











- Example 2.1**  Calculate the maximum fraction of the volume in a simple cubic crystal occupied by the atoms. Assume that the atoms are closely packed and that they can be treated as hard spheres. This fraction is also called the packing density.
- Example 2.2**  Calculate the energy bandgap of germanium, silicon and gallium arsenide at 300, 400, 500 and 600 K.
- Example 2.3**  Calculate the number of states per unit energy in a 100 by 100 by 10 nm piece of silicon ( $m^* = 1.08 m_0$ ) 100 meV above the conduction band edge. Write the result in units of  $\text{eV}^{-1}$ .
- Example 2.4**  Calculate the effective densities of states in the conduction and valence bands of germanium, silicon and gallium arsenide at 300 K.
- Example 2.4b**  Calculate the intrinsic carrier density in germanium, silicon and gallium arsenide at 300, 400, 500 and 600 K.
- Example 2.5**  Calculate the ionization energy for shallow donors and acceptors in germanium and silicon using the hydrogen-like model.
- Example 2.6a**  A germanium wafer is doped with a shallow donor density of  $3n_i/2$ . Calculate the electron and hole density.
- Example 2.6b**  A silicon wafer is doped with a shallow acceptor doping of  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Calculate the electron and hole density.
- Example 2.6c**  4H-SiC is doped with  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  nitrogen donor atoms ( $E_c - E_d = 90 \text{ meV}$ ). Use  $N_c = 4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ .
- Calculate the electron density at 300 K.
  - Calculate the hole density at 300 K after adding  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  aluminum acceptor atoms ( $E_a - E_c = 220 \text{ meV}$ ) Use  $N_v = 1.6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ .
- Example 2.7**  A piece of germanium doped with  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  shallow donors is illuminated with light generating  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  excess electrons and holes. Calculate the quasi-Fermi energies relative to the intrinsic energy and compare it to the Fermi energy in the absence of illumination.
- Example 2.8**  Electrons in undoped gallium arsenide have a mobility of  $8,800 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . Calculate the average time between collisions. Calculate the distance traveled between two collisions (also called the mean free path). Use an average velocity of  $10^7 \text{ cm/s}$ .
- Example 2.9**  A piece of silicon doped with arsenic ( $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) is  $100 \mu\text{m}$  long,  $10 \mu\text{m}$  wide and  $1 \mu\text{m}$  thick. Calculate the resistance of this sample when contacted one each end.
- Example 2.10**  The hole density in an n-type silicon wafer ( $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) decreases linearly from  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  to  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  between  $x = 0$  and  $x = 1 \mu\text{m}$ . Calculate the hole diffusion current density.
- Example 2.11**  Calculate the electron and hole densities in an n-type silicon wafer ( $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) illuminated uniformly with  $10 \text{ mW/cm}^2$  of red light ( $E_{\text{ph}} = 1.8 \text{ eV}$ ). The absorption coefficient of red light in silicon is  $10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ . The minority carrier lifetime is  $10 \mu\text{s}$ .

## PROBLEMAS DE FISICA IV



**Nota.-Mucho ojo con entregar el mismo trabajo, es importante hacerle cambios circunstanciales en cuanto al diseño del documento. Suerte!**

Alumno: Noel Guadarrama Contreras.

No. Control 04280570

1. Calcule la fracción máxima del volumen en un cristal cúbico simple ocupado por átomos. Asuma que los átomos están empaquetados muy de cerca y que pueden ser tratados como esferas duras. Esta fracción también se llama la densidad de empaque.

