente neutra. El contorno en $x = -300$ nm es fijo.
- Encuentre el valor del campo eléctrico en $x = -250$ nm y $x = 150$ nm.
- Grafique el campo eléctrico en función de la posición $E(x)$.
- Si el potencial $\phi(x = -300 \text{ nm}) = -500$ mV, encuentre el valor del potencial eléctrico en $x = 350$ nm.

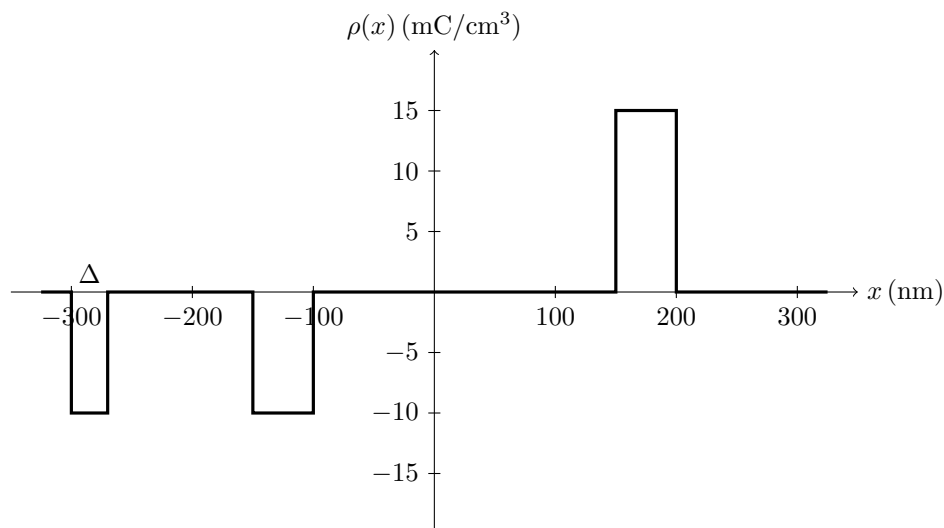


Figura 2

27. El campo eléctrico en una muestra de silicio se muestra en la figura 3:

- Grafique la densidad de carga $\rho(x)$.
- Si $\phi(x = -2 \mu\text{m}) = -500$ mV, ¿cuánto vale el potencial en $x = 0$? ¿Cuánto vale el potencial en $x = 2 \mu\text{m}$? (Nota: no es necesario encontrar la expresión del potencial para responder esta pregunta.)
- Grafique el potencial eléctrico $\phi(x)$ sabiendo que $\phi(x = -2 \mu\text{m}) = -500$ mV.

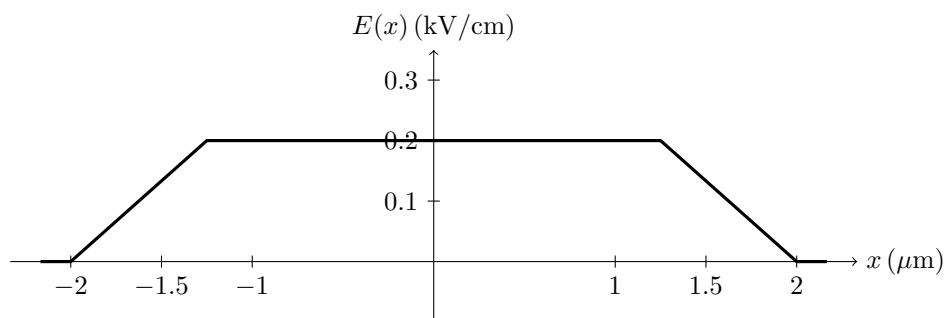


Figura 3

28. El campo eléctrico en una muestra de silicio se muestra en la figura 4:

- Grafique la densidad de carga $\rho(x)$.
- Dado que el potencial eléctrico es $\phi(x=0) = 0$, grafique el potencial en función de la posición.

