



# Guía de Ejercicios N<sup>o</sup> 1: Física de Semiconductores

Constante	Valor
$q$	$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
$k$	$1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV K}$
$\epsilon_0$	$88,5 \text{ fF/cm}$
$\epsilon_r(\text{Si})$	$11,7$
$\epsilon_r(\text{SiO}_2)$	$3,9$
$T_{\text{amb}}$	$27^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$

Tabla 1: Constantes útiles.

Propiedad	Descripción	Silicio (Si)	Germanio (Ge)	Arseniuro de galio (GaAs)
$n_i \text{ [cm}^{-3}\text{]}$	Concentración intrínseca de portadores	$10^{10}$	$2 \times 10^{13}$	$2 \times 10^6$
$\mu_{n0} \text{ [cm}^2\text{/(Vs)}\text{]}$	Movilidad de los $e^-$ a $T_{\text{amb}}$	1450	3900	9000
$\mu_{p0} \text{ [cm}^2\text{/(Vs)}\text{]}$	Movilidad de los $h$ a $T_{\text{amb}}$	500	2300	460

Tabla 2: Propiedades de materiales semiconductores. Las movilidades son para semiconductores **intrínsecos**.

## Parte I: Distribuciones de carga

- La distribución de carga en un bloque de silicio se muestra en la figura 1.
  - Determine el signo del campo eléctrico en  $x = -750 \text{ nm}$ ,  $x = -250 \text{ nm}$ ,  $x = 250 \text{ nm}$  y  $x = 750 \text{ nm}$ .
  - Determine el valor del campo eléctrico en  $x = -250 \text{ nm}$ .
  - ¿Dónde es máximo el campo eléctrico? (Responda sin hacer cuentas)
  - Haga un gráfico del campo eléctrico en función de la posición.

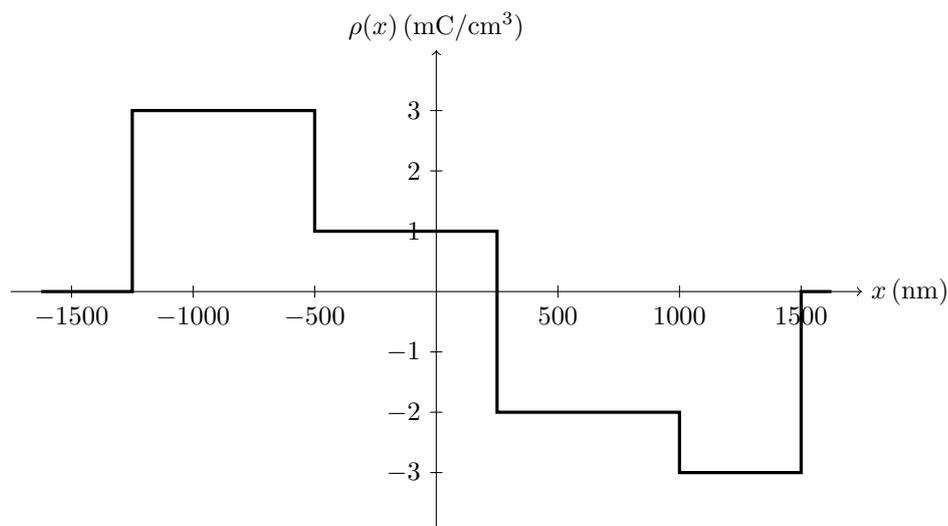


Figura 1



2. La distribución de carga en un bloque de silicio se muestra en la figura 2:

- Encuentre el espesor  $\Delta$  para que la muestra sea eléctricamente neutra. Dejar fijo  $\rho(-300 \text{ nm})$ .
- Encuentre el valor del campo eléctrico en  $x = -250 \text{ nm}$  y  $x = 150 \text{ nm}$ .
- Grafique el campo eléctrico en función de la posición  $E(x)$ .
- Si el potencial  $\phi(-\infty) = 0 \text{ mV}$ , encuentre el valor del potencial eléctrico en  $x = 350 \text{ nm}$ .