Solución:

La densidad de empaque es obtenida de:

$$\frac{\text{Volume of atoms}}{\text{Volume of the unit cell}} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = \frac{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{a}{2}\right)^3}{a^3} = \frac{\pi}{6} = 52\%$$

2. Calcule la energía de la banda prohibida del germanio, el silicio y el arseniuro de galio a 300,400, 500, 600 K.

Solución: la banda prohibida del silicio a 300 k es igual a:

$$\begin{aligned} E_g(300\text{ K}) &= E_g(0\text{ K}) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \\ &= 1.166 - \frac{0.473 \times 10^{-3} \times (300)^2}{300 + 636} = 1.12\text{ eV} \end{aligned}$$

Similarmente, se puede encontrar la energía de la banda prohibida para el germanio y el arseniuro de galio a diferentes temperaturas:

	Germanium	Silicon	Gallium Arsenide
$T = 300 \text{ K}$	0.66 eV	1.12 eV	1.42 eV
$T = 400 \text{ K}$	0.62 eV	1.09 eV	1.38 eV
$T = 500 \text{ K}$	0.58 eV	1.06 eV	1.33 eV
$T = 600 \text{ K}$	0.54 eV	1.03 eV	1.28 eV

3. Calcule el número de estado por unidad de energía en una pieza de silicio de  $100 \times 100 \times 10 \text{ nm}$  ( $m^* = 1.08 m_0$ ) 100 meV abajo del borde de la banda de conducción. Escriba el resultado en unidades de  $\text{eV}^{-1}$

Solución: La densidad de los estados es igual a:

$$\begin{aligned}
 g(E) &= \frac{8\pi\sqrt{2}}{h^3} m^{*3/2} \sqrt{E - E_c} \\
 &= \frac{8\pi\sqrt{2} (1.08 \times 9.1 \times 10^{-31})^{3/2}}{(6.626 \times 10^{-34})^3} \sqrt{0.1 \times 1.6 \times 10^{-19}} \\
 &= 1.51 \times 10^{56} \text{ m}^{-3} \text{ J}^{-1}
 \end{aligned}$$

Así que el número de estados por unidad de energía es igual a:

$$g(E)V = 1.51 \times 10^{56} \times 10^{-22} \text{ J}^{-1} = 2.41 \times 10^5 \text{ eV}^{-1}$$

4. Calcule las densidades efectivas de los estados en las bandas de conducción y de valencia del arseniuro de galio, del silicio y del germanio a 300 K.

Solución: La densidad efectiva de los estados de la banda de conducción del germanio es igual a:

$$\begin{aligned}
 N_c &= 2 \left( \frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \\
 &= 2 \left( \frac{2\pi \cdot 0.55 \times 9.11 \times 10^{-31} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300}{(6.626 \times 10^{-34})^2} \right)^{3/2} \\
 &= 1.02 \times 10^{25} \text{ m}^{-3} = 1.02 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}
 \end{aligned}$$

donde la masa efectiva para la densidad de los estados fue usada. Similarmente se puede encontrar la densidad efectiva de los estados en la banda de conducción para otros semiconductores y la densidad efectiva de los estados en la banda de valencia:

	Germanium	Silicon	Gallium Arsenide
$N_c$ (cm <sup>-3</sup> )	1.02 x 10 <sup>19</sup>	2.81 x 10 <sup>19</sup>	4.35 x 10 <sup>17</sup>
$N_v$ (cm <sup>-3</sup> )	5.64 x 10 <sup>18</sup>	1.83 x 10 <sup>19</sup>	7.57 x 10 <sup>18</sup>

Note que la densidad efectiva de los estados es dependiente de la temperatura y puede ser obtenida de:

$$N_c(T) = N_c(300\text{ K}) \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2}$$

4b. Calcule la densidad intrínseca del portador del arseniuro de galio, del silicio y del germanio a 300, 400, 500 y 600 K.

Solución: La densidad intrínseca del portador en el silicio a 300 K es igual a:

$$\begin{aligned} n_i(300\text{ K}) &= \sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \\ &= \sqrt{2.81 \times 10^{19} \times 1.83 \times 10^{19}} \exp\left(\frac{-1.12}{2 \times 0.0258}\right) \\ &= 8.72 \times 10^9 \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

Similarmente se puede encontrar la densidad intrínseca del portador para el germanio y el arseniuro de galio a diferentes temperaturas.

