



revisar gráfico 24 / ej. 25

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

Constante	Valor
$q$	$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
$m_0$	$9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
$k$	$1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
$h$	$6,626 \times 10^{-34} \text{ J s} = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV s}$
$\epsilon_0$	$88,5 \text{ fF/cm}$
$\epsilon_r(\text{Si})$	$11,7$
$\epsilon_r(\text{SiO}_2)$	$3,9$
$T_{\text{amb}}$	$27^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$

$\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$

$m_i = 10^{-3} m_0$

Tabla 1: Constantes útiles.

Propiedad	Descripción	Silicio (Si)	Germanio (Ge)	Arseniuro de galio (GaAs)
$E_g$ [eV]	Energía de <i>bandgap</i>	1,12	0,66	1,42
$m_n^*$	Masa efectiva de los $e^-$	$1,1 \times m_0$	$0,56 \times m_0$	$0,068 \times m_0$
$m_p^*$	Masa efectiva de los $h$	$0,56 \times m_0$	$0,29 \times m_0$	$0,47 \times m_0$
$\mu_{n0}$ [ $\text{cm}^2/(\text{Vs})$ ]	Movilidad de los $e^-$ a $T_{\text{amb}}$	1450	3900	9000
$\mu_{p0}$ [ $\text{cm}^2/(\text{Vs})$ ]	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

- ✓ 1. La distribución de carga en un bloque 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.
  
- ✓ 2. La distribución de carga en un bloque de silicio se muestra en la figura 2:
  - a) Encuentre el espesor  $\Delta$  para que la muestra sea eléctricamente neutra. Dejar fijo  $\rho(-300 \text{ nm})$ .
  - b) Encuentre el valor del campo eléctrico en  $x = -250 \text{ nm}$  y  $x = 150 \text{ nm}$ .
  - c) Grafique el campo eléctrico en función de la posición  $E(x)$ .
  - d) Si el potencial  $\phi(-\infty) = 0 \text{ mV}$ , encuentre el valor del potencial eléctrico en  $x = 350 \text{ nm}$ .
  
- ✓ 3. El campo eléctrico en un bloque de silicio se muestra en la figura 3:
  - a) Grafique la densidad de carga  $\rho(x)$ .
  - b) Si  $\phi(x = -2 \mu\text{m}) = -500 \text{ mV}$ , ¿cuánto vale el potencial en  $x = 0$ ?
  - c) ¿Cuánto vale el potencial en  $x = 2 \mu\text{m}$ ?

**NOTA:** no es necesario encontrar la expresión del potencial para responder esta pregunta.

  - d) Grafique el potencial eléctrico  $\phi(x)$  sabiendo que  $\phi(x = -2 \mu\text{m}) = -500 \text{ mV}$ .

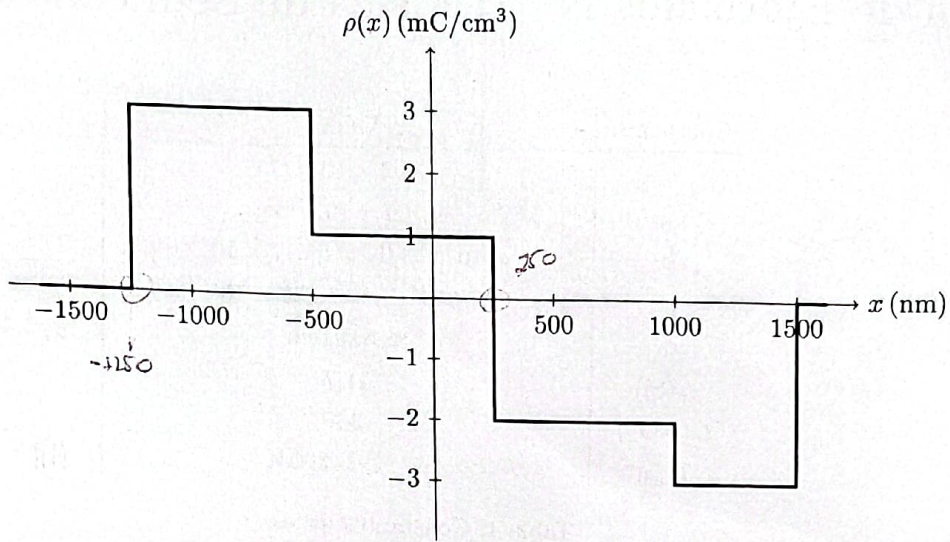


Figura 1

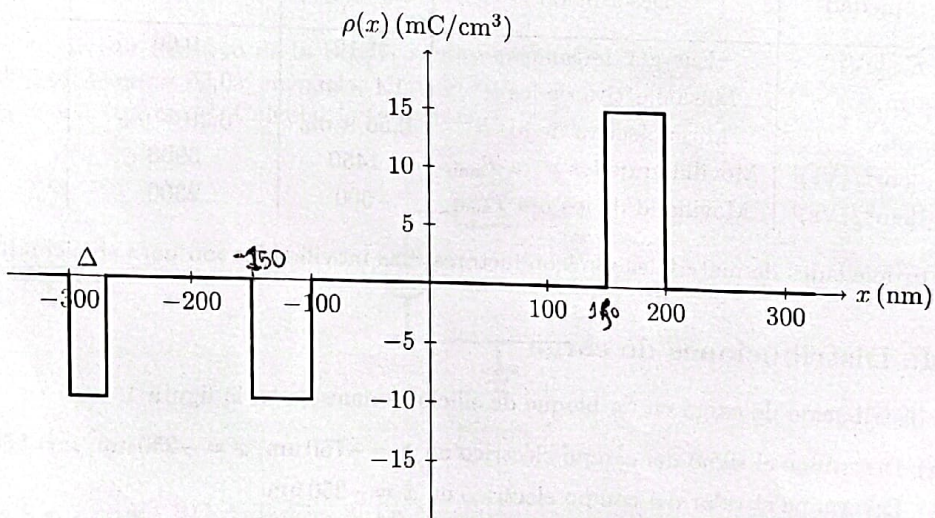


Figura 2

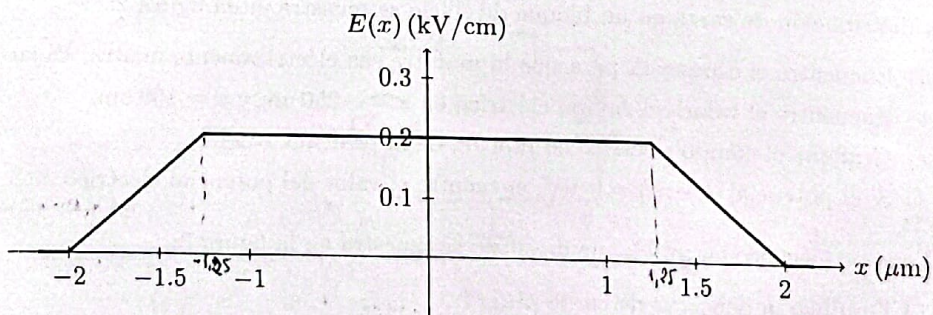


Figura 3



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.

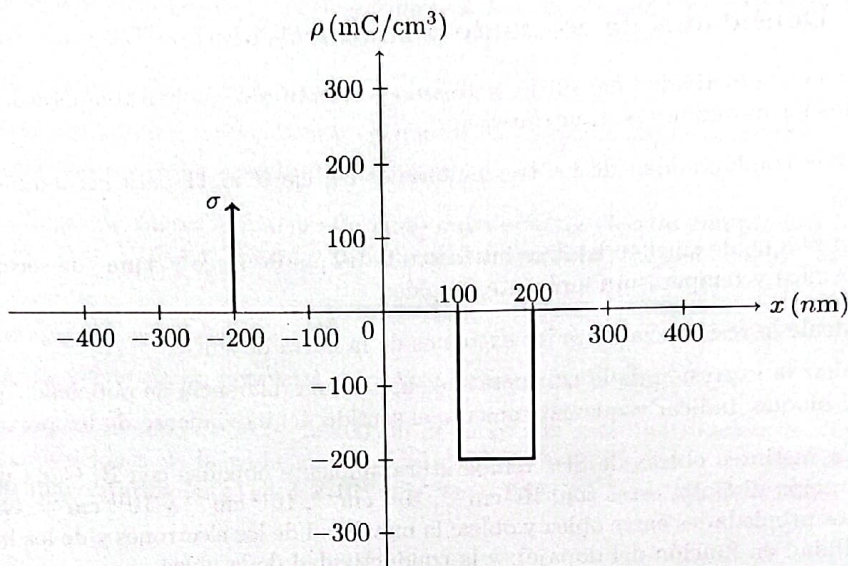


Figura 4

## Parte II: Semiconductores intrínsecos y extrínsecos

- ✓ 5. Determinar la concentración intrínseca de portadores ( $n_i$ ) del silicio a las siguientes temperaturas:  $-50^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$ ,  $27^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$ . Graficar.
- ✓ 6. Calcular la concentración intrínseca de portadores libres ( $n_i$ ) a temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ) del germanio y del arseniuro de galio. Compare sus valores con el del silicio a dicha temperatura. ¿Qué relación encuentra entre la energía de gap y la concentración intrínseca de portadores? ¿Por qué sucede esto?
- ✓ 7. Una oblea de silicio a temperatura ambiente está dopada con átomos donores con una concentración de  $N_D = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .
  - ¿Cuál son las concentraciones de electrones  $n_0$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) y huecos  $p_0$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) a temperatura ambiente?
  - 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.
  - ¿Qué sucede si en lugar de dopar con átomos donores ( $N_D$ ) se lo hace con aceptores ( $N_A$ )?
- ✓ 8. 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.
  - ¿Cuál son las concentraciones de electrones  $n_0$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) y huecos  $p_0$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) a temperatura ambiente?
  - Esta región de la oblea, ¿es tipo N o tipo P?



- ✓ 9. 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?
- ✓ 10. Una oblea de germanio en equilibrio térmico a temperatura ambiente está dopada con átomos aceptores con una concentración de  $N_D = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . Calcule  $n_0$  y  $p_0$  para las temperaturas del ejercicio 5. Grafique ambas propiedades.

### Parte III: Densidades de corriente y conductividad

- ✓ 11. Calcular la conductividad del silicio, germanio y arseniuro de galio a temperatura ambiente. Considerar que todos los materiales sean intrínsecos.
- ✓ 12. Calcular la conductividad de los tres materiales del ejercicio 11 para las temperaturas del ejercicio 5. Graficar.
- ✓ 13. 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  $V_{\text{EXT}}$  entre los extremos del bloque. Indicar esquemáticamente el sentido del movimiento de los portadores.
- ✓ 14. 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.
- ✓ 15. Se tiene una oblea de silicio dopada con una concentración  $N_A = 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ . Graficar la conductividad para los valores de temperatura del ejercicio 5 y  $200^\circ\text{C}$ .
- ✓ 16. 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.
- ✓ 17. 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 las velocidades y densidad de corriente de cada portador.
  - d) ¿Por qué el aporte de electrones a la corriente es mucho mayor que el de huecos?
- ✓ 18. 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

- ✓ 19. 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?
- ✓ 20. 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  $N_{D2} = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .
- ¿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?
- ✓ 21. 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.
- Graficar  $n_0$  y  $p_0$  en función de  $x$ .
  - Calcular la diferencia de potencial entre los extremos del bloque.
- X 22. 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

- ✓ 23. 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.
- ✓ 24. Se tiene un cubo de material semiconductor de lado "a":
- Hallar su resistencia a  $55^\circ\text{C}$  usando los siguientes datos:  $E_g = 0,8 \text{ eV}$ ;  $\mu_n(T) = 1100 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \left(\frac{T}{T_{\text{amb}}}\right)^{-\frac{3}{2}}$ ;  $\mu_p(T) = 600 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \left(\frac{T}{T_{\text{amb}}}\right)^{-\frac{3}{2}}$ ;  $m_{n^*}/m_0 = 1,1$ ;  $m_{p^*}/m_0 = 0,6$ ;  $a = 500 \mu\text{m}$ .
  - Si al material del punto anterior se le introducen  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  átomos de impurezas del grupo V de la tabla periódica, explicar cómo varía el valor de la resistencia detallando cómo cambian cada uno de los parámetros físicos que intervienen en su determinación.
  - Para el dopaje del ítem anterior, graficar de forma cualitativa la dependencia con la temperatura de: la concentración de electrones, la movilidad de electrones y la conductividad eléctrica. Justificar las curvas graficadas.
- X 25. 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  $N_A \gg N_D$ .
- Obtener el valor de  $N_A$  para que a  $50^\circ\text{C}$  la concentración de los portadores generados térmicamente sea 5 órdenes de magnitud menor que  $p_0$ .
  - Sabiendo que  $d = 6,65 \mu\text{m}$  determinar la relación entre  $L$  y  $W$  para que la resistencia a  $50^\circ\text{C}$  entre los contactos sea  $1 \text{ k}\Omega$ .



c) Explicar como variaría la resistencia con la temperatura.