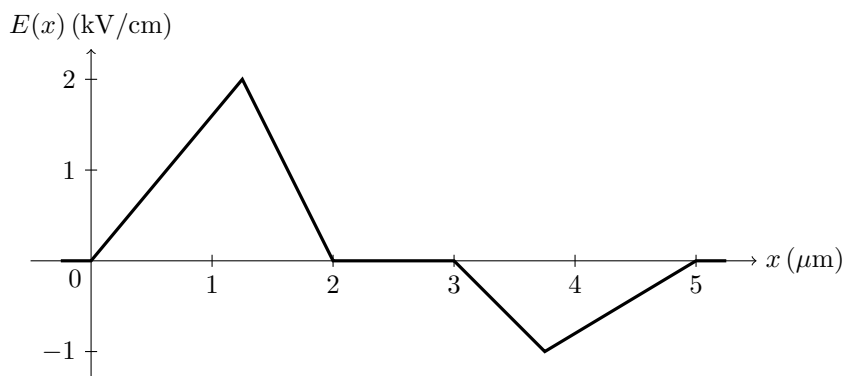


Figura 4

- Se tienen dos regiones en una oblea de silicio. Una está dopada con una concentración $N_D = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y la otra $N_A = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.
 - ¿Qué tipo de material es cada región?
 - Calcule la concentración de electrones y huecos en cada una de las regiones.
 - ¿Cuál es la diferencia de potencial entre las cada regiones?
 - Realice un diagrama de bandas para esta situación y calcule la diferencia de energía.
- Se tienen dos regiones en una oblea de silicio. Una está dopada con una concentración $N_{D1} = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ y la otra $N_{D2} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.
 - ¿Qué tipo de material es cada región?
 - Calcule la concentración de electrones y huecos en cada una de las regiones.
 - ¿Cuál es la diferencia de potencial entre cada región?
 - Realice un diagrama de bandas para esta situación y calcule la diferencia de energía.
- Un semiconductor en equilibrio térmico posee una región dopada con $N_A = 4.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ y otra región dopada con $N_D = 7.1 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$. Calcular la diferencia de potencial entre ambas regiones.
- Un semiconductor en equilibrio térmico posee una región dopada con $N_A = 6.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ y otra región dopada con $N_D = 8.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Calcular la diferencia de potencial entre ambas regiones.



33. Calcular la diferencia de potencial entre los extremos de un bloque de silicio de $100\ \mu\text{m}$ de largo cuyo nivel de dopaje sigue la ley: $N_A(x) = (10^7 + x \cdot 10^{16}\ \mu\text{m}^{-1})\ \text{at}/\text{cm}^3$ con x en metros.
34. Calcular la diferencia de potencial entre los extremos de un bloque de silicio de $1\ \text{mm}$ de largo cuyo nivel de dopaje sigue la ley: $N_D(x) = (10^8 + x \cdot 10^{18}\ \text{m}^{-1})\ \text{at}/\text{cm}^3$ con x en metros.
35. Se tiene una oblea de silicio tipo N de $100\ \mu\text{m}$ de largo en equilibrio térmico con una distribución de dopante no uniforme. Conocidas las funciones de la variación espacial de dopantes ($N_D(x) = 4 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-4} x + 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$) y portadores mayoritarios ($n(x) = 3 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-4} x + 1.5 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$), determinar el campo eléctrico máximo.
36. En la figura 5 se ilustra el dopaje de una barra de silicio que se encuentra en equilibrio térmico, que no tiene impurezas donoras ($N_D = 0$), y con $N_A(x=0) = 10^5\ \text{cm}^{-3}$, $N_A(x=L) = 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ y $L = 1\ \text{mm}$. Explique brevemente y con claridad:
 - a) ¿En qué sitio son mayores las concentraciones de huecos y de electrones?
 - b) ¿Se puede considerar que en alguna región del material se tiene la concentración intrínseca de portadores?
 - c) Calcule la diferencia de potencial entre los extremos de la barra.
 - d) Haga un esquema aproximado de la densidad de carga $\rho(x)$, el campo eléctrico $E(x)$ y el potencial electrostático $\phi(x)$.
 - e) ¿En qué dirección fluyen las corrientes eléctricas de difusión y de arrastre de huecos y de electrones?
¿Cuánto valen las corrientes netas de huecos y electrones?

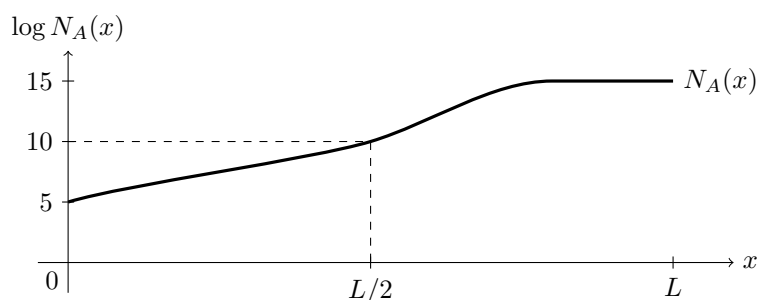


Figura 5