	Germanium	Silicon	Gallium Arsenide
300 K	2.02 x 10 <sup>13</sup>	8.72 x 10 <sup>9</sup>	2.03 x 10 <sup>6</sup>
400 K	1.38 x 10 <sup>15</sup>	4.52 x 10 <sup>12</sup>	5.98 x 10 <sup>9</sup>
500 K	1.91 x 10 <sup>16</sup>	2.16 x 10 <sup>14</sup>	7.98 x 10 <sup>11</sup>
600 K	1.18 x 10 <sup>17</sup>	3.07 x 10 <sup>15</sup>	2.22 x 10 <sup>13</sup>

5. Calcule la energía de ionización para donadores y aceptores en el silicio y germanio, usando como modelo el hidrogeno.

Solución: Usando la masa efectiva para cálculos de conductividad, se puede encontrar que la energía de ionización para donadores de germanio es:

$$E_c - E_d = 13.6 \frac{m_{cond}^*}{m_0 \epsilon_r^2} \text{ eV} = 13.6 \frac{0.12}{16^2} \text{ eV} = 6.4 \text{ meV}$$

La energía de ionización calculada para los donadores y aceptores para el silicio y el germanio se provee a continuación:

	Germanium	Silicon
donors	6.4 meV	13.8 meV
acceptors	11.2 meV	20.5 meV

Note que la energía actual de ionización depende del átomo donador actual.

6a. Una oblea de germanio es dopada con una densidad de donadores de  $3n_i/2$ . Calcule la densidad de electrones y huecos.

Solución: La densidad de electrones es obtenida de la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} n_o &= \frac{N_d^+ - N_a^-}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_d^+ - N_a^-}{2}\right)^2 + n_i^2} \\ &= n_i \left(\frac{3}{4} + \sqrt{\frac{9}{16} + 1}\right) = 2n_i \end{aligned}$$

y la densidad de huecos es obtenida de la ley de masa-acción:

$$p_o = \frac{n_i^2}{n_o} = \frac{n_i}{2}$$

6b. Una oblea de silicio es dopada con un aceptores, dopando  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Calcule la densidad de electrones y huecos.

Solución: Como el dopado de aceptores es más grande que la densidad intrínseca y mucho más pequeña que la densidad efectiva de los estados, la densidad de huecos es igual a:

$$p_o \cong N_a^+ = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

La densidad de electrones se calcula usando la ley de masa-acción:

$$n_o \cong \frac{n_i^2}{N_a^+} = \frac{10^{20}}{10^{16}} = 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

6c. 4H-SiC es dopado con  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  de átomos donadores de nitrógeno ( $E_c - E_d = 90 \text{ meV}$ ). Use  $N_c = 4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ .

\*Calcule la densidad de electrones a 300 K.

\*Calcule la densidad de huecos a 300 K. después de añadir  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  de átomos aceptores de aluminio ( $E_a - E_c = 220 \text{ meV}$ ) Use  $N_v = 1.6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ .

Solución: Para el primer inciso

Primero calculamos  $N^*$

$$N^* = \frac{N_c}{2} \exp \frac{E_d - E_c}{kT} = 6.16 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

La densidad de electrones libres se calcula a partir de:

$$n_o = -\frac{N^*}{2} + \sqrt{\frac{(N^*)^2}{4} + N^* N_d} = 4.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

y se puede observar que 21.5% de donadores están ionizados.

Para el siguiente inciso:

Como tenemos ahora un material tipo p, recalculamos  $N^*$

$$N^* = \frac{N_v}{4} \exp \frac{E_v - E_a}{kT} = 8.08 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

donde el factor 4 es debido a la banda de valencia degenerada doblemente. La densidad de huecos es obtenida de:

$$p_o = -\frac{N^* + N_d}{2} + \sqrt{\frac{(N^* + N_d)^2}{4} + N^* (N_a - N_d)}$$

$$= 5.52 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

7. Una pieza de germanio es dopada con  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  de átomos donadores, que es iluminada con luz, generando un exceso de electrones y huecos de  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Calcule la energía quasi-Fermi relativa a la energía intrínseca y compárese con la energía de Fermi en ausencia de iluminación.