NOTA 1: el SiO<sub>2</sub> es un material aislante.

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

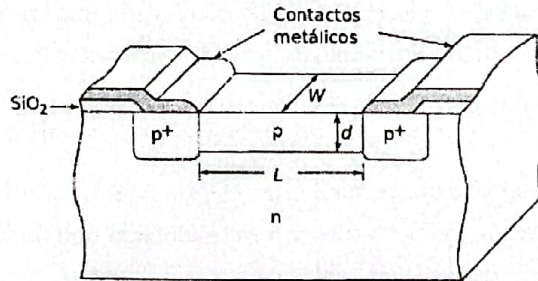


Figura 5: Resistencia para circuitos integrados

Figura 6

- ✓ 26. Se tiene el divisor resistivo de la Fig. 7. Ambos resistores están construidos 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.

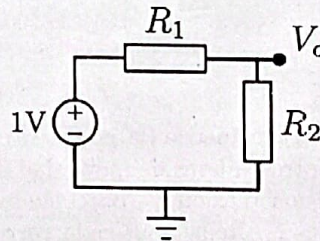


Figura 7

- ✓ 27. Se tiene el circuito RC de la Fig. 8. La constante de tiempo es  $\tau = 90 \text{ ns}$  y el capacitor tiene 1 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.

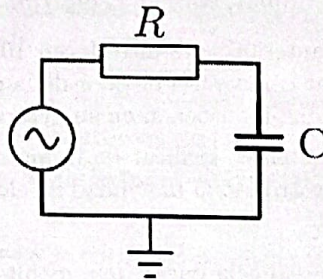


Figura 8

■ GUIA N°1: FÍSICA DE SEMI-CONDUCTORES

• PARTE I: DISTRIBUCIONES DE CARGA

1. a)	$x$ [mm]	DENSIDAD	SEÑO (DEL CAMPO ELÉCTRICO TOTAL)
	-750	$3 \mu\text{C}/\text{cm}^3$	POSITIVO
	-250	$1 \mu\text{C}/\text{cm}^3$	POSITIVO
	250	$-2 \mu\text{C}/\text{cm}^3$	POSITIVO
	750	$-2 \mu\text{C}/\text{cm}^3$	POSITIVO

\* Si preguntamos en el punto en cuestión, si la densidad es positiva será positiva y si es negativa, será negativa.

Tomamos como referencia  $-\infty$  hasta el punto  $x$ .

Si la densidad es positiva, el campo eléctrico será positivo y viceversa, pero debe tener en cuenta que la densidad NO es la misma para todo el bloque de silicio (NO es uniforme). En el punto (b) se desarrolla como ejemplo, pero se puede observar y deducir.

$$b) \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \Rightarrow \frac{\partial E_x}{\partial x} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \Rightarrow \int_x^x \partial E_x = \int_{x_0}^{x_f} \frac{\rho}{\epsilon_0} dx \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_f = E_0 + \int_{x_0}^{x_f} \frac{\rho(x)}{\epsilon_0}$$

Para este caso  $E_0 = 0$ ,  $x_0 = -\infty$ ,  $x_f = -250 \text{ mm}$

$$E_f = \int_{-\infty}^{-250} \frac{\rho(x) dx}{\epsilon_0} = \int_{-\infty}^{-250} 0 dx + \int_{-250}^{-500} \frac{3 \mu\text{C}}{\text{cm}^3} \cdot \frac{1}{\epsilon_0} + \int_{-500}^{-250} \frac{1 \mu\text{C}}{\text{cm}^3} \cdot \frac{1}{\epsilon_0}$$

$$= \frac{1}{\epsilon_0} \left[ 3 \mu\text{C}/\text{cm}^3 \cdot (-500 - (-250)) \text{ mm} + 1 \mu\text{C}/\text{cm}^3 \cdot (-250 - (-500)) \right]$$

$$= \frac{1}{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ m} \cdot 11,7} \left[ 3 \mu\text{C}/\text{cm}^3 \cdot 750 \text{ mm} + 1 \mu\text{C}/\text{cm}^3 \cdot 250 \text{ mm} \right]$$

$$= \frac{2500 \cdot 10^{-12} \text{ C}/\text{cm}^3 \cdot 10^4 \text{ m}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 11,7} = 24,1440 \cdot \frac{\mu\text{C}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{\text{C}}{\text{F}} =$$

$$= 24,1440 \cdot 10^4 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3} \cdot \frac{\text{C}}{\frac{\text{cm}}{\text{Nm}}} = 2,4144 \cdot 10^5 \cdot 10^2 \frac{\text{cm}}{\text{cm}} \frac{\text{N}}{\text{C}} \Rightarrow$$

$2,4144 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}}$

c) El campo es máximo en 250 mm, ya que la densidad es positiva ( $\rho(x) > 0$ ). Luego comienza a disminuir.

(d) Se puede generalizar de la siguiente manera:

$$\frac{mC/cm^3}{8,85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m} \cdot 117} \rho_0 \int_{x_0}^{x_f} dx = \frac{mC \cdot m \cdot mm}{103,545 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm} \cdot cm^3} \rho_0 (x_f - x_0) =$$

$$= \frac{10^3 \frac{C}{m} \cdot 10^{-9} m \cdot m}{103,545 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm} \cdot 10^6 m^3} \rho_0 (x_f - x_0)$$

$$= \boxed{9,6576 \cdot 10^3 \rho_0 (x_f - x_0) \frac{N}{C}}$$

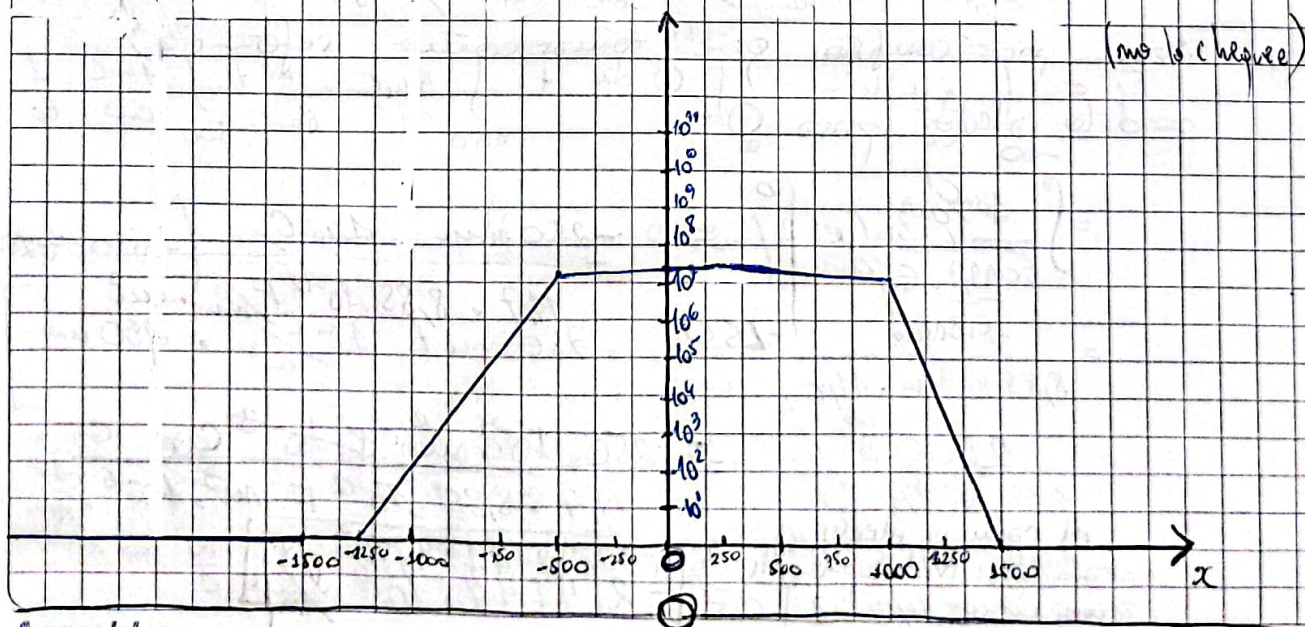
En (SI) (C) S

$$[E(x)] = \frac{N}{C}$$

$\vec{E}(x) =$

$$\left. \begin{aligned} & 2,8972 \cdot 10^7 / (1250 + x_0) \quad \text{Si} \quad -1250 \leq x < -500 \\ & 2,1729 \cdot 10^7 + 9,6576 \cdot 10^3 (500 + x_0) \quad \text{Si} \quad -500 \leq x < 250 \\ & 2,8972 \cdot 10^7 - 1,9315 \cdot 10^4 (x_0 - 250) \quad \text{Si} \quad 250 \leq x < 1000 \\ & 1,4485 \cdot 10^7 - 2,8972 \cdot 10^4 (x_0 - 1500) \quad \text{Si} \quad 1000 \leq x < 1500 \end{aligned} \right\}$$

○ en otro caso





2. (a) Similar al anterior :

$$9,6576 \cdot 10^3 \rho_0 (x_f - x_0) \frac{N}{C}$$

$$\vec{E} = 9,6576 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot (200 - 150) - 9,6576 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot (150 - 100) - 9,6576 \cdot 10^3 \cdot 10 (\Delta) = 0$$

$$\underbrace{9,6576 \cdot 10^3}_{=0} \cdot \underbrace{[750 - 500 - 10 \Delta]}_{=0} = 0 \Rightarrow$$

$$\boxed{\Delta = 25}$$

(b)  $\vec{E}(-250) = -9,6576 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot (200 - 275) =$

$$\boxed{\vec{E}(-250) = -2,4244 \cdot 10^6 \frac{N}{C}}$$

$$\vec{E}(150) = -9,6576 \cdot 10^3 \cdot 10 (300 - 275) - 9,6576 \cdot 10^3 \cdot 10 (150 - 100)$$

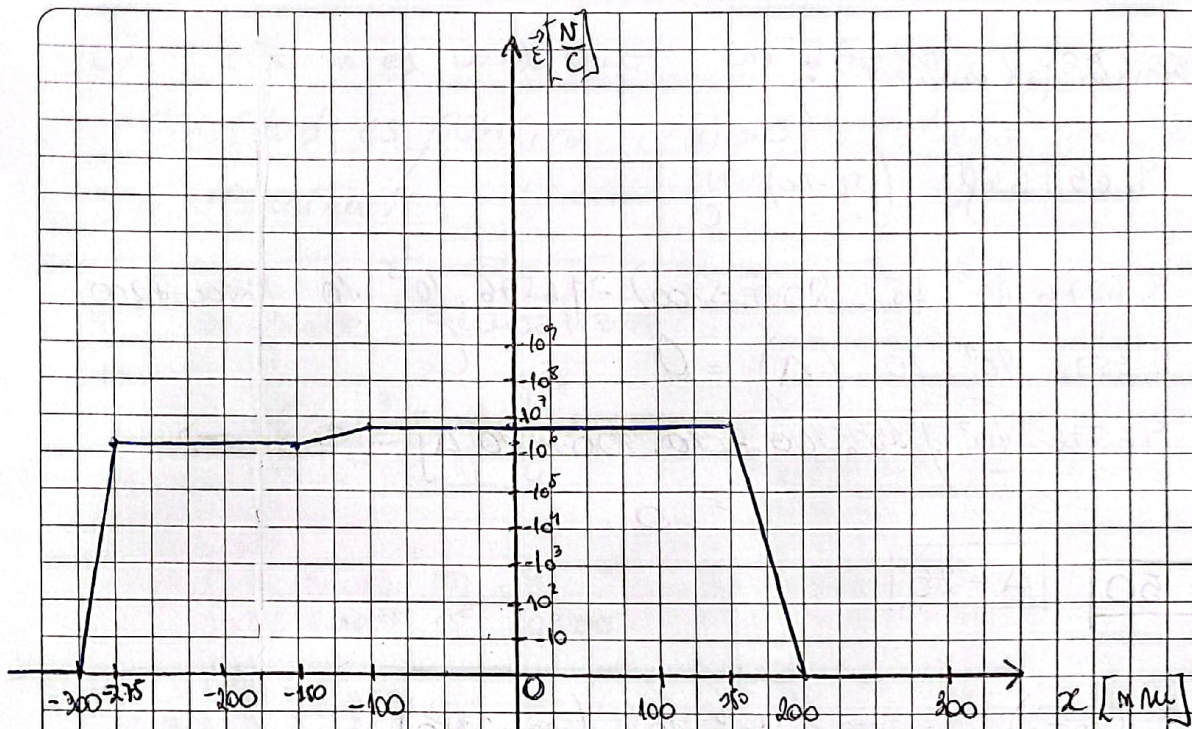
$$\boxed{\vec{E}(150) = -7,2432 \cdot 10^6 \frac{N}{C}}$$