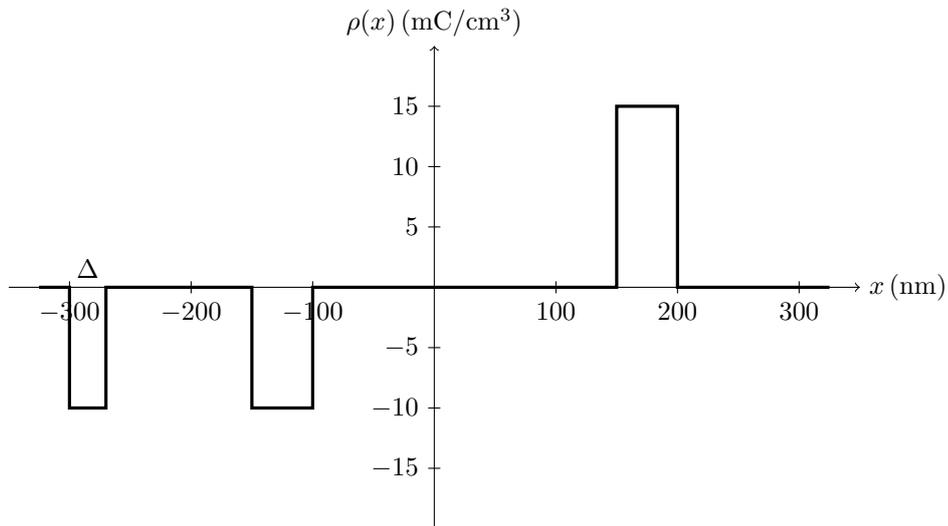


Figura 2

3. El campo eléctrico en un bloque de silicio se muestra en la figura 3:

- Grafique la densidad de carga  $\rho(x)$ .
  - Si  $\phi(x = -2 \mu\text{m}) = -500 \text{ mV}$ , ¿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  $\phi(x = -2 \mu\text{m}) = -500 \text{ mV}$ .

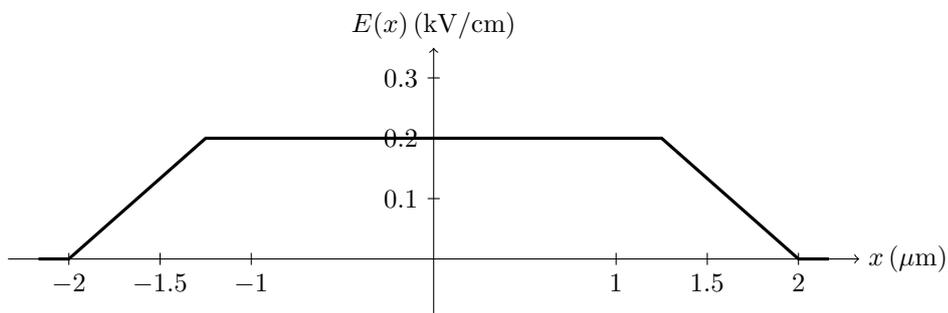


Figura 3

4. La distribución de cargas en un bloque de silicio se muestra en la figura 4. La densidad superficial representada por la delta de Dirac es  $\sigma = 2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ .

- Grafique el campo eléctrico en función de la posición  $E(x)$ .
- Grafique el potencial suponiendo que  $\phi(-\infty) = 0 \text{ mV}$ .



**NOTA:** no se debe prestar atención a la altura de la delta de Dirac en el gráfico, ya que las unidades de  $\sigma$  son distintas a las del eje de ordenadas. Solamente es relevante la posición de la delta sobre el eje de abscisas.