Solución: La densidad de portadores cuando se ilumina el semiconductor es:

$$n = n_o + \delta n = 10^{16} + 10^{15} = 1.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$p = p_o + \delta p \cong 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

y la energía quasi-Fermi es:

$$F_n - E_i = kT \ln \frac{n}{n_i} = 0.0259 \times \ln \frac{1.1 \times 10^{16}}{2 \times 10^{13}} = 163 \text{ meV}$$

$$F_p - E_i = -kT \ln \frac{p}{n_i} = 0.0259 \times \ln \frac{1 \times 10^{15}}{2 \times 10^{13}} = -101 \text{ meV}$$

En comparación, la energía de Fermi en ausencia de luz es:

$$E_F - E_i = kT \ln \frac{n_0}{n_i} = 0.0259 \times \ln \frac{10^{16}}{2 \times 10^{13}} = 161 \text{ meV}$$

8. Los electrones en el arseniuro de galio sin dopado tienen una movilidad de 8.800 cm<sup>2</sup>/V-s. Calcule el tiempo medio entre las colisiones. Calcule la distancia recorrida entre las dos colisiones (también llamadas el medio de trayectoria libre). Utilice una velocidad media de 107 cm/s.

Solución: El tiempo de colisión es obtenido de:

$$\tau_c = \frac{\mu_n m_e^*}{q} = \frac{0.88 \times 0.067 \times 9.1 \times 10^{-31}}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.34 \text{ ps}$$

de donde la movilidad primero fue convertida a unidades MKS.

El medio de trayectoria libre es igual a:

$$l = v_{average} \tau_c = 10^7 \times 0.34 \times 10^{-12} = 34 \text{ nm}$$

9. Un pedazo de silicio dopado con arsénico ( $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) tiene 100 μm de largo, 10 μm de ancho y 1 μm de grueso. Calcule la resistencia de esta muestra cuando es conectada en cada lado.

Solución: La resistividad del silicio es igual a:

$$\rho = \frac{1}{qn\mu_n} = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{17} \times 727} = 0.086 \text{ } \Omega\text{cm}$$

La resistencia entonces es igual a:

$$R = \rho \frac{L}{Wt} = 0.086 \times \frac{100 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-4} \times 10^{-4}} = 8.6 \text{ k}\Omega$$

Como una prueba alterna, podemos calcular la resistividad de una hoja:

$$R_s = \frac{\rho}{t} = \frac{0.086}{10^{-4}} = 860 \text{ } \Omega / \text{square}$$

de la cual, obtenemos la resistencia:

$$R = R_s \frac{L}{W} = 860 \times \frac{100 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-4}} = 8.6 \text{ k}\Omega$$

10. La densidad de huecos en una oblea de silicio tipo n ( $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) decrece linealmente de  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  a  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  entre  $x = 0$  y  $x = 1 \text{ }\mu\text{m}$ . Calcule la densidad de corriente en la difusión de huecos.

Solución: La densidad de corriente en la difusión de huecos es igual a:

$$J_p = qD_p \frac{dp}{dx} = 1.6 \times 10^{-19} \times 8.2 \times \frac{9 \times 10^{13}}{10^{-4}} = 1.18 \text{ A/cm}^2$$

donde la constante de difusión fue calculada usando la relación de Einstein.

$$D_p = V_t \mu_p = 0.0259 \times 317 = 8.2 \text{ cm}^2/\text{s}$$

11.-Calcule la densidad de electrones y huecos en una oblea de silicio tipo n ( $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) iluminada uniformemente con  $10 \text{ mW/cm}^2$  de luz roja ( $E_{ph} = 1.8 \text{ eV}$ ). El coeficiente de absorción de la luz roja en el silicio es de  $10^3 \text{ cm}^{-1}$ . El tiempo de vida del portador minoritario es de  $10 \text{ }\mu\text{s}$ .