(c)

$$[E(x)] = \frac{N}{C}$$

$$\vec{E}(x) = \begin{cases} -9,6576 \cdot 10^4 \cdot (300 + x) & \text{si } -300 < x < -275 \\ -2,4244 \cdot 10^6 & \text{si } -275 < x < -150 \\ -2,4244 \cdot 10^6 + 9,6576 \cdot 10^4 (150 + x) & \text{si } -150 < x < -100 \\ -7,2432 \cdot 10^6 & \text{si } -100 < x < 150 \\ -7,2432 \cdot 10^6 + 1,44864 \cdot 10^5 \left( \frac{x - 150}{-150} \right) & \text{si } 150 < x < 200 \end{cases}$$

○ en otro caso



(d)  $\phi(-\infty) = 0 \text{ mV}$

Recordando que:  $V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$

$$\phi(350) = - \int_{-\infty}^{350} E(x) dx = - \left[ -9,6576 \cdot 10^4 \left( 300x + \frac{x^2}{2} \right) \Big|_{-300}^{-275} - 2,4544 \cdot 10^6 x \Big|_{-275}^{-150} + \left( -2,4544 \cdot 10^6 x - 9,6576 \cdot 10^4 \left( \frac{x^2}{2} \right) \right) \Big|_{-150}^{-100} - 7,2432 \cdot 10^6 x \Big|_{-100}^{150} + \left( -7,2432 \cdot 10^6 x + 1,44864 \cdot 10^5 \left( \frac{x^2}{2} - 150 \right) \right) \Big|_{150}^{300} + 0 \Big|_{200}^{350} \right] \cdot 10^9$$

$\phi(350) = 2,5653 \text{ V}$

3. a) Con la propuesta en 1 (b) se sabe que:

$$\frac{2E}{2x} \circ 60\text{sr} = p(x)$$

Entonces, a partir del gráfico:

$$[E(x)] = \frac{KV}{\text{hr}}$$

$$E(x) = \begin{cases} \frac{4}{15}x + \frac{8}{15} & \text{Si } -2 \leq x \leq -1,25 \\ 0,2 & \text{Si } -1,25 < x < 1,25 \\ -\frac{4}{15}x + \frac{8}{15} & \text{Si } 1,25 \leq x \leq 2 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

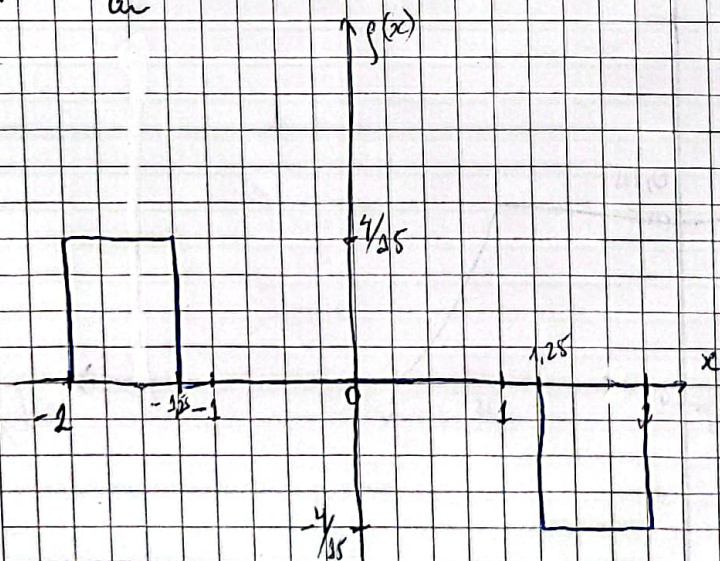
$$\frac{x - (-2)}{-1,25 - (-2)} = \frac{y - 0}{0,2 - 0} \quad \left. \vphantom{\frac{x - (-2)}{-1,25 - (-2)}} \right\} \left( \frac{4}{3}x + \frac{8}{3} \right) \cdot 0,2 = y \Rightarrow y = \frac{4x + 8}{15}$$

$$\frac{x - 1,25}{2 - 1,25} = \frac{y - 0,2}{0 - 0,2} \quad \left. \vphantom{\frac{x - 1,25}{2 - 1,25}} \right\} -0,2 \left( \frac{4x}{3} - \frac{5}{3} \right) = y - 0,2 \Rightarrow y = -\frac{4x + 8}{15}$$

Entonces

$$p(x) = \begin{cases} \frac{4}{15} & \text{Si } -2 \leq x \leq -1,25 \\ -\frac{4}{15} & \text{Si } 1,25 \leq x \leq 2 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$[p(x)] = \frac{KC}{\text{hr}}$$



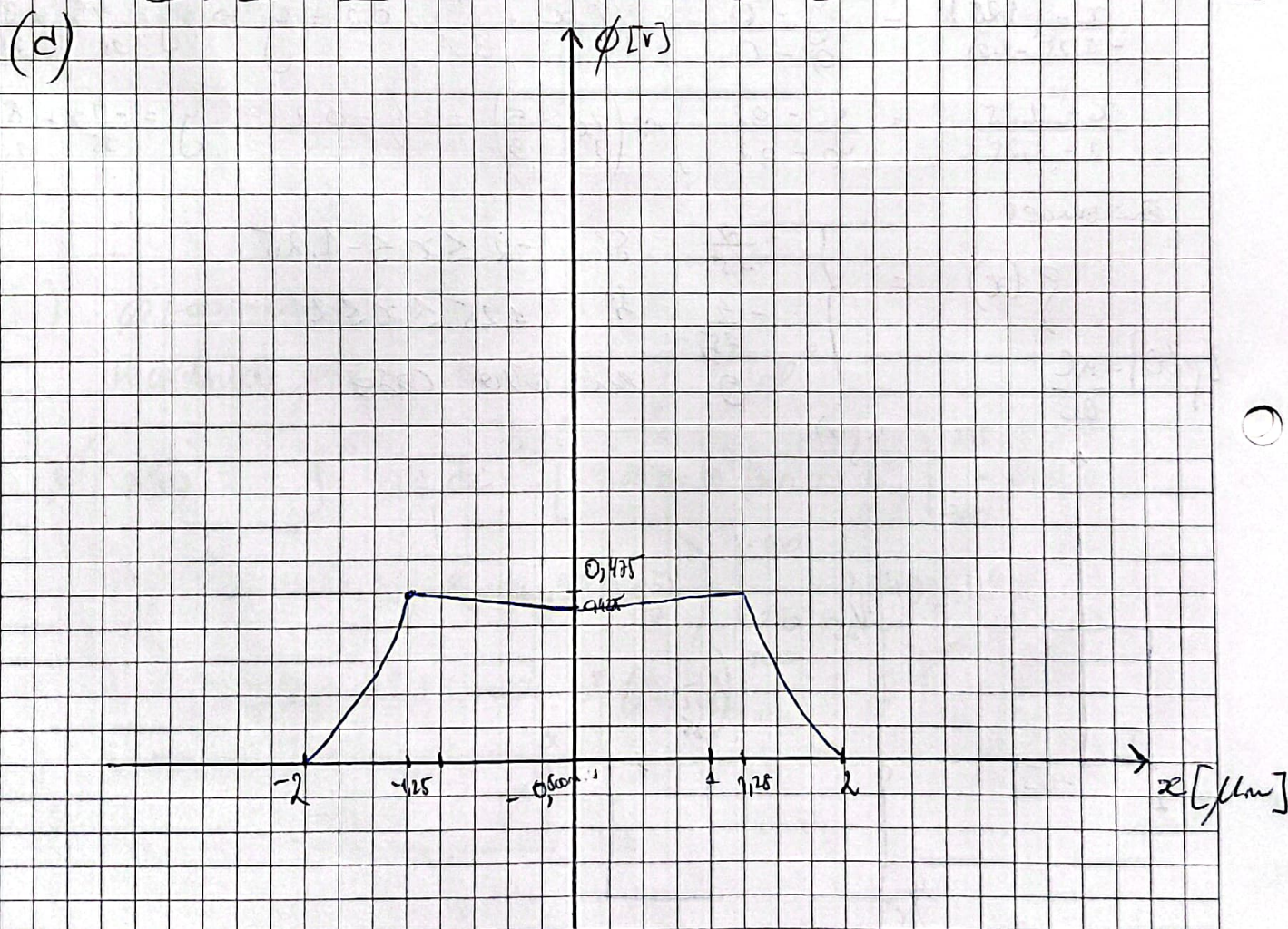
$$(b) \phi(0) = - \int_{-\infty}^0 E dx = - \left[ \int_{-2}^{-1,25} (4x + \frac{8}{95}) dx + \int_{-1,25}^0 0,2 dx \right] + \left[ - \int_{-\infty}^2 E(x) dx \right]$$

$$\phi(0) = - \left[ 2x^2 + \frac{8}{95}x \right]_{-2}^{-1,25} + 0,2x \Big|_{-1,25}^0 \cdot 10^{-4} = - \left[ -\frac{179}{40} + \frac{1}{4} \right] \cdot 10^{-4} \text{ V}$$

$\mu m = 10^{-4} \text{ cm}$

$$\phi(0) = 0,4225 \text{ V} - 0,500 \text{ V} \Rightarrow \phi(0) = \boxed{-0,0775 \text{ V}}$$

(c) El potencial de 0 a  $\mu m$  es igual a -2 a 0 pero negativo, por lo que el potencial en  $\phi(2) = -500 \text{ mV}$  (igual a  $\phi(-2)$ )




de los tres evaluados

$$\%(\text{a}) \quad \sigma = 2\mu C / a^2$$

--	--

(6)



o PARTE II: Semi-conductores intrínsecos y extrínsecos

5. En silicio intrínseco (puro) vale:

$$n_i = 2 \left( \frac{2\pi \sqrt{m_n^* m_p^*} k T}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad \# \text{ si lo quieres en } \text{cm}^{-3} \cdot 10^{-6}$$

Dado que se trabaja con silicio, pueden utilizarse los valores de la tabla

$$n_i = 2 \left( 1,4429 \cdot 10^{24} \right)^{3/2} \exp \left( -\frac{6498,78 \text{ K}}{T} \right) \cdot 10^{-6} \text{ cm}^{-3}$$

Reemplazando con los valores de temperatura solicitados.

$n_i [\text{cm}^{-3}]$	T
$2,467 \cdot 10^6$	$-50^\circ \text{C} \rightarrow 223 \text{ K}$
$6,954 \cdot 10^8$	$0^\circ \text{C} \rightarrow 273 \text{ K}$
$6,822 \cdot 10^9$	$27^\circ \text{C} \rightarrow 300 \text{ K}$
$3,564 \cdot 10^{10}$	$50^\circ \text{C} \rightarrow 323 \text{ K}$
$6,562 \cdot 10^{11}$	$100^\circ \text{C} \rightarrow 373 \text{ K}$



6.  $T_{amb} = 27^\circ C = 300K$

El cálculo es idéntico al anterior con la diferencia de que poseen otra energía de gap y otros valores de masa efectiva.

Para el Germanio:

$$n_{i_{Ge}} = 2 \left( \frac{2\pi \sqrt{0,56 \cdot 0,29} \cdot 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 300K}{(6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J})^2} \right)^{3/2} \cdot \exp\left(\frac{-0,66 \text{ eV}}{2 \cdot 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K} \cdot 300K}\right) \cdot 10^{-6} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_{i_{Ge}} = 1,8352 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

Para el Arseniuro de Galio

$$n_{i_{GaAs}} = 2 \left( \frac{2\pi \sqrt{0,068 \cdot 0,47} \cdot 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 300K}{(6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J})^2} \right)^{3/2} \cdot \exp\left(\frac{-1,42 \text{ eV}}{2 \cdot 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K} \cdot 300K}\right) \cdot 10^{-6} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_{i_{GaAs}} = 2,2399 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

Comparando los resultados con el del Silicio, se puede observar que a mayor energía, menor concentración intrínseca de portadores. Esto tiene sentido ya que la energía de gap es la diferencia de energía entre el bando de valencia y el de conducción.



y, por lo tanto, es la energía que necesita un electrón para pasar de la banda de valencia a la conducción.

Cuanto mayor sea dicha energía, más energía necesitará el electrón para saltar de banda.

7. a) Se puede tomar la concentración obtenida en 5. tal que, a  $T_{amb} = 300K$

$$n_i = 6,822 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

Dado que  $N_D \gg n_i$  (se considera mucho mayor a partir de 100 veces más grande) puede considerarse que

$N_D = n_0$   $\Rightarrow$  por ley de acción de masas  
vale que:

$$p_0 = \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$p_0 = \frac{(6,822 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3})^2}{4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}}$$

$$\therefore p_0 = 4,6539 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

b) Para obtener la concentración de portadores mayoritarios, en caso de que estos sean electrones se utiliza la siguiente ecuación:

$$n_0 = \frac{(N_D - N_A)}{2} + \sqrt{\frac{(N_D - N_A)^2}{4} + n_i^2}$$

Además, por la ley de acción de masas

$$p_0 n_0 = n_i^2,$$

por lo que se pueden obtener las respectivas concentraciones a partir del dopaje y la concentración intrínseca  $n_i$ .

