Estructura de la Materia 2
Segundo Cuatrimestre 2020
Guía 7: Semiconductores - Junturas

1. Semiconductor intrínsico

   Considere un semiconductor con bandas de valencia (v) y de conducción (c) de forma parabólica general en un entorno de los respectivos puntos extremos, masas efectivas m_v, m_c y energías E_v, E_c.

   i) Exprese y grafique las densidades de estados por unidad de volumen.

   ii) Exprese y grafique las funciones de Fermi de electrones y huecos superpuestas sobre el gráfico anterior. Suponga $\mu = \frac{E_c+E_v}{2}$ y úselo como cero de energía.

   iii) Exprese la concentración de electrones en la banda de conducción n_c, de huecos en la banda de valencia p_v.

   iv) Suponga satisfecha la condición de no degeneración para la banda de valencia y la banda de conducción, $\frac{\mu-E_v}{kT} \gg 1$ $\frac{E_c-\mu}{kT} \gg 1$ en escala de kT, μ está en el interior del gap ($E_g = E_c - E_v$) lejos de los extremos de las bandas. Calcule y grafique $\mu(T) = \mu_i(T)$ (i por intrínsico). Use masas típicas para Ge: $m_v = 0.37m$, $m_c = 0.56m$. Estime el valor de E_g a partir del cual se viola la condición anterior a temperatura ambiente. ($E_g(Ge) = 0.67$ eV)

   v) Calcule $n_c(T)$ y $p_v(T)$.

2. Masas efectivas de huecos y electrones.

   Para semiconductores con gaps de 1 eV y 0.1 eV

   i) ¿En cuánto deben diferir las masas efectivas de electrones y huecos para que el potencial químico μ se ubique a una energía KT_a ($T_a = 300K$) por debajo de la banda de conducción?

   ii) Grafique la densidad de estados para electrones y huecos en ambos casos.

3. **i)** Argumente, por comparación con átomo hidrogenoide, para demostrar que el radio aproximado de la órbita de un electrón ligado a una impureza donora es $r = \frac{\varepsilon a_0 m}{m^*}$ y que su energía es $E_d = E_c - \frac{m^*}{m\varepsilon^2}$ Ry. Compare $E_c - E_d$ con E_g para casos típicos ($a_0 = \frac{\hbar^2}{me^2} \approx$ 0.53AA es el radio de Bohr, ε es la constante dieléctrica, 1Ry $= \frac{me^4}{2\hbar^2} \approx 13.6$eV es la energía del nivel fundamental del átomo de hidrógeno

   ii) Halle la expresión de la concentración de electrones en el nivel donor n_d, para un semiconductor fabricado con uno intrínseco agregando un a concentración de impurezas donoras N_d.

   iii) Exprese el balance de carga en este caso.

   iv) La condición de no degeneración ahora es $\frac{|\mu-E_d|}{kT} \gg 1$.
   Utilísela para calcular $\mu(T)$ y compare con $\mu_i(T)$ del ejercicio 1 para $N_d = 10^{12} m^{-3}$. Note la existencia de una región de temperatura dominada por el comportamiento

intrínseco y otra dominada por el comportamiento extrínsico. Estime el rango de temperatura en el cual vale la condición de no degeneración.

v) Obtenga $n_c(T)$ y $p_v(T)$ y compare con $n_i(T)$ del ejercicio 1.

Ayuda: Para i) la energía del nivel n de un átomo hidrogenoide de carga Ze es $E_n = \frac{-mZ^2e^4}{2\hbar^2n^2}$ y el radio de la órbita $r_n = \frac{\hbar^2n^2}{mZe^2}$. Por otro lado en un medio de constante dieléctrica ε la carga nuclear se apantalla según $Ze \to Ze/\varepsilon$.