Solución: La razón de generación de electrones y huecos es igual a:

$$G_n = G_p = \alpha \frac{P_{opt}}{E_{ph} A} = 10^{-3} \frac{10^{-2}}{1.8 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 3.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

donde la energía del fotón fue convertida en joules. El exceso de densidad de portadores es obtenida de:

$$\delta n = \delta p = \tau_p G_p = 10 \times 10^{-6} \times 3.5 \times 10^{13} = 3.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$$

Así que la densidad de electrones y huecos es igual a:

$$n = n_o + \delta n = 10^{17} + 3.5 \times 10^8 = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$p = \frac{n_i^2}{n_o} + \delta p = \frac{(10^{10})^2}{10^{17}} + 3.5 \times 10^8 = 3.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$$

1. Why do solids occur in the form of a crystal?
2. How do we classify the different crystals?
3. How many Bravais lattices are there in two dimensions? How many in three dimensions?
4. List the three cubic Bravais lattices.
5. How do you explain that the allowed energies for electrons in solids are restricted to energy bands? Why are these bands separated energy band gaps? Why are the energies not discrete as in an atom. Why are they not continuous, as is the case for a free electron?
6. How does the conductivity of a solid depend on whether the energy bands are completely filled, partially filled or empty? How does the existence of overlapping bandgaps affect the conductivity?
7. Why does a completely filled band not contribute the conductivity of a solid?
8. Explain physically why the bandgap of a semiconductor decreases with temperature.
9. What are holes? Carefully justify your definition.
10. What is a state?
11. How many states are there in 1 micron sized cube for which an electron has a kinetic energy less than 1 eV? Treat the electron as a free electron confined to a box with infinite potential walls.
12. What is the physical meaning of the Fermi energy?
13. What is the value of the Fermi function at an energy, which is  $3kT$  larger/lower than the Fermi energy?
14. What is the basic assumption used in statistical thermodynamics when calculating the probability distribution functions?
15. What are the two boundary conditions used to find the possible ways to fill energy levels with electrons.
16. How does a boson differ from a Fermion? Name two bosons.
17. List the assumptions made to obtain equations (2.6.12).
18. What is an intrinsic semiconductor? What is the hole density in an intrinsic semiconductor?
19. Why is the product of the electron and hole density in a non-degenerate semiconductor constant rather than for instance the sum? This relationship is also referred to as the mass-action law. Why?
20. Define a non-degenerate semiconductor. Why do we need this concept?
21. What is the difference between a doped semiconductor and an extrinsic semiconductor?
22. What assumptions are made when deriving equations (2.6.29) and (2.6.30)?
23. Describe the temperature dependence of the carrier density in a semiconductor. Identify the three regions and explain what happens by indicating the filled and empty states on an energy band diagram. Do this for n-type, p-type and compensated material.
24. Name the two transport mechanisms in semiconductors.
25. Describe the microscopic behavior of electrons and holes in a semiconductor.
26. Define the mobility.
27. Explain why the mobility in a semiconductor depends on the doping density.
28. Define the resistivity and conductivity of a semiconductor.
29. Explain why the velocity in a semiconductor is limited.
30. What is the driving force, which causes diffusion?
31. Explain the relation between the mean free path, the scattering time and the thermal velocity.
32. List three recombination-generation mechanisms.
33. Explain why the net recombination rate as described by the simple model depends on the excess carrier density.
34. Describe the continuity equation in words.
35. What assumptions are made to obtain the diffusion equations (2.9.9) and (2.9.10) from the continuity equations (2.9.3) and (2.9.4)?
36. What is the diffusion length and how does it relate to the diffusion constant and the minority carrier lifetime?
37. What is the drift-diffusion model?

1. ¿Por qué los sólidos se presentan en la forma de un cristal?

R: Por que sus átomos se presentan en una estructura altamente ordenada.

2. ¿Cómo clasificamos los diversos cristales?

R: los podemos clasificar:

\*Por su estructura cristalina.

\*Por redes subyacentes.

3. ¿Cuántas redes de Bravais hay en dos dimensiones? ¿Cuántas hay en tres dimensiones?

R: En 2 dimensiones hay 5 distintas redes de Bravais, en 3 dimensiones hay 14 redes distintas.

4. Enumere las tres redes de Bravais cúbicas.

R:

\* Cúbica simple.

\* Cúbica centrada en el cuerpo.

\* Cúbica centrada en las caras.

5. ¿Cómo explica usted que las energías permitidas para los electrones en los sólidos están restringidas a las bandas de energía? ¿Por qué esas bandas están separadas por bandas de energía prohibidas? ¿Por qué las energías no están discretizadas como en un átomo.? ¿Por qué no son continuas, como es el caso para un electrón libre?