⚠ cuando se habla de concentraciones, es más correcto de decir "densidad".

Entonces,

• para  $N_D : 10^8 \text{ cm}^{-3}$

$$n_0 = \frac{(10^8 \text{ cm}^{-3} - 0)}{2} + \sqrt{\frac{(10^8 - 0)^2}{4} + (6,822 \cdot 10^9)^2}$$

$$n_0 = 6,8722 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

$$p_0 = \frac{(6,822 \cdot 10^9)^2 (\text{cm}^{-3})^2}{6,8722 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}} = 6,772 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

• para  $N_D : 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

$$n_0 = \frac{(10^{10} \text{ cm}^{-3})}{2} + \sqrt{\frac{(10^{10})^2}{4} + (6,822 \cdot 10^9)^2}$$

$$n_0 = 1,3458 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

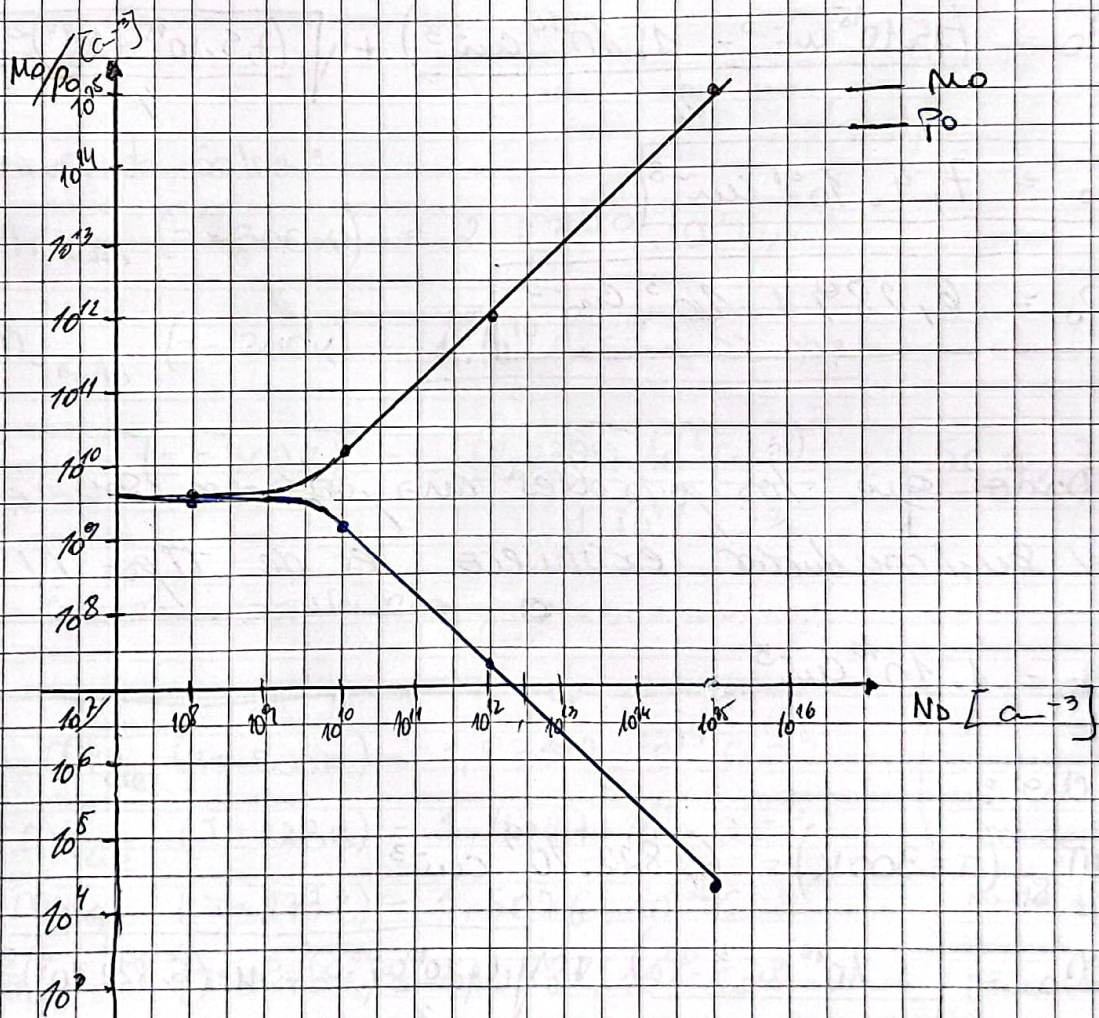
$$p_0 = 3,4581 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

• para  $N_D = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

$$n_0 = \left( \frac{10^{12} \text{ cm}^{-3}}{2} \right) + \sqrt{\frac{(10^{12} \text{ cm}^{-3})^2}{4} + (6,822 \cdot 10^9)^2}$$

$$n_0 = 1 \cdot 10^{12}$$

$$p_0 = 4,6537 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$



c) Si los portadores mayoritarios son huecos, bajarán del punto (2) cambia  $n_0$  por  $p_0$  y  $N_D$  se intercambia con  $N_A$ . En este caso darán los mismos resultados, pero cambiados

8. a) Es similar al anterior, con la diferencia que al ser mayor la concentración de átomos donantes, se calcula:

$$n_0 = \frac{(N_D - N_A)}{2} + \sqrt{\frac{(N_D - N_A)^2}{4} + n_i^2}$$

Entonces: (utilizando el  $n_i$  calculado en 5.)

$$n_0 = \frac{(7,5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} - 1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3})}{2} + \sqrt{\frac{(7,5 \cdot 10^{15} - 10^{14})^2}{4} + (6,822 \cdot 10^9)^2}$$

$$n_0 = 7,4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$p_0 = 6,2891 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

b) Dado que los portadores mayoritarios son electrones, el semiconductor extrínseco es de tipo N.

9.  $N_D = 4 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Silicio:

$$n_{i, \text{Si}} (T=300\text{K}) = 6,822 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

$$n_0 = \frac{(4 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3} - 0)}{2} + \sqrt{\frac{(4 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3} - 0)^2}{4} + (6,822 \cdot 10^9)^2}$$

$$n_0 = 1,3458 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$p_0 = \frac{(6,822 \cdot 10^9)^2}{1,3458 \cdot 10^{10}} \text{ cm}^{-3} =$$

$$p_0 = 3,4581 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

Cambra  $p_0$  ca,  
debilmente  
extrínseco

Germanio:

$$M_{i\text{Ge}} (T=300\text{K}) = 1,8352 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$M_{o\text{Ge}} (T=300\text{K}) \approx 1,8352 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \gg 1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3} = N_D$$

$$P_{o\text{Ge}} (T=300\text{K}) = \frac{(1,8352 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3})^2}{1,8352 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}} = 1,8352 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

intrínseco, no cambia.

Arsenuro de Galio:

$$M_{i\text{GaAs}} (T=300\text{K}) = 2,2399 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

$$M_{o\text{GaAs}} (T=300\text{K}) = 1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3} = N_D \gg M_{i\text{GaAs}}$$

$$P_{o\text{GaAs}} (T=300\text{K}) = \frac{(2,2399 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3})^2}{1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}} = 501,7152 \text{ cm}^{-3}$$

fuertemente extrínseco, cambia mucho.

$$10. M_{i\text{Ge}} (T=300\text{K}) = 1,8352 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$M_{i\text{Ge}} (T=223\text{K}) = 1,4327 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$M_{i\text{Ge}} (T=273\text{K}) = 4,5076 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$

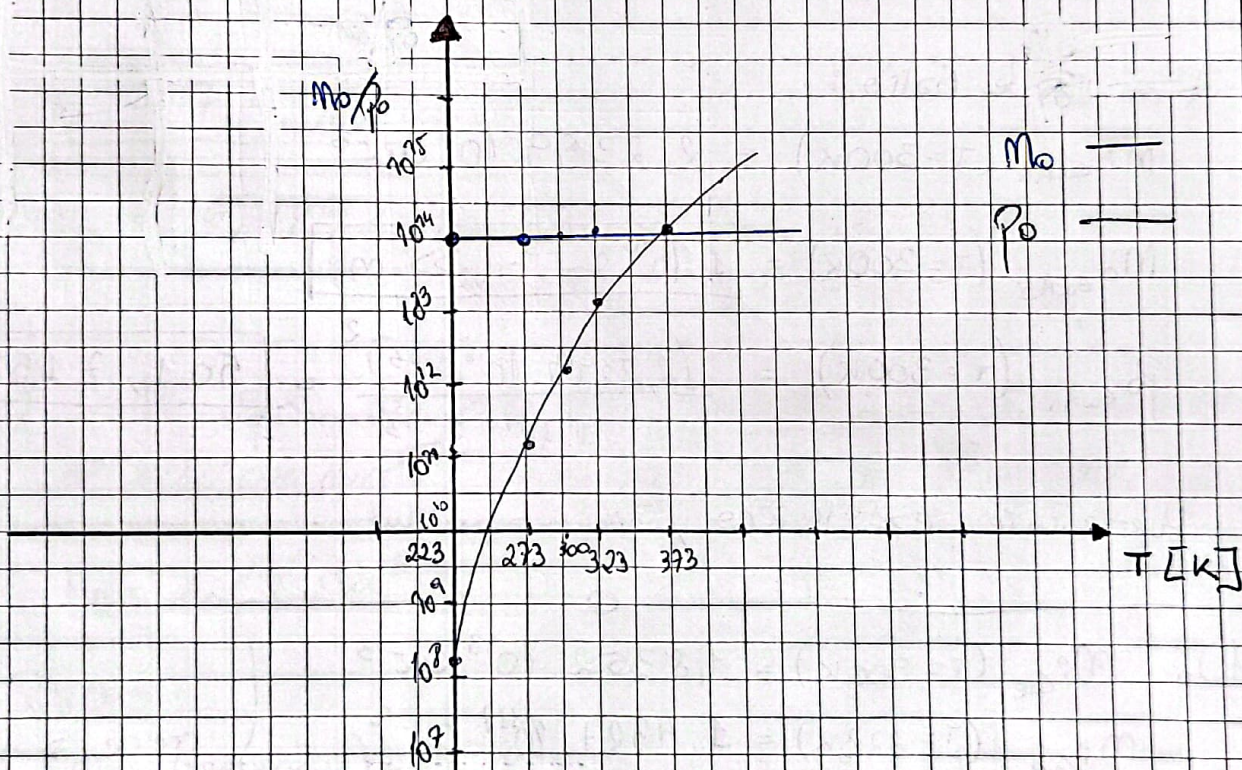
$$M_{i\text{Ge}} (T=323\text{K}) = 5,0884 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$M_{i\text{Ge}} (T=373\text{K}) = 3,0944 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

crece a medida que aumenta la temperatura

T [K]	$n_p [cm^{-3}]$	$n_e [cm^{-3}]$	$P_0 [cm^{-3}]$
223	$7,4327 \cdot 10^{21}$	$1 \cdot 10^{24} cm^{-3}$	$2,0526 \cdot 10^8$
273	$9,5076 \cdot 10^{22}$	$1 \cdot 10^{24}$	$2,10318 \cdot 10^{11}$
300	$1,8352 \cdot 10^{23}$	$1,03 \cdot 10^{24}$	$3,2698 \cdot 10^{12}$
323	$5,0884 \cdot 10^{23}$	$1,223 \cdot 10^{24}$	$2,13399 \cdot 10^{13}$
373	$3,0914 \cdot 10^{24}$	$3,634 \cdot 10^{24}$	$2,6345 \cdot 10^{14}$

$$N_D = 1 \cdot 10^{24} cm^{-3}$$



• PARTE III: Densidades de corriente y conductividad

11. La conductividad  $\sigma$  se calcula como:

$$\sigma = q (n_0 \mu_n + p_0 \mu_p) \quad [(\Omega \text{ cm})^{-1}]$$

De esta manera, utilizando las concentraciones obtenidas en ejercicios anteriores: (dado que es intrínseco, por ley de acción de masas  $n_0 = p_0 = n_i$ )

$$\sigma_{Si} (T=300K) = 1,602 \cdot 10^{-19} \left[ 6,822 \cdot 10^9 \cdot (1450 + 1500) \right] (\Omega \text{ cm})^{-1}$$

$$\sigma_{Si} (T=300K) = 2,1311 \cdot 10^{-6} (\text{cm } \Omega)^{-1}$$

$$\sigma_{Ge} (T=300K) = 1,602 \cdot 10^{-19} \left[ 1,8352 \cdot 10^{13} \cdot (3900 + 2300) \right] (\Omega \text{ cm})^{-1}$$

$$\sigma_{Ge} (T=300K) = 0,0182 (\text{cm } \Omega)^{-1}$$

$$\sigma_{GaAs} (T=300K) = 1,602 \cdot 10^{-19} \left[ 2,2399 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3} (9000 + 460) \right] (\Omega \text{ cm})^{-1}$$

$$\sigma_{GaAs} (T=300K) = 3,3945 \cdot 10^{-9} (\Omega \text{ cm})^{-1}$$

12. Las ventas son las mismas, pero los valores de la movilidad dependen de la temperatura de la siguiente manera:

$$\mu = \mu_{min} + \frac{\mu_0}{1 + (N/N_{ref})^\alpha}$$

• fórmula válida para el silicio

o bien

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^\alpha$$

se da

$$\alpha_e = 3/2$$

$$\alpha_p = 5/2$$

• también se puede observar el gráfico y obtener los parámetros de forma directa.

