

Estructura de la Materia 2
Primer Cuatrimestre de 2010
Guía 5: Semiconductores

1. Semiconductor intrínseco

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) Expresé y grafique las densidades de estados por unidad de volumen.
- ii) Expresé 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) Expresé 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 $\frac{|\mu - E_{c,v}|}{kT} \gg 1$ 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 intrínseco). 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 $r = \frac{\epsilon a_0 m}{m^*}$ y que su energía es $E_d = E_c - \frac{m^*}{m\epsilon^2}$ Ry. Compare $E_c - E_d$ con E_g para casos típicos ($a_0 = \frac{\hbar^2}{m\epsilon^2} \approx 0,53AA$ es el radio de Bohr, ϵ es la constante dieléctrica, $1Ry = \frac{me^4}{2\hbar^2} \approx 13,6eV$ es la energía del nivel fundamental del átomo de hidrógeno)
- ii) Halle la expresión de la concentración de electrones en el nivel donador n_d , para un semiconductor fabricado con uno intrínseco agregando un a concentración de impurezas donoras N_d .
 - iii) Expresé el balance de carga en este caso.
 - iv) La condición de no degeneración ahora es $\frac{|\mu - E_d|}{kT} \gg 1$. 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.

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 $Ze \rightarrow Ze/\epsilon$.

4. Orbitas de impurezas: el InSb tiene un gap $E_g = 0,23\text{eV}$, una constante dieléctrica $\epsilon = 18$ y una masa efectiva $m_c^* = 0,015m$. Calcular

i) La energía de ionización del donador.

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 $E_d = 1\text{meV}$ 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. Óptica de semiconductores: Interacción dipolar $E \cdot d$

Un semiconductor de bandgap directo con E_g es iluminado con luz monocromática de frecuencia angular ω , bajo condiciones de baja temperatura. Esto produce la transición de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción. Utilice como modelo el GaAs, con $E_g = 1,35\text{eV}$.

i) ¿Qué longitudes de onda de la luz producen transiciones electrónicas?

ii) La interacción de la luz con el electrón se modela con el Hamiltoniano de acoplamiento mínimo $h = 1/(2m)[p - eA(r, t)]^2 + \phi(r)$, donde $A(r, t)$ es el potencial vector y ϕ un término potencial que incluye el potencial escalar y el potencial de la red. Considere el Gauge de Coulomb. Simplifique el resultado para campos EM poco intensos en la aproximación dipolar.

iii) Utilizando la relación de conmutación de la posición y h , exprese el hamiltoniano en términos del momento dipolar eléctrico y el campo eléctrico (elimine el momento p). [Expresar el resultado en términos de operadores de $|b'k'\rangle|bk\rangle$]

7. Óptica de semiconductores: Transiciones interbandas *

El Hamiltoniano de interacción puede escribirse como

$$H_I = -E(t) \sum_k (d_{cv}|ck\rangle\langle vk| + d_{cv}^*|vk\rangle\langle ck|),$$

donde $E(t) = E_0/2(e^{i\omega t} + e^{-i\omega t})$ es el campo eléctrico. La matriz densidad de partícula única es

$$\rho_k(t) = \sum_{\lambda'\lambda} \rho_{\lambda'\lambda}(k, t)|\lambda'k\rangle\langle\lambda k|,$$

i) Escriba la ecuación de Liouville para la coherencia interbanda a un k arbitrario.

ii) Asumiendo que la interacción luz-materia es debil (perturbación), que a tiempo $t = 0$ $\rho_{cc}(k, 0) = 0$ y $\rho_{vv}(k, 0) = 1$, y la Rotating Wave Approximation (retener solo los terminos $e^{\pm i(\omega - \epsilon_{ck} + \epsilon_{vk})}$, donde ϵ_{bk} es la energía del estado k en la banda b , sin la perrurbación), escriba la ecuación para $\rho_{cv}(k, t)$ y resuelva.

iii) Interprete.

8. Óptica de semiconductores: Efecto sobre el campo Electromagnético *

Utilizando la expresión de la coherencia interbanda hallada en el ejercicio anterior, y el valor de expectación del momento dipolar eléctrico

$$P(t) = Tr[\rho(t)d]$$

i) Halle la susceptibilidad eléctrica en función de la frecuencia.

ii) Halle el coeficiente de absorción.

iii) Interprete.

* REF: QUANTUM THEORY OF THE OPTICAL AND ELECTRONIC PROPERTIES OF SEMICONDUCTORS, Haug y Koch