R: Para responder la primera pregunta, recordemos el principio de exclusión de Pauli. Si no existieran dichas bandas, los electrones se agolparían en su estado de mínima energía.

6. ¿Cómo la conductividad de un sólido depende de si las bandas de energía están totalmente llenas, parcialmente llenas o vacías? ¿Cómo la existencia de bandas prohibidas traslapadas afecta la conductividad?

R: Del llenado de las bandas de energía depende el tipo de material que se este habando, es decir, si la banda más externa no está completamente llena, se denomina *banda de conducción*. Pero, si está llena, se llama *banda de valencia* y la banda vacía que queda inmediatamente encima de esta última recibe el nombre de *banda de conducción*. Y es obvio que el traslapamiento de bandas prohibidas origina una longitud mayor de dicha banda, obligando así que los electrones necesiten más energía para atravesarla, afectando, de ese modo, la conductividad.

7. ¿Por qué una banda totalmente llena no contribuye la conductividad de un sólido?

R: Por que los electrones de esa banda no pueden ganar energía debido a que los niveles de energía ya se encuentran llenos.

8. Explique físicamente porqué la banda prohibida de un semiconductor disminuye con la temperatura.

R: El espacio interatómico crece, cuando la amplitud de las vibraciones atómicas incrementa debido al incremento de energía térmica. Un incremento en el espacio interatómico, decrementa el potencial promedio de los electrones en el material, lo cuál reduce el tamaño de la banda de energía prohibida.

9. ¿Qué son los huecos? Justifique cuidadosamente su definición.

R: En los materiales conductores la circulación de corriente es posible gracias a la existencia de electrones libres. En los semiconductores también son los electrones los responsables de la corriente. Sin embargo, puesto que en este caso provienen de un enlace covalente y no de una nube electrónica, el fenómeno es más complejo, y para su explicación se introduce un nuevo portador de carga ficticio: el *hueco*.

#### GENERACIÓN TÉRMICA DE PORTADORES. EL ELECTRÓN Y EL HUECO

Si se eleva la temperatura del monocristal de silicio por encima de 0 K, parte de la energía térmica permite liberar alguno de los electrones. Ello produce dos efectos:

\*Aparece un electrón libre capaz de moverse a través de la red en presencia de un campo eléctrico.

\*En el átomo al que se asociaba el electrón aparece un defecto de carga negativa, es decir, una carga positiva, que se denomina hueco.

Globalmente, el cristal mantiene la neutralidad eléctrica, ya que no ha ganado ni perdido cargas. Cuando se producen electrones libres en un semiconductor únicamente por agitación térmica, existen huecos y electrones en números iguales, porque cada electrón térmicamente excitado deja detrás de sí un hueco.

10. ¿Qué es un estado?

R: Es el nivel de energía donde el átomo puede estar ocupado o no por un electrón.

11. ¿Cuántos estados hay en un cubo de 1 micrón para el cual un electrón tiene una energía cinética menor de 1 eV? Trate el electrón como un electrón libre confinado en una caja con sus paredes de potencial infinitas.

12. ¿Cuál es el significado físico de la energía de Fermi?

La energía de Fermi afecta a los electrones y a los huecos. Si la energía de Fermi incrementa, la densidad de electrones también lo hará, y si la energía de Fermi decrecienta, así también lo hará la densidad de electrones, propiciando así un aumento en la densidad de huecos.

13. ¿Cuál es el valor de la función de Fermi de una energía, que es 3kT más grande/ más baja que la energía de Fermi?

$$E = E_f + 3kT = .0464$$

$$E = E_f - 3kT = .95$$

14. ¿Cuál es la idea básica usada en termodinámica estadística al calcular las funciones de distribución de la probabilidad?

La idea básica consiste en que las partículas ocupen todos los niveles de energía existentes en un sistema dado.

15. ¿Cuáles son las dos condiciones de límite usadas para encontrar las maneras posibles de llenar los niveles de energía de los electrones.