Aunque pueden despreciarse en esta materia, por lo que se utilizarán los valores de movilidad previstos por el ejercicio.

T [K]	$\sigma_{Si}$	$\sigma_{Ge}$	$\sigma_{GaAs}$
223	$7,7066 \cdot 10^{-6}$	$1,4230 \cdot 10^{-4}$	$1,0850 \cdot 10^{-13}$
273	$2,1714 \cdot 10^{-7}$	$4,4771 \cdot 10^{-3}$	$1,2769 \cdot 10^{-10}$
300	$2,1311 \cdot 10^{-6}$	0,0182	$2,2247 \cdot 10^{-9}$
323	$1,1933 \cdot 10^{-5}$	0,0505	$1,7569 \cdot 10^{-8}$
373	$2,0499 \cdot 10^{-4}$	0,3073	$6,6628 \cdot 10^{-7}$

[ $\mu m^{-1}$ ] por ser intrínsecos el material

$$n_0 = p_0 = n_i$$

(ley de acción de masas en material intrínsecos), por lo que la ecuación

$$\sigma = q n_i (\mu_n + \mu_p)$$

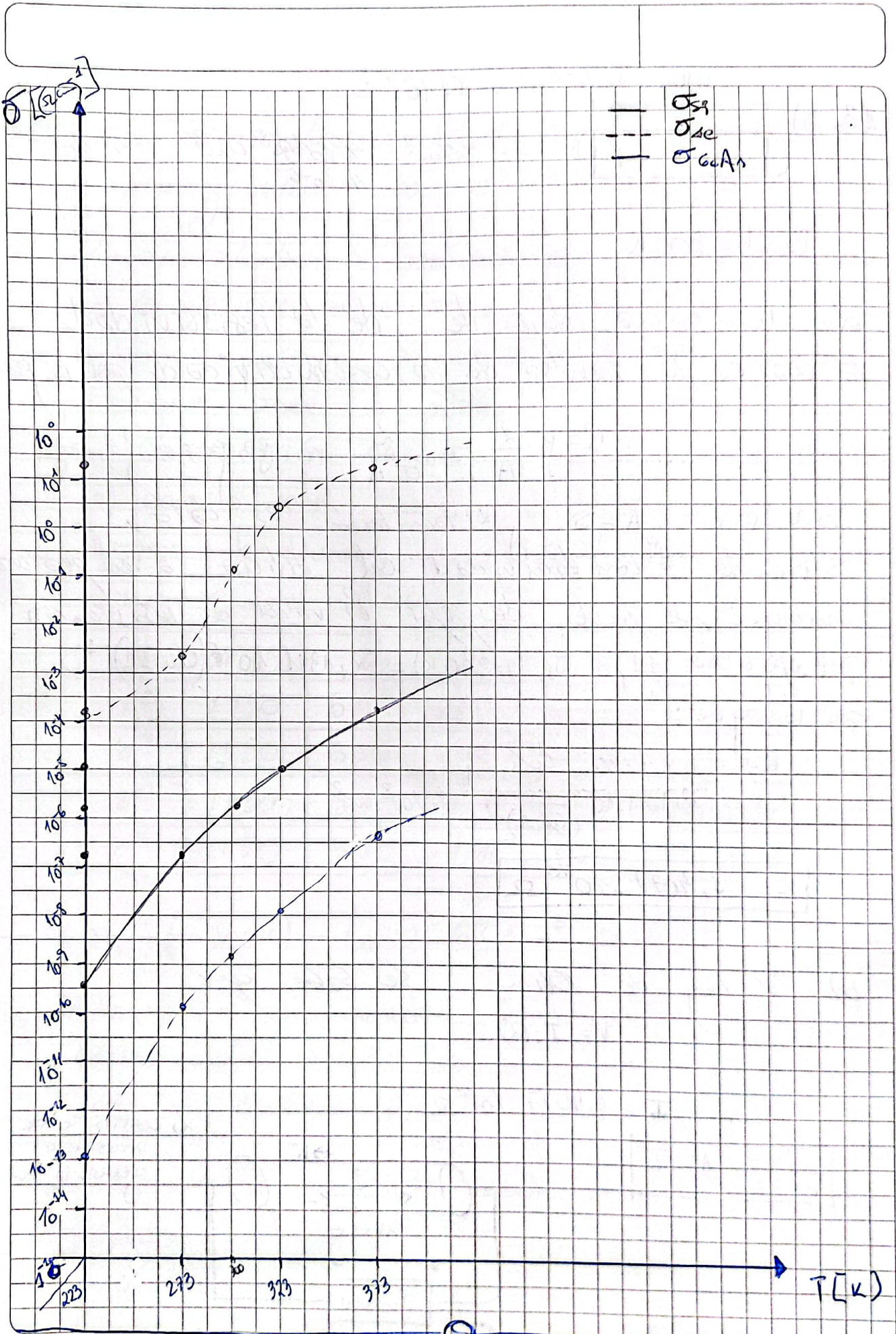
Para las concentraciones intrínsecas del silicio y el germanio, se pueden utilizar los datos de los ejercicios 5 y 10.

Para el arseniuro de Galio se debe calcular de la misma forma que antes.

Se presenta la tabla a continuación:

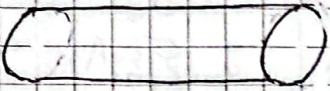
T [K]	$n_i$ GaAs
223	109,2454
273	$1,2856 \cdot 10^5$
300	$2,2399 \cdot 10^6$
323	$1,7689 \cdot 10^7$
373	$6,7072 \cdot 10^8$





13. a)  $12 \mu\text{m} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 12 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$

$S = 4 \mu\text{m}^2 = 4 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2 = 4 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$



$T_{\text{amb}} = 300 \text{ K}$

La resistencia depende de la resistividad, la cual es la inversa de la conductividad, por lo que:

$$R = \rho \frac{L}{A} = \frac{L}{\sigma A} \quad \text{ya que } \rho = \frac{1}{\sigma}$$

Dado que  $A = S$  y  $L$  también es dato, sabiendo la conductividad del silicio a temperatura ambiente, se puede determinar el valor de resistencia del ejercicio 11,  $\sigma_{\text{Si}} (T = 300 \text{ K}) = 2,1311 \cdot 10^{-6} (\text{cm } \Omega)^{-1}$ , por lo que:

$$R = \frac{12 \cdot 10^{-4} \text{ cm}}{2,1311 \cdot 10^{-6} \frac{1}{(\text{cm } \Omega)} \cdot 4 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2} =$$

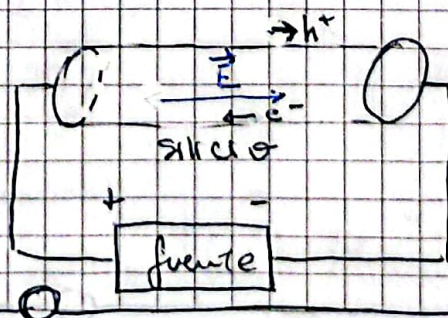
$$R = 1,4077 \cdot 10^{10} \Omega$$

b) Por ley de Ohm se sabe que:

$$V = I \cdot R$$

$$V_{\text{EXT}} = I \cdot 1,4077 \cdot 10^{10} \Omega$$

$$\boxed{V_{\text{EXT}} = I = 1,4077 \cdot 10^0}$$



La corriente de arranque es generada por el  $\text{Si}$

14. Para obtener la movilidad se debe observar el gráfico y obtener los valores respectivos.

Luego, calcular la conductividad con la fórmula de los ejercicios anteriores.

El boro pertenece al grupo III de la Tabla periódica, por lo que posee tres enlaces.

En comparación con el silicio que posee cuatro, al compararlo con boro, este último actúa como Aceptor de electrones, puesto que posee un enlace menos que el silicio.

$N_A$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$\mu_n$ [ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ]	$\mu_p$ [ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ]	$n_0$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$p_0$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$\sigma_{Si}$
$10^8$	1450	500	$6,822 \cdot 10^9$	$6,772 \cdot 10^9$	$2,4387 \cdot 10^6$
$10^{10}$	1450	500	$1,3458 \cdot 10^{10}$	$3,4584 \cdot 10^9$	$3,4039 \cdot 10^6$
$10^{12}$	1450	500	$1 \cdot 10^{12}$	$1,6537 \cdot 10^7$	$2,3229 \cdot 10^4$
$10^{15}$	1450	500	$1 \cdot 10^{15}$	$1,6539 \cdot 10^4$	0,23229

$$n_{p_{Si}} (T=300K) = 6,822 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3} \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3} \quad (\text{usaremos esto aprox})$$

\* los valores de movilidad se mantendrán para dichas concentraciones (apenas cambia un poco el de  $10^{15}$  para los electrones, pero lo deje así).

La movilidad lo obtenemos siempre del gráfico.

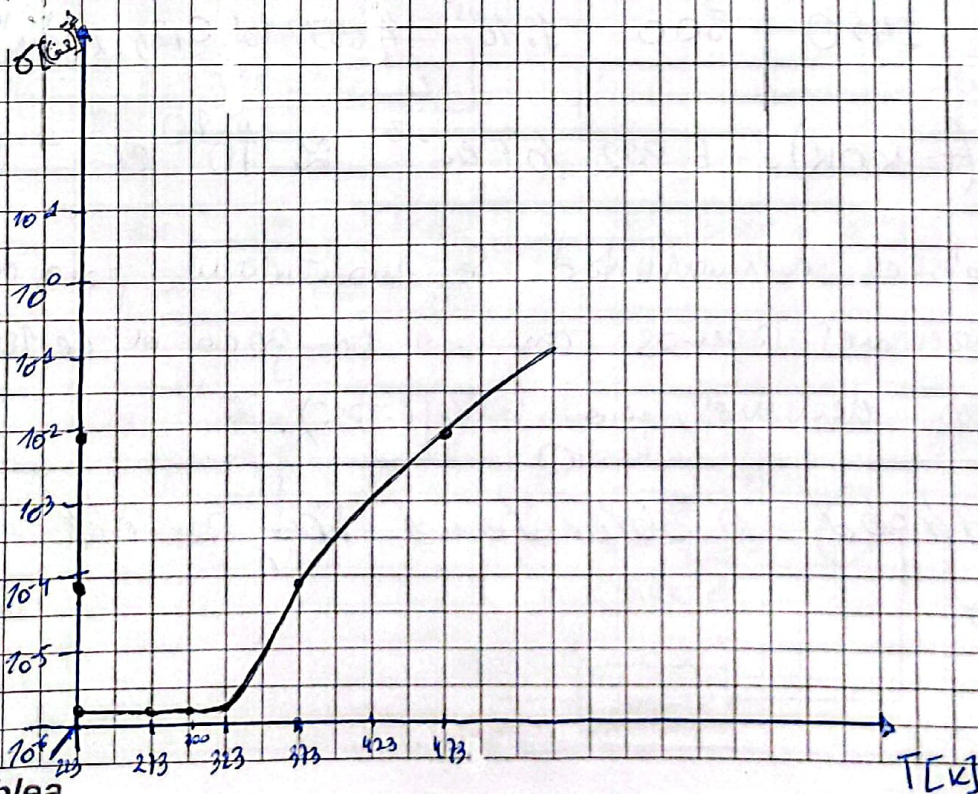
15. La movilidad para  $N_A = 1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

$$\mu_n = 1450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$\mu_p = 500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$M_0(T=473\text{K}) = 3,7284 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

T [K]	$n_0 [\text{cm}^{-3}]$	$P_0 [\text{cm}^{-3}]$	$\sigma [\text{cm}^{-1}]$
223	6,0860	$4 \cdot 10^{12}$	$8,01 \cdot 10^{-5}$
273	$4,83264 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{12}$	$8,01 \cdot 10^{-5}$
300	$4,6539 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^{12}$	$8,0110 \cdot 10^{-5}$
323	$4,2702 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{12}$	$8,0395 \cdot 10^{-5}$
373	$3,2498 \cdot 10^{11}$	$1,3249 \cdot 10^{12}$	$1,8161 \cdot 10^{-4}$
473	$3,6786 \cdot 10^{13}$	$3,7781 \cdot 10^{13}$	0,0135



$M_e/P_0 [k^3/A]$

—  $P_0$   
—  $M_0$

$10^{14}$

$10^{13}$

$10^{12}$

$10^{11}$

$10^{10}$

$10^9$

$10^8$

$10^7$

$10^6$

$10^5$

$10^4$

$10^3$

$10^2$

$10^1$

$10^0$

$10^{-1}$

$10^{-2}$

273

100

323

473

473

473

$T [K]$

16. Dado que es de tipo P, los portadores mayoritarios son huecos y el dopante es un ACEPTOR.

$$T_{amb} = 300K$$

$$\rho = \text{resistividad} = 250 \Omega \text{ cm} \Rightarrow \sigma = 4 \cdot 10^{-3} (\Omega \text{ cm})^{-1}$$

La corriente de arraste tiene la misma dirección que el campo eléctrico aplicado. esto se calcula como:

$$\vec{J}_p^a = p_0 q \mu_p \vec{E} \quad (\text{huecos}) \quad [A/cm^2]$$

$$\vec{J}_n^a = n_0 q \mu_n \vec{E} \quad (\text{electrones}) \quad [A/cm^2]$$

La densidad de corriente de arraste total es:

$$\vec{J}^a = \vec{J}_p^a + \vec{J}_n^a = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E}$$

Entonces:

$$1 \cdot 10^4 A/cm^2 = \frac{1}{250 \Omega \text{ cm}} E$$

$$(b) \quad \boxed{2,5 \cdot 10^6 \frac{V}{cm} = E}$$

$$a) \quad \mu_n = 1450 \text{ cm}^2/Vs$$

$$\mu_p = 500 \text{ cm}^2/Vs$$

$$N_A (T=300K) = 6,822 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

para un dopaje cercano a los valores de  $n_i$ , se considera que  $\mu_n$  y  $\mu_p$  no deberán cambiar.

