

**Estructura de la Materia 2**  
**Segundo cuatrimestre 2019**  
**Guía 7: Semiconductores**

1. Semiconductor intrínseco 3D

Considere un semiconductor con bandas de valencia (BV) y de conducción (BC) de forma parabólica general en un entorno de los respectivos puntos extremos, masas efectivas  $m_v^*$ ,  $m_c^*$  y energías  $\varepsilon_v$ ,  $\varepsilon_c$ .

- i) Exprese y grafique las densidades de estados por unidad de volumen.
- ii) Exprese y grafique las funciones de Fermi de electrones y de huecos superpuestas sobre el gráfico anterior. Suponga que  $\mu(T = 0) = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_v}{2}$  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  $\frac{|\mu - \varepsilon_{c,v}|}{kT} \gg 1$  en escala de  $kT$ ,  $\mu$  está en el interior del gap ( $\varepsilon_g = \varepsilon_c - \varepsilon_v$ ) lejos de los extremos de las bandas. Calcule y grafique  $\mu(T) = \mu_i(T)$  (i por intrínseco). Use masas típicas para el Ge:  $m_v^* = 0,37m$ ,  $m_c^* = 0,56m$ . Estime el valor de  $\varepsilon_g$  a partir del cual se viola la condición anterior a temperatura ambiente. ( $\varepsilon_g(\text{Ge}) = 0,67 \text{ eV}$ )
- v) Calcule  $n_c(T)$  y  $p_v(T)$ .

2. Masas efectivas de huecos y electrones.

Suponga 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  $\mu$  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. Semiconductor intrínseco 2D.

Se quiere modelar el comportamiento de un semiconductor bidimensional no dopado. Para ello se suponen bandas de valencia y de conducción de forma parabólica en un entorno de sus respectivos extremos coincidentes (gap directo), masas efectivas  $m_v^*$  y  $m_c^*$ , y aplicable la condición de no degeneración.

- i) Calcule y grafique las densidades de estados por unidad de superficie para cada banda.
- ii) Escriba la ecuación de balance de carga y calcule explícitamente las densidades de portadores.
- iii) Utilice la ecuación de electroneutralidad para hallar el potencial químico en función de la temperatura. Grafique su valor a  $T=0K$  en el gráfico que realizó en el primer inciso.

4. i) Mediante una comparación con un átomo hidrogenoide, argumente por qué el radio aproximado de la órbita de un electrón ligado a una impureza donora es  $r = \frac{\epsilon a_0 m}{m^*}$  y su energía  $\epsilon_d = \epsilon_c - \frac{m^*}{m\epsilon^2} \text{ Ry}$ . Compare  $\epsilon_c - \epsilon_d$  con  $\epsilon_g$  para casos típicos.
- $a_0 = \frac{\hbar^2}{m\epsilon^2} \approx 0,53\text{\AA}$  es el radio de Bohr,  $\epsilon$  es la constante dieléctrica del medio y  $1\text{Ry} = \frac{m\epsilon^4}{2\hbar^2} \approx 13,6\text{eV}$  es la energía del nivel fundamental del átomo de hidrógeno
- ii) Halle la expresión que tiene la concentración de electrones en el nivel donor  $n_d$  para un semiconductor fabricado con uno intrínseco al que se le agrega una concentración de impurezas donoras  $N_d$ .
- iii) Expresé el balance de carga en este caso.
- iv) La condición de no degeneración es ahora  $\frac{|\mu - \epsilon_d|}{kT} \gg 1$ . Utilícela 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 extrínseco. 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.
- vi) Calcule las expresiones pedidas en los ítems ii-v si ahora el semiconductor extrínseco se obtiene añadiendo una concentración  $N_a$  de impurezas aceptoras al semiconductor intrínseco.
- Ayuda para i):** Para un átomo hidrogenoide de carga  $Ze$ , la energía y el radio de la órbita asociados al nivel  $n$ ésimo son, respectivamente:  $E_n = \frac{-mZ^2e^4}{2\hbar^2n^2}$   $r_n = \frac{\hbar^2n^2}{mZe^2}$ . Por otro lado, en un medio de constante dieléctrica  $\epsilon$ , la carga nuclear se apantalla según  $Ze \rightarrow Ze/\epsilon$ .
5. Órbitas de impurezas: el InSb tiene un gap  $\epsilon_g = 0,23\text{eV}$ , una constante dieléctrica  $\epsilon = 18$  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.
6. Ionización de donores: en un dado semiconductor hay  $10^{13}$  donores/ $\text{cm}^3$ , con una energía de ionización  $I_d = 1\text{meV}$  y una masa efectiva  $m_c^* = 0,01m$ .
- i) Estimar la concentración  $n_c$  de electrones de conducción y el potencial químico a  $T=4$  K.
- ii) Calcular el coeficiente Hall. Suponer que no hay impurezas aceptoras presentes y que  $\epsilon_d \gg kT$ . Recordar que  $R_H = -1/nec$  (CGS) (aunque esta ecuación no es válida si se tienen dos tipos de portadores).