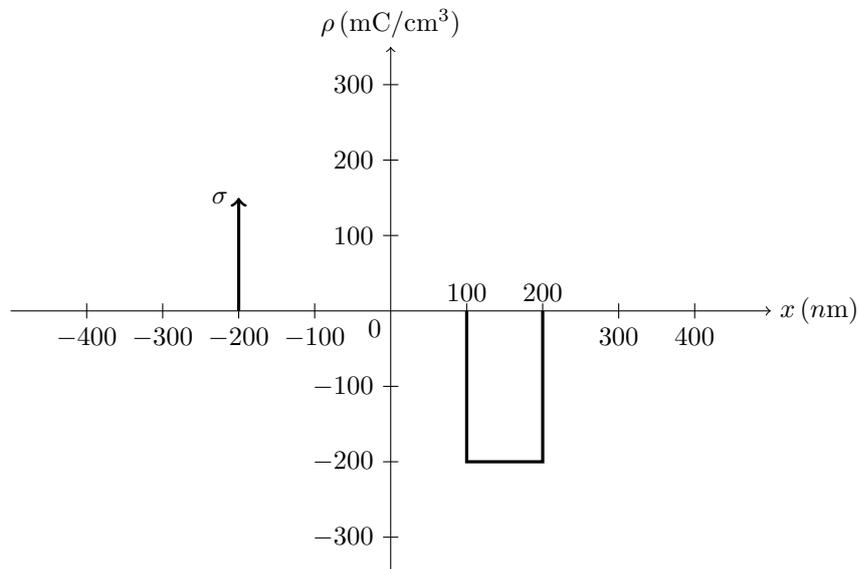


Figura 4

## Parte II: Semiconductores intrínsecos y extrínsecos

5. Una oblea de silicio a temperatura ambiente está dopada con átomos donores con una concentración de  $N_D = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .
  - a) ¿Cuál son las concentraciones de electrones  $n_0$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) y huecos  $p_0$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) a temperatura ambiente?
  - b) Calcular nuevamente  $n_0$  y  $p_0$  para los siguientes valores de  $N_D$ :  $10^8 \text{ cm}^{-3}$ ,  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  y  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ . Graficar.
  - c) ¿Qué sucede si en lugar de dopar con átomos donores ( $N_D$ ) se lo hace con aceptores ( $N_A$ )?
6. Se tiene una oblea de silicio a temperatura ambiente dopada con una concentración de átomos aceptores de  $N_A = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . 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) ¿Cuál son las concentraciones de electrones  $n_0$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) y huecos  $p_0$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) a temperatura ambiente?
  - b) Esta región de la oblea, ¿es tipo N o tipo P?
7. Tres obleas, cada una de un material semiconductor distinto (Si, Ge y GaAs) son dopadas con átomos donores con una concentración  $N_D = 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . ¿Cuál es la concentración de electrones y huecos a temperatura ambiente en cada uno de los materiales? ¿Cuánto cambian en cada caso respecto de las concentraciones para los materiales intrínsecos?

## Parte III: Densidades de corriente y conductividad

8. Calcular la conductividad del silicio, germanio y arseniuro de galio a temperatura ambiente. Considerar que todos los materiales sean intrínsecos.
9. Dado un bloque de silicio cristalino intrínseco de  $12 \mu\text{m}$  de largo y  $4 \mu\text{m}^2$  de sección, considerando equilibrio térmico y temperatura ambiente, 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.
10. Se tienen distintas obleas de Si a temperatura ambiente dopadas con B. Cada una es dopada con una concentración distinta, estas son:  $10^8 \text{ cm}^{-3}$ ,  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  y  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Graficar como varían las siguientes propiedades entre oblea y oblea: la movilidad de los electrones y de los huecos (utilice el gráfico de movilidad en función del dopaje); y la conductividad de la oblea.
11. Se tiene una oblea de silicio tipo P levemente dopada con una resistividad de  $250 \Omega \text{ cm}$ . La geometría es tal que puede considerarse una situación unidimensional. En una cierta región de la muestra se mide una corriente de arrastre de  $1 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ . Estime a temperatura ambiente la magnitud de:
- a) La concentración del dopaje.
- b) El campo eléctrico.
- c) La contribución relativa de los electrones y los huecos a la corriente de arrastre total.
- d) La velocidad de arrastre de los huecos y los electrones.
12. En una muestra de silicio que tiene una concentración de donores de  $N_D = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , se aplica un campo eléctrico en la dirección  $+x$  de magnitud  $1 \text{ kV/cm}$ .
- a) ¿Cuál es la velocidad de arrastre de los electrones y huecos (magnitud y signo)?
- b) ¿Cuál es la densidad de corriente de arrastre de los electrones y huecos (magnitud y signo)?
- c) Realizar un gráfico cualitativo de la muestra con las direcciones de la velocidad y densidad de corriente de cada portador.
- d) ¿Por qué el aporte de electrones a la corriente es mucho mayor que el de huecos?
13. 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  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Encuentre la magnitud y signo de la densidad de corriente de difusión de huecos.