Dado que:

$$1 \cdot 10^4 A/cm^2 = p_0 \cdot q \mu_p E + n_0 \cdot q \mu_n E$$

es posible aproximar el resultado a:

$$1 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2 = \rho_0 \cdot 2,0025 \cdot 10^{-10} + M_0 \cdot 5,8 \cdot 10^{-10}$$

Además, sabiendo que por ley de acción de masas:

$$M_0 \cdot \rho_0 = M_i^2$$

$$M_0 \cdot \rho_0 = (6,822 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3})^2 = 4,6539 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-6}$$

Entonces, despejo:

$$M_0 = \frac{4,6539 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-6}}{\rho_0} \Rightarrow$$

$$\rho_0 \left( 1 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2 \right) = \rho_0 \cdot 2,0025 \cdot 10^{-10} + \frac{1}{\rho_0} \cdot 4,6539 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-6} \cdot 5,8 \cdot 10^{-10}$$

$$\rho_0^2 \cdot 2,0025 \cdot 10^{-10} - \rho_0 \cdot 1 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2 + 2,6993 \cdot 10^{10} = 0$$

$$\rho_0 = 4,99 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \quad \text{o} \quad \rho_0 = 2,6993 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

no tiene sentido  
ya que al dopar con  
un aceptor

Entonces:

$$\frac{M_i^2}{\rho_0} = M_0 = 9,3195 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$\rho_0 > M_i$

$$(c) \quad \vec{J}_p^a = \rho_p \cdot q \cdot \mu_p \vec{E}$$

$$\vec{J}_m^a = n_0 \cdot q \cdot \mu_n \vec{E}$$

$$J_p^a = 4,99 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 500 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

$$\boxed{J_p^a \approx 9992,475 \text{ A/cm}^2}$$

$$J_m^a = 9,3295 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1450 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

$$\boxed{J_m^a \approx 5,4053 \cdot 10^{-4} \text{ A/cm}^2}$$

evidentemente debe haber un error de aproximaciones, ya que la suma debe dar 10000 A/cm<sup>2</sup>.

(d) La velocidad de arrastre se calcula como:

$$\vec{v}_p^a = -\mu_p \vec{E} \text{ (huecos)}$$

$$\vec{v}_m^a = -\mu_n \vec{E} \text{ (electrones)}$$

Posee signo negativo ya que va en dirección contraria al campo eléctrico.

$$v_p^a = -500 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$$

$$\boxed{v_p^a = -1,25 \cdot 10^9 \text{ cm/s}}$$

$$v_m^a = -1450 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$$

$$\boxed{v_m^a = -3,625 \cdot 10^9 \text{ cm/s}}$$



$$17. N_D = 1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \quad m_i (\tau=300\text{K}) = 6,822 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$$

$$E(x) = 1 \cdot 10^3 \text{ V/cm} = 1000 \text{ V/cm } \hat{x}$$

$$m_0 = \frac{(1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3})}{2} + \sqrt{\frac{(1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3})^2}{4} + (6,822 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2})^2}$$

$$m_0 = 1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$p_0 = 4,6539 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

$$(a) \mu_p = 500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$\mu_n = 1450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$\vec{N}_p^a = -500 \text{ cm}^2/\text{Vs} \cdot 10^3 \text{ V/cm} = -5 \cdot 10^5 \text{ cm/s } \hat{x}$$

$$\vec{N}_n^a = -1450 \text{ cm}^2/\text{Vs} \cdot 10^3 \text{ V/cm} = -1,45 \cdot 10^6 \text{ cm/s } \hat{x}$$

$$(b) \vec{J}_p^a = p_0 \cdot q \cdot \mu_p \vec{E}$$

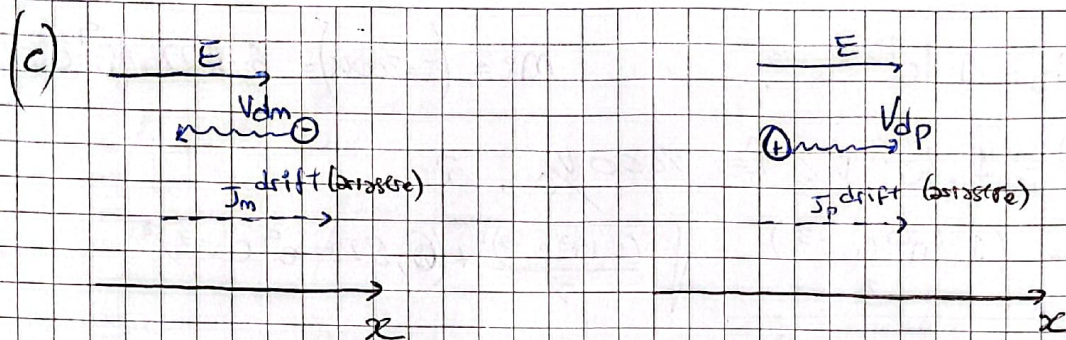
$$\vec{J}_p^a = 4,6539 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 500 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot 1000 \frac{\text{V}}{\text{cm}} \hat{x}$$

$$\vec{J}_p^a = 3,7277 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \hat{x}$$

$$\vec{J}_n^a = n_0 \cdot q \cdot \mu_n \vec{E}$$

$$\vec{J}_n^a = 1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1450 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \cdot 1000 \frac{\text{V}}{\text{cm}} \hat{x}$$

$$\vec{J}_n^a = 2,3229 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \hat{x}$$



(d) Porque la muestra de silicio está dopada con donores que hacen que los portadores mayoritarios sean electrones.  
 (DONAN UN ELECTRON<sup>-</sup>)

Poseen 5 enlaces covalentes a diferencia del silicio que posee tres.

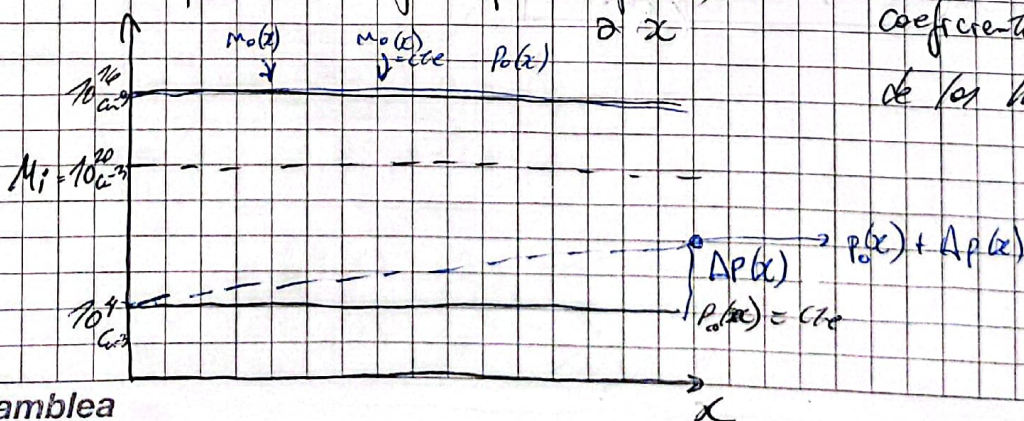
18.  $\lambda = 2/\mu_m = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$

$\Delta p(x) = 10^8 \text{ cm}^{-4} \cdot x$  siendo  $x$  la coordenada en la dirección del gradiente de concentración

$N_D = 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

$J_p \text{ diff} = -q D_p \frac{\Delta p(x)}{\Delta x}$

siendo  $D_p$  el coeficiente de difusión de los huecos.



$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} \Rightarrow D_p = \mu_p \left( \frac{kT}{q} \right) \rightarrow V_{th} = 25,9 \text{ mV}$$

karena temperatur  
2 Tamb

$$D_p = 500 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot 0,0259 \text{ V}$$

$$D_p = 12,95 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$p(x) = \underbrace{p_0(x)}_{\text{cte}} + \Delta p(x) = 1 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3} + 1 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-4} \cdot x$$

$$\begin{aligned} p(x=L) &= 10^4 \text{ cm}^{-3} + 10^8 \cdot 2 \mu \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-4} \\ &= 10^4 \text{ cm}^{-3} + 10^8 \cdot 2 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-4} \\ &= 10^4 \text{ cm}^{-3} + 10^8 \cdot 2 \cdot 10^6 \text{ cm} \cdot 100 \cdot \text{cm}^{-4} \\ &= 10^4 \text{ cm}^{-3} + 2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

$$p(x=L) = 3 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

$$p(x) = \underbrace{p_0(x)}_{\text{cte}} + \Delta p(x) = 1 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3} + 1 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-4} \cdot x$$

$$\frac{\partial p(x)}{\partial x} = 10^8 \text{ cm}^{-4}$$

$$\begin{aligned} J_p \text{ drf} &= -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 12,95 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot 10^8 \text{ cm}^{-4} \\ &= -207 \cdot 10^{-12} \text{ C/s cm}^{-2} \end{aligned}$$

$$J_p \text{ drf} = -207 \frac{\text{fA}}{\text{cm}^2}$$

• PARTE IV: Electroestática de los SC y relaciones de Boltzmann

19. (a) La región dopada con donores  $N_D$  es de tipo N ya que los portadores mayoritarios son electrones.

Por otro lado, la región dopada con ACEPTORES  $N_A$  es de tipo P, puesto que los portadores mayoritarios son protones.

(b) Suponiendo  $T_{amb} = 300\text{ K}$  y equilibrio térmico.

$$n_i = 6,822 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

Para la región de tipo N:

$$n_0 = \frac{N_D}{2} + \sqrt{\frac{N_D^2}{4} + n_i^2}$$

$$n_0 = \frac{(5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3})}{2} + \sqrt{\frac{(5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3})^2}{4} + (6,822 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3})^2}$$

$$n_0 = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$p_0 = 930,7936 \text{ cm}^{-3}$$

Para la región de tipo P

$$p_0 = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

ya que  $N_A \gg n_i$

$$n_0 = 232,6984 \text{ cm}^{-3}$$

(c) Utilizando la regla de los 60mV se puede calcular rápidamente el potencial de una especie de silicio dopada respecto a silicio intrínseco.

Por cada orden de magnitud de dopaje con respecto a silicio intrínseco se producen 60mV adicionales de tensión.

Para la región <sup>de tipo</sup> N (electrones, mayoritarios)

$$\phi_n(x) = 60\text{mV} \cdot \lg\left(\frac{n_0}{n_i}\right)$$

$$n_i = 6,822 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

$$n_0 = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$\phi_n = 411,90\text{mV} \quad \left. \vphantom{\phi_n} \right\} \text{respecto a silicio intrínseco}$$

Para la región de tipo P (huecos mayoritarios)

$$\phi_p(x) = -60\text{mV} \cdot \lg\left(\frac{p_0}{n_i}\right)$$

$$p_0 = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$\phi_p = -60\text{mV} \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}}{6,822 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}}\right)$$

$$\phi_p = -448,0270\text{mV} \quad \left. \vphantom{\phi_p} \right\} \text{respecto a silicio intrínseco}$$

Entonces, la diferencia de potencial entre la región de tipo N y la región de tipo P es de:

$$\Delta V_{NP} = \phi_N - \phi_P = (411,90 + 448,02) \text{ mV}$$

$$\Delta V_{NP} = 859,92\text{mV} \quad \left. \vphantom{\Delta V_{NP}} \right\} \text{entre regiones}$$

20. a) Ambas regiones son de tipo N ya que al doparlas con donadores sus portadores mayoritarios son electrones.