4. Órbitas de impurezas: el InSb tiene un gap $E_g = 0.23$eV, una constante dieléctrica $\varepsilon = 18$ y una masa efectiva $m_c^* = 0.015m$. Calcular

i) La energía de ionización del donor.

ii) El radio típico del estado fundamental.

iii) La concentración de donores a la que comenzarán a superponerse los orbitales correspondientes a átomos de impurezas adyacentes.

5. Ionización de donores: en un dado semiconductor hay 10^13 donores/cm^3, con una energía de ionización $E_d = 1$meV y una masa efectiva $m_c^* = 0.01m$.

i) Estimar la concentración n de electrones de conducción a T=4 K.

ii) Calcular el coeficiente Hall. Suponer que no hay impurezas aceptoras presentes y que $E_d \gg kT$. Recordar que $R_H = -1/nec$

6. En una juntura con un nivel de dopaje $\Delta N(x) = N_d(x) - N_a(x)$, la variable $\psi = (e\phi + \mu - \mu_i)/(k_BT)$ satisface la ecuación diferencial

$$\frac{\mathrm{d}^2\psi}{\mathrm{d}x^2} = \frac{8\pi n_i e^2}{k_BT\varepsilon}\left(\sinh\psi - \frac{\Delta N(x)}{2n_i}\right)$$

para el caso no degenerado, siendo n_i y μ_i la densidad de portadores y el potencial químico para el semiconductor sin impurezas a la misma temperatura.

i) Considere una juntura formada por un semiconductor ligeramente dopado ($N_d, N_a \ll n_i$), asuma que $\psi \ll 1$ ($\sinh\psi \approx \psi$) y muestre que, bajo este supuesto,

$$\psi(x) = \frac{K}{2}\int_{-\infty}^{\infty} e^{-K|x-x'|}\frac{\Delta N(x')}{2n_i}\mathrm{d}x'$$

es solución de la ecuación diferencial y exprese K en términos de las constantes del problema.

ii) Verifique que la solución propuesa satisfaga el supuesto $\psi \ll 1$.

7. Estime el orden de magnitud de las corrientes de deriva y de difusión en la zona de agotamiento (*depletion layer*) usando los valores típicos de campo eléctrico $(\Delta\phi/(d_n + d_p))$ y de densidades de portadores. Muestre que cada una de éstas es mucho mayor que la corriente neta.

8. Estime la corriente de saturación en una juntura *pn* a temperatura ambiente (300 K) y a temperatura de nitrógeno líquido (77 K) para un semiconductor con un gap de 0.5 eV, una concentración de donores y portadores de $10^{18}/cm^3$, tiempo de recombinación de 10^{-5} s y longitud de difusiń de 10^{-4} cm.

9. Teniendo en cuenta que tanto las corrientes de electrones como las de huecos deben desvanecerse en equilibrio térmico, encuentre las *Relaciones de Einstein* entre la movilidad y el coeficiente de difusión de electrones y huecos.

10. Analice el efecto de la temperatura sobre el comportamiento del diodo ideal. A modo de ayuda separe en los casos de polarización directa e indirecta y use algunos valores típicos:

    kT $\sim 0.025eV$, $E_g(Ge, T_{amb} = 0.66eV$, $I = 10mA$ y $I_0 = 1pA$

    Para el caso de polarización directa puede considerar una corriente constante y analizar la dependencia del voltaje con la temperatura.

11. En la construcción de fotodetectores y celdas solares, une aprovecha la diferencia de potencial que se crea en la región de depleción para separar las cargas generadas por excitación lumínica y así generar una corriente. Para maximizar la zona de absorción y tener mejor control de las propiedades del dispositivo se usan junturas p-i-n.

    i) Encuentre el tamaño de la región de depleción en este sistema.

    ii) Teniendo en cuenta que la carga total acumulada de ambos lados de la juntura es igual y opuesta y se puede escribir como $Q_p = qN_a d_p$, calcule la capacitancia del sistema. Si se considera un circuito RC para el dispositivo, analice si es conveniente una región de depleción mayor o menor y justifique.