#### Parte IV: Electroestática de los SC y relaciones de Boltzmann

14. 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  $N_A = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .
- a) ¿Qué tipo de material es cada región?
- b) Calcule la concentración de electrones y huecos en cada una de las regiones.
- c) ¿Cuál es la diferencia de potencial entre las cada regiones?
15. Se tienen dos regiones en una oblea de silicio. Una está dopada con una concentración  $N_{D1} = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  y la otra  $N_{D2} = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .
- a) ¿Qué tipo de material es cada región?
- b) Calcule la concentración de electrones y huecos en cada una de las regiones.
- c) ¿Cuál es la diferencia de potencial entre cada región?
16. Se tiene un bloque de silicio de  $100 \mu\text{m}$  de largo cuyo nivel de dopaje cumple con la siguiente función:  $N_A(x) = (10^{17} + x \cdot 10^{16} \mu\text{m}^{-1}) \text{ cm}^{-3}$  con  $x$  en micro-metros. Suponer válida la hipótesis de cuasi-neutralidad.
- a) Graficar  $n_0$  y  $p_0$  en función de  $x$ .
- b) Calcular la diferencia de potencial entre los extremos del bloque.
17. Se tiene una oblea de silicio tipo N de  $100 \mu\text{m}$  de largo 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.



**Parte V: Integradores**

18. Tres muestras de silicio con misma geometría (largo y área) son dopadas con tres densidades de impurezas donoras distintas, obteniéndose tres valores de movilidad distintos:  $\mu = 1400; 800; 300 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ . A cada una de ellas se le aplica la misma tensión  $V$ , obteniéndose 3 corrientes distintas circulando por cada muestra que cumplen  $I_1 > I_2 > I_3$ . Relacionar cada corriente obtenida con cada uno de los dopajes y movilidades. Explicar por qué varía la movilidad, indicando un valor aproximado de densidad de dopaje para cada muestra. Justificar la respuesta.
19. En la Fig. 6 se presenta una resistencia para circuitos integrados basada en silicio que se construye realizando una impurificación con dopantes aceptores de concentración volumétrica  $N_A$  entre dos contactos metálicos, sobre un sustrato semiconductor tipo N. Se satisface que  $N_A \gg N_D$ .
  - a) Obtener el valor de  $N_A$  para que a temperatura ambiente la concentración de los portadores generados térmicamente sea 5 órdenes de magnitud menor que  $p_0$ .
  - b) Sabiendo que  $d = 6,65 \mu\text{m}$  determinar la relación entre L y W para que la resistencia a temperatura ambiente entre los contactos sea  $1 \text{ k}\Omega$ .

**NOTA 1:** el  $\text{SiO}_2$  es un material aislante.

**NOTA 2:** Considerar que no existe circulación de corriente entre la zona tipo P/P<sup>+</sup> y la zona tipo N.

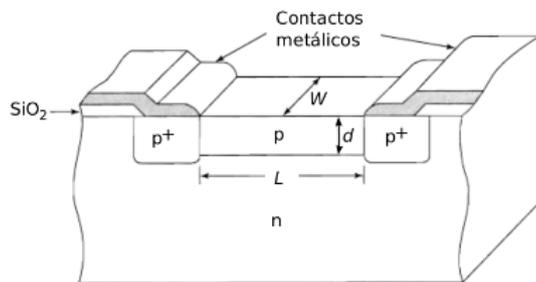


Figura 5: Resistencia para circuitos integrados

Figura 6

20. Se tiene el divisor resistivo de la Fig. 7. Ambos resistores están contruidos con germanio y tienen las mismas dimensiones.  $R_1$  se encuentra dopado con  $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , mientras que  $R_2$  está dopado con  $N_A = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Calcular la tensión en el nodo  $V_o$  a temperatura ambiente.

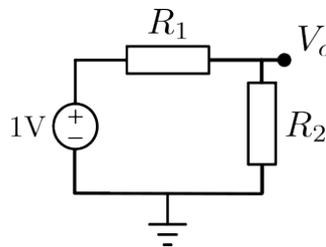


Figura 7

21. Se tiene el circuito RC de la Fig. 8. La constante de tiempo es  $\tau = 90 \text{ ns}$  y el capacitor tiene  $1 \text{ pF}$  de capacidad. El resistor está elaborado con silicio levemente dopado tipo N, tiene un área de  $100 \mu\text{m}^2$  y una longitud de  $10 \mu\text{m}$ . Determinar el valor de su dopaje.

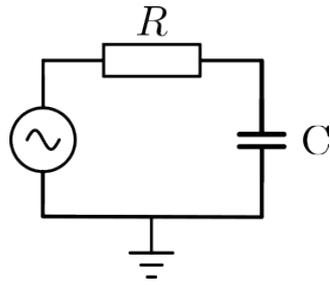


Figura 8