16. ¿En que se diferencia un Bosón de un Fermión? Nombre 2 Bosones.  
La diferencia consiste en que un Fermión es una partícula de espín semientero, mientras que un Bosón es una partícula de espín entero. Ejemplo de Bosones son los fotones y los nucleidos con un número par de nucleones, como las partículas alfa.

17. Enumere las deducciones hechas para obtener las ecuaciones (2,6,12).

18. ¿Qué son los semiconductores intrínsecos? ¿Cuál es la densidad de huecos en un semiconductor intrínseco?

R: Los semiconductores intrínsecos son los semiconductores que no contienen impurezas.

19. ¿Por qué es el producto de la densidad del electrón y del hueco en un semiconductor no degenerado una constante más bien que por ejemplo la suma? Esta relación también se refiere como la ley de la masa-acción. ¿Por qué?

R: Por que es la ley que describe la relación entre las densidades de especies implicadas en una reacción química

20. Defina un semiconductor no degenerado. ¿Por qué necesitamos este concepto?

R: Los semiconductores no degenerados son definidos como los semiconductores para los cuales la energía de Fermi es por lo menos  $3kT$  lejos de cualquier borde de la banda de energía. La razón por la que necesitamos este concepto es por que la misma definición permite que la función de Fermi pueda ser reemplazada por una simple función exponencial.

21. ¿Cuál es la diferencia entre un semiconductor dopado y un semiconductor extrínseco?

22. ¿Qué deducciones son hechas al derivar las ecuaciones (2,6,29) y (2,6,30)?

23. Describa la dependencia de temperatura de la densidad de portadores en un semiconductor. Identifique las tres regiones, indicando los estados vacíos y llenos en el diagrama de las bandas de energía. Haga esto para el material tipo n, material tipo p y el material compensado.

24. Menciones los dos mecanismos de transporte en los semiconductores.

R: Portadores mayoritarios y portadores minoritarios.

25. Describa el comportamiento microscópico de los electrones y de los huecos en un semiconductor.

R: Los enlaces covalentes que fijan los electrones de valencia a los átomos internos de los semiconductores son más fuertes que los conductores pero más débiles que los aislantes. Cuando una red cristalina adquiere energía térmica algunos de estos enlaces se rompen. Los electrones que se liberan de la atracción de su núcleo se convierten en electrones de conducción los cuales están libres para desplazarse en respuesta a un campo eléctrico. El hueco es ese espacio que deja un electrón cuando se desplaza de un nivel a otro. Al igual que los electrones los huecos tienen un movimiento aleatorio pero también son afectados por los campos eléctricos.

26. Defina la movilidad.

R: La movilidad es característica del material, y está relacionada con la capacidad de movimiento del hueco a través de los enlaces de la red cristalina. La "facilidad" de desplazamiento de los huecos es inferior a la de los electrones.

27. Explique porqué la movilidad en un semiconductor depende de la densidad del dopado. A más dopado, menor movilidad, y para concentraciones bajas de dopado, la movilidad es casi constante

28. Defina la resistencia y la conductividad en un semiconductor.

R: Conductividad: La razón de la densidad de corriente al campo eléctrico aplicado.

Resistividad: La razón del voltaje aplicado a la corriente

29. Explique porqué la velocidad en un semiconductor es limitada.

30. ¿Cuál es la fuerza impulsora, que causa la difusión?

R: La energía térmica.

31. Explique la relación entre el medio de libre trayectoria, el tiempo de dispersión y la velocidad termal.

32. Liste 3 mecanismos de generación-recombinación.

R:

\*Recombinación simple

\*Recombinación de superficie.

\*Generación debido a la luz.

33. Explique por que la razón neta de recombinación, como es descrita en el modelo simple, depende del exceso de la densidad de portadores de carga.

34. Describa la ecuación de continuidad en palabras.

35. ¿Qué supuestos son hechos para obtener las ecuaciones de difusión (2,9,9) (2,9,10) y las ecuaciones de continuidad (2,9,3) y (2,9,4)?

36. ¿Qué es la longitud de difusión y como se relaciona con la constante de difusión y el tiempo de vida del portador minoritario?

37. ¿Qué es el modelo “drift-difusión”?