(b) Dado que en ambas regiones  $m_1 \ll N_{D1} \ll N_{D2}$

$$m_1 = N_{D1} \Rightarrow p_1 = 4,6539 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

$$m_2 = N_{D2} \Rightarrow p_2 = 46,5396 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

(c) Al igual que antes con la diferencia que para ambas utilice la fórmula respectiva para electrones;

$$\phi_m = 60 \text{ mV} \lg \left( \frac{m_0}{m_i} \right)$$

$$\phi_{m1} = 60 \text{ mV} \lg \left( \frac{1 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}}{4,6539 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}} \right) =$$

$$\phi_{m1} = 489,9652 \text{ mV}$$

$$\phi_{m2} = 60 \text{ mV} \lg \left( \frac{1 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}}{46,5396 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}} \right) =$$

$$\phi_{m2} = 489,9652 \text{ mV}$$

$$\Delta V_{A2} = (489,9652 - 489,9652) \text{ mV}$$

$$\Delta V_{A2} = -300 \text{ mV} \quad \text{y entre regiones}$$

○

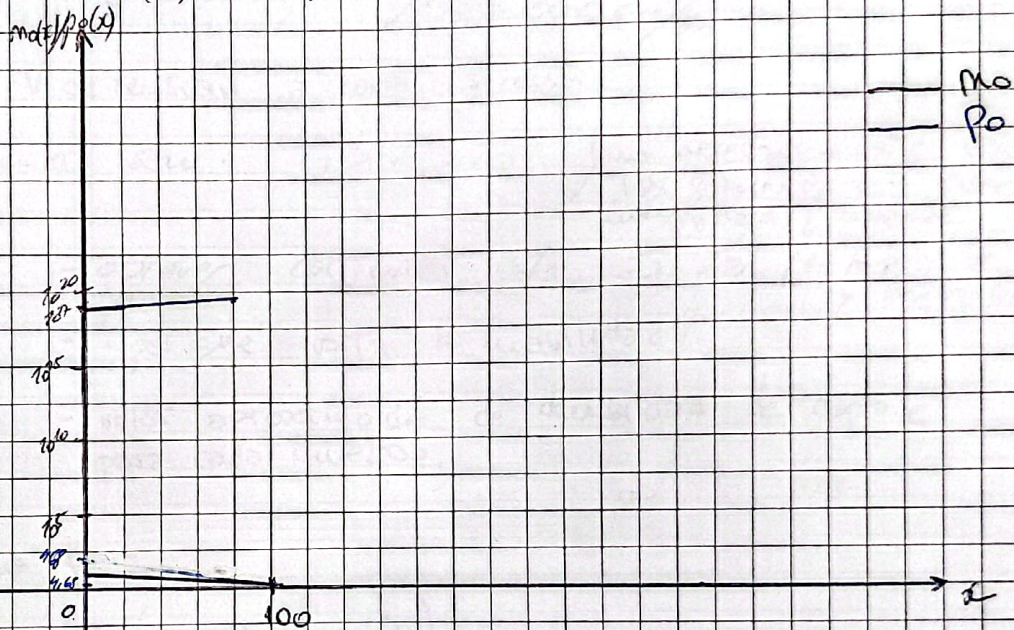
21. (a) A partir de la aproximación de Boltzmann

Se sabe que  $n_i = 6,822 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$

Dado que  $N_A \gg n_i \Rightarrow p_0 = N_A$

$$\Rightarrow n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = \frac{(6,822 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3})^2}{(10^{17} + x \cdot 10^{16}) \text{ cm}^{-3}} \Rightarrow n_0(100) = 42,3088$$

$$n_0(0) = 465,39684 \text{ cm}^{-3}$$



650 focus voltios

(b)

$$\phi_p = -V_{bi} \ln \left( \frac{p_0}{n_i} \right)$$

$$\phi_p(100 \mu\text{m}) = -60 \text{ mV} \ln \left( \frac{1.1 \cdot 10^{18}}{6,822 \cdot 10^9} \right)$$

$$\phi_p(100 \mu\text{m}) = -1133,9054 \text{ mV} = \boxed{-1,1339 \text{ V}}$$

220

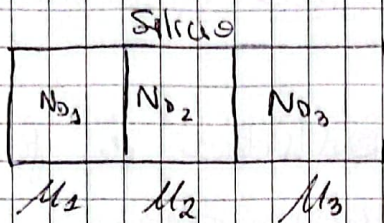


• PARTE V: Integradores

230

Misma geometría y área

$\ell = A$



$\mu_1 = 1400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

$\mu_2 = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

$\mu_3 = 300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

Se aplica V de tensión a cada sección.

Las corrientes son:  $I_1 > I_2 > I_3$  (no necesariamente coinciden los subíndices con los de movilidad y dopaje)

Se pide: - obtener corrientes  $I_1, I_2, I_3$  (en función de dopajes y movilidades)

- ¿por qué varía la movilidad?

- valores aproximados de densidad de dopaje para cada muestra.

Sabiendo que:

$\sigma = q (n_0 \mu_n + p_0 \mu_p)$

$R = \frac{\ell}{\sigma A}$

$V = I \cdot R \Rightarrow I = V \cdot \sigma \frac{A}{\ell} = \sigma \frac{VA}{\ell} = \sigma \cdot C_0$

Entonces, supongo que  $N_D \gg n_i$ , por lo que  $n_0 = N_D$  y puedo despreciar  $p_0$  al calcular la movilidad

$\sigma_1 = q (1400 \cdot N_{D1})$ ;  $\sigma_2 = q (800 N_{D2})$ ;  $\sigma_3 = q (300 N_{D3})$

$\sigma_1 = 2,2428 \cdot 10^{-16} N_{D1}$ ;  $\sigma_2 = 1,2816 \cdot 10^{-16} N_{D2}$ ;  $\sigma_3 = 4,806 \cdot 10^{-17} N_{D3}$

$I_1 = 2,2428 \cdot 10^{-16} N_{D1} \cdot C_0$ ;  $I_2 = 1,2816 \cdot 10^{-16} N_{D2} \cdot C_0$ ;  $I_3 = 4,806 \cdot 10^{-17} N_{D3} \cdot C_0$

La movilidad depende del dopaje del semiconductor,

Cuanto mayor sea la concentración de impurezas en el material, mayor será la probabilidad de que un electrón o hueco interactúe con la red cristalina produciendo colisiones.

Observando el gráfico de movilidad en función de dopaje en silicio, puede deducirse que:

$$\mu_1 \Rightarrow N_{D1} \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$\mu_2 \Rightarrow N_{D2} \approx 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$\mu_3 \Rightarrow N_{D3} \approx 9 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

Recalculando para estos valores:

$$d_1 = 2,2428 \cdot 10^{-3} C_0 = I_3$$

$$d_2 = 10,2528 C_0 = I_2$$

$$d_3 = 43,254 C_0 = I_1$$

para que

$$I_3 < I_2 < I_1$$

$$24. \quad T = 55^\circ\text{C} = 328\text{K}$$

$$E_g = 0,8\text{eV}$$

$$\mu_n(T) = 1100 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \left( \frac{T}{T_{amb}} \right)^{-3/2}$$

$$\mu_p(T) = 600 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \left( \frac{T}{T_{amb}} \right)^{-3/2}$$

$$\frac{m_n^*}{m_0} = 1,1$$

$$\frac{m_p^*}{m_0} = 0,6$$

$$n_i = 2 \left( \frac{2\pi \sqrt{1,1 \cdot 0,6} \cdot 9,109 \cdot 10^{-31} \text{kg} \cdot 1,382 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 328\text{K}}{(6,626 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s})^2} \right)^{3/2}$$

$$\cdot \exp \left( \frac{-0,8\text{eV}}{2 \cdot 8,617 \cdot 10^{-5} \text{eV/K} \cdot 328\text{K}} \right) \cdot 10^{-6}$$

$$n_i = 1,5003 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$$

Supongamos que el material es intrínseco (puro),  $n_0$  está dada. Entonces, por ley de acción de masas:

$$n_0 = p_0 = n_i$$

Por lo tanto conductividad:

$$\sigma = q (\mu_n \cdot n_0 + \mu_p \cdot p_0)$$

$$\sigma = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C} \left( 1100 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \left( \frac{328\text{K}}{300\text{K}} \right)^{-3/2} \cdot 1,5003 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3} + 600 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \left( \frac{328\text{K}}{300\text{K}} \right)^{-3/2} \cdot 1,5003 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3} \right)$$

$$\sigma = 3,5742 \cdot 10^{-3}$$

$$R = \frac{L}{\sigma A}$$

Supongamos que es un cuadrado:

$$R = \frac{L}{\sigma L^2}$$

$$L = 500 \mu\text{m} = 500 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

$$R = \frac{1}{3,5742 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \cdot 10^4} \Omega$$

$$R = 5595,5826 \Omega$$

(b)

Supongamos que el material posee cuatro enlaces covalentes, por lo que al doparlo con átomos del grupo V de la tabla periódica, que poseen cinco enlaces covalentes, estos funcionan como donores, al poseer un enlace más que el átomo material.

Entonces:

$$N_D = 10^{24} \text{ cm}^{-3}$$

$$m_0 = \frac{N_D}{2} + \sqrt{\frac{(N_D)^2}{4} + m_i^2}$$

$$m_0 = 8,5535 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow \text{por ley de conservación de masas}$$

$$p_0 = 2,6318 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

Dado que no cambia la temperatura y, observando el gráfico de dopaje en función de movilidad, se puede considerar que  $\mu_n$  y  $\mu_p$  se mantienen constantes para el dopaje introducido.

$$\sigma = q \left( 1100 \cdot \left( \frac{328}{300} \right)^{-3/2} \cdot 8,5535 \cdot 10^{13} + 600 \cdot \left( \frac{328}{300} \right)^{-3/2} \cdot 2,6318 \cdot 10^{12} \right)$$

$$\sigma = 0,0134$$

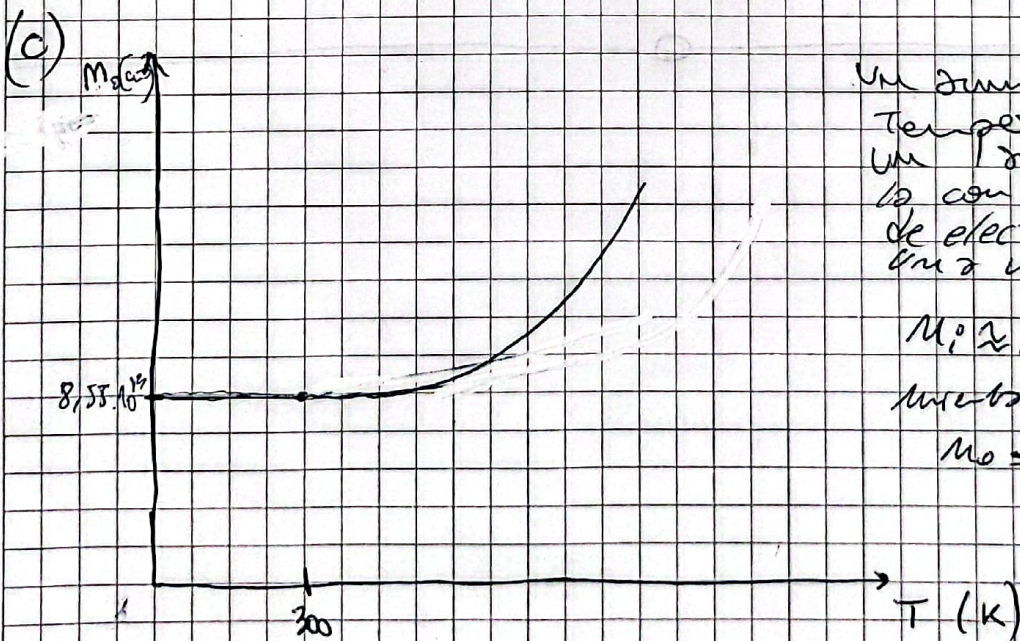
$$R = \frac{L}{\sigma L^2} = \frac{1}{0,0134 \cdot 500 \cdot 10^{-4}} \cdot \Omega$$

$$R = 1491,8720 \Omega$$

Es interesante observar como un "dopaje"

en el semiconductor, en este caso de donadores, provoca un aumento en la conductividad del material y, por lo tanto, una disminución en la resistencia del mismo.

Esto significa que al aplicar una diferencia de potencial en el material, por ley de Ohm la corriente que circula por el mismo es mayor.

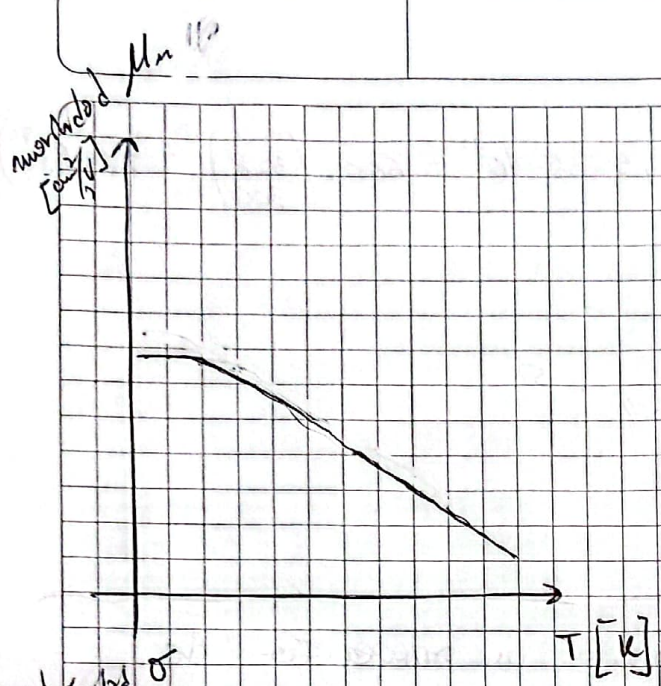


Un aumento de temperatura producirá un aumento en la concentración de electrones  
 una vez que  $N_i \gg N_0$

$$N_i \approx N_0 \approx p_0$$

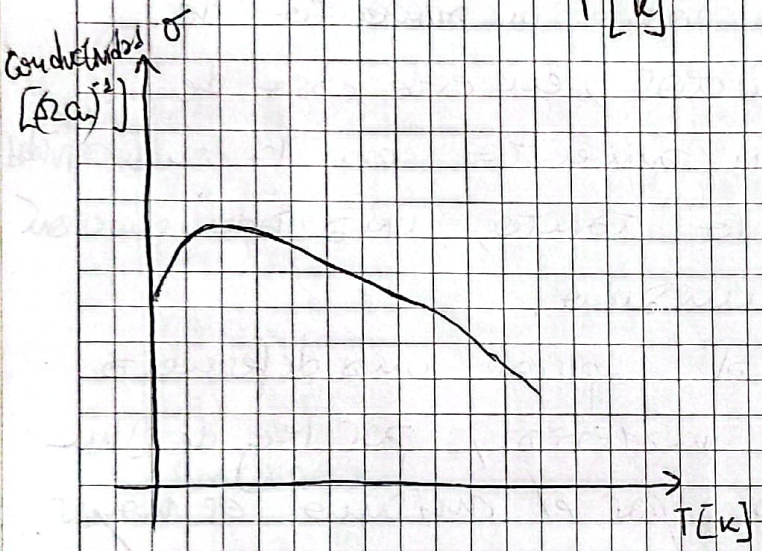
antes lo mismo

$$N_0 = N_D$$



como que de observarse a la ecuación, ante un aumento de temperatura el  $\mu$  disminuye, por el exponente negativo.

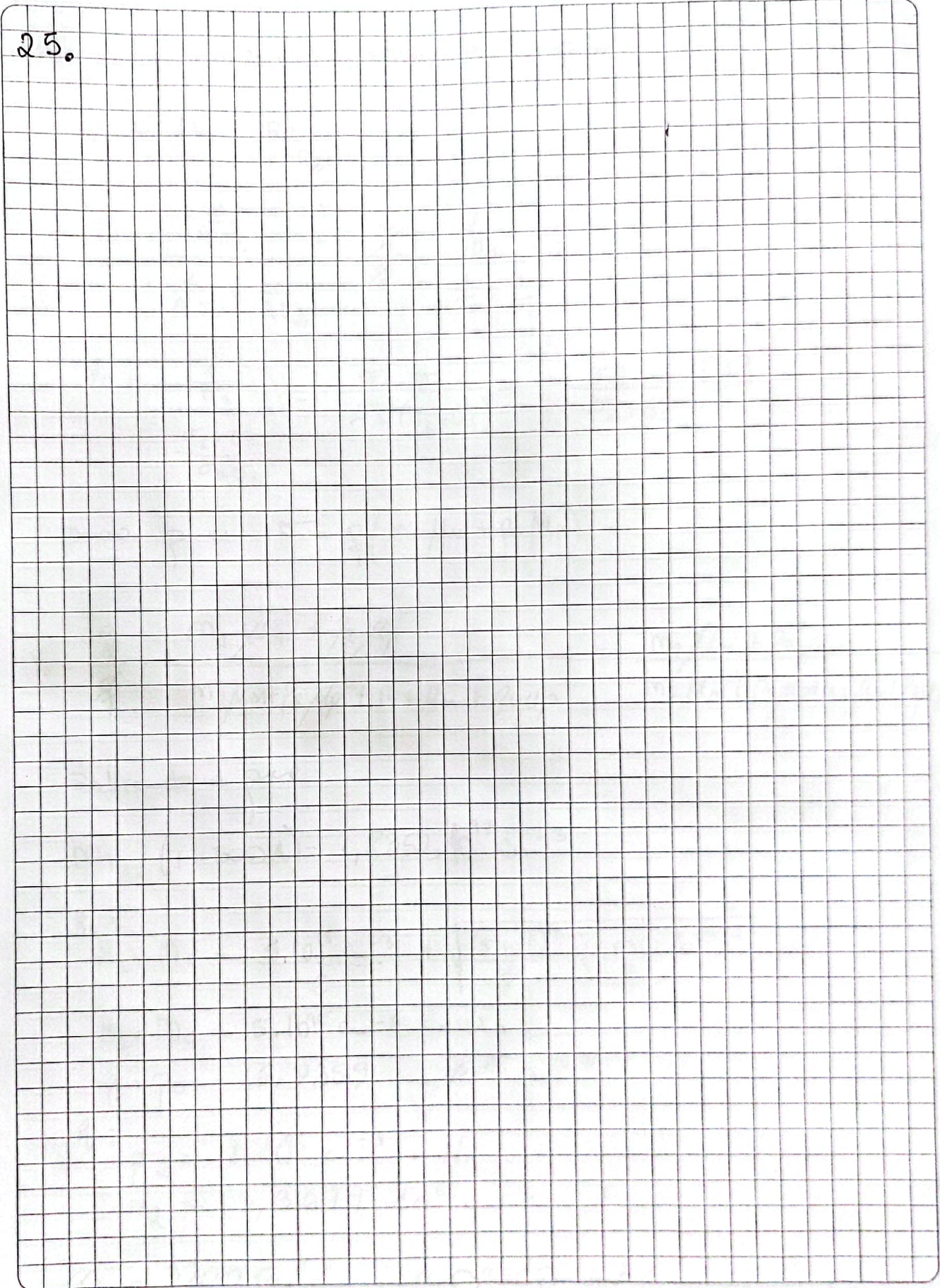
$$\mu(T) = 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-3/2}$$



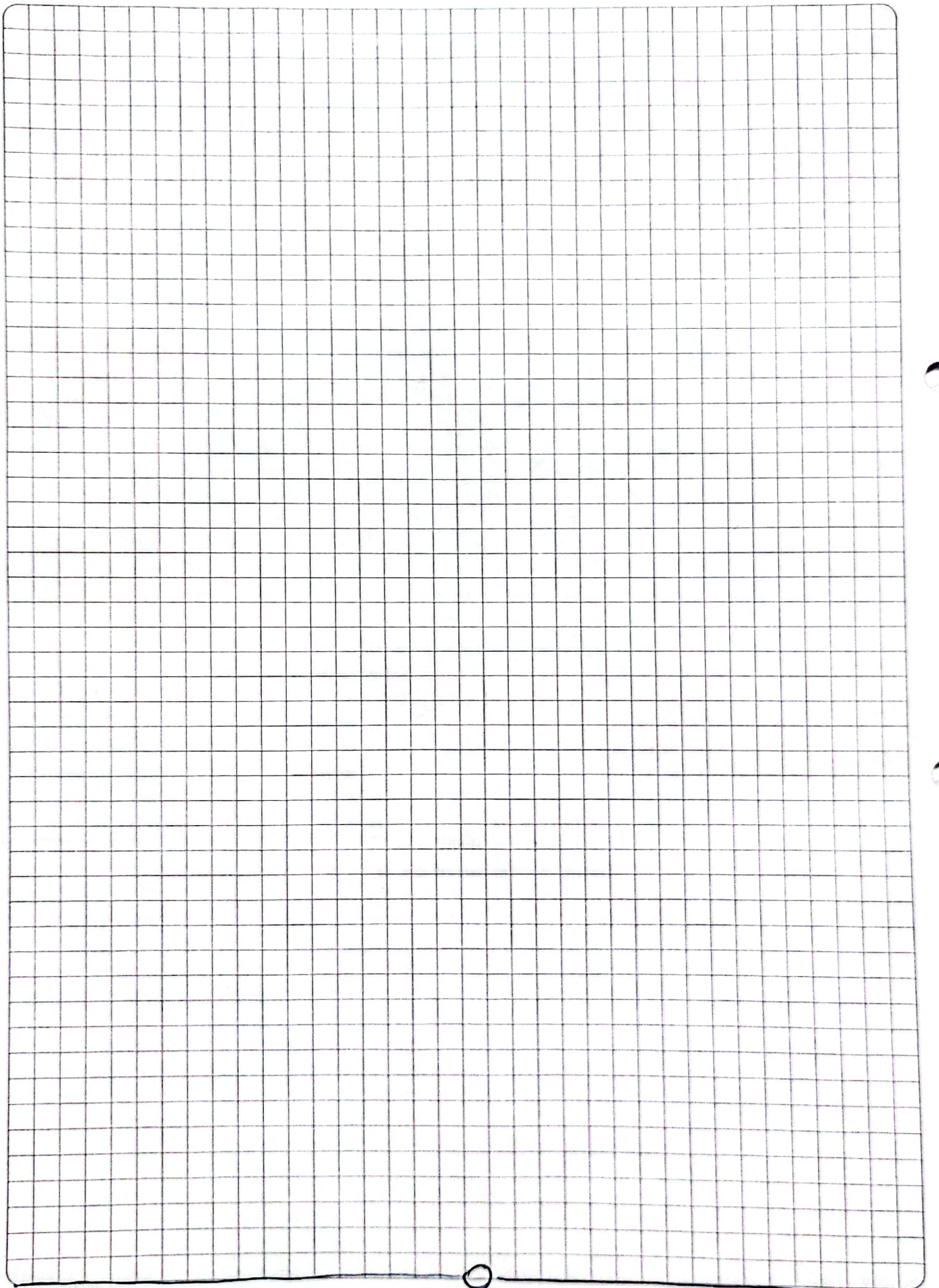
Es lógico que la conductividad disminuya también ya que depende de la movilidad, por lo que si  $\mu$  disminuye el primero, por consiguiente este lo hará también.

--	--

25.



--	--





26. Es un divisor resistivo, por lo que

$$V_o = V_i \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_o = \frac{\frac{q}{A \sigma_2}}{\frac{q}{A \sigma_1} + \frac{q}{A \sigma_2}} = \frac{\frac{q}{A}}{\frac{q}{A}} \frac{1}{\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2}} =$$

$$V_o = \frac{\frac{1}{\sigma_1}}{\frac{\sigma_2 + \sigma_1}{\sigma_1 \sigma_2}} = \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1 (\sigma_2 + \sigma_1)} = \frac{\sigma_2}{\sigma_2 + \sigma_1} \quad [1]$$

Dado que  $\sigma = q(m_n \mu_n + p_n \mu_p)$

$$V_o = \frac{q}{q} \frac{m_2 \mu_n + p_2 \mu_p}{m_2 \mu_n + p_2 \mu_p + m_1 \mu_n + p_1 \mu_p} = \frac{m_2 \mu_n + p_2 \mu_p}{m_2 \mu_n + p_2 \mu_p + m_1 \mu_n + p_1 \mu_p}$$

Sabiendo que

$$M_{i, Ge} (T = 300K) = 1,8352 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$$

$$R_1: \quad n_1 = m_0 = \frac{5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}}{2} + \sqrt{\frac{(5 \cdot 10^{15})^2}{4} + (1,8352 \cdot 10^{23})^2}$$

$$m_1 = m_0 = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} = N_D$$

$$p_1 = p_0 = 6,7359 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$R_2: \quad p_2 = 1 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3} = N_A$$

$$m_2 = 3,3679 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$$

$$\mu_n = 3900 \text{ cm}^2/\text{Vs} \quad \mu_p = 2300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

Entonces reemplazo por los valores :

$$V_0 = \frac{3900 \text{ e}^2/\text{m} \cdot 3,3679 \cdot 10^8 \text{ e}^{-3} + 2300 \text{ e}^2/\text{m} \cdot 1,10^{18} \text{ e}^{-3}}{3900 \text{ e}^2/\text{m} \cdot (5 \cdot 10^{18} + 3,3679 \cdot 10^8 \text{ e}^{-3}) + 2300 \text{ e}^2/\text{m} \cdot (6,7359 \cdot 10^{10} + 1,10^{18})} =$$

$$V_0 = 0,9915 \text{ V}$$

27.

