

01_fisica_semiconductores

June 19, 2026

1 Tema 1 - Introduccion a la Fisica de los Semiconductores

Electronica General - 2o GIERM

1.1 Objetivos de aprendizaje

- Comprender el modelo atomico de Bohr y la cuantizacion de la energia
- Explicar la formacion de bandas de energia en solidos cristalinos
- Distinguir entre semiconductores intrinsecos y extrinsecos (tipo N y tipo P)
- Calcular la concentracion de portadores usando la ley de accion de masas
- Aplicar la estadistica de Fermi-Dirac para determinar el nivel de Fermi

1.2 Formulario

1.2.1 Modelo atomico de Bohr

$$E_n = - \left(\frac{Z}{n} \right)^2 E_0, \quad E_0 = 13.6 \text{ eV}$$

$$r_n = \frac{n^2}{Z} a_0, \quad a_0 = 0.529 \text{ \AA}$$

1.2.2 Energia del foton emitido/absorbido

$$E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad \lambda \approx \frac{12400}{E_{nf} - E_{ni}} \text{ (\AA)}$$

1.2.3 Concentracion intrinseca de portadores

$$n_i^2 = N_c \cdot N_v \cdot \exp \left(-\frac{E_g}{kT} \right)$$

1.2.4 Ley de accion de masas

$$n \cdot p = n_i^2$$

1.2.5 Semiconductor tipo N (dopado con donores)

$$n \approx N_D, \quad p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

1.2.6 Semiconductor tipo P (dopado con aceptores)

$$p \approx N_A, \quad n = \frac{n_i^2}{N_A}$$

1.2.7 Distribucion de Fermi-Dirac

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)}$$

1.2.8 Nivel de Fermi intrinseco

$$E_{Fi} \approx \frac{E_c + E_v}{2}$$

1.2.9 Constantes fundamentales

Constante	Valor
Carga elemental e	$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Constante de Boltzmann k	$8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
Constante de Planck h	$4.136 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$
Velocidad de la luz c	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$
Voltaje termico a 300 K	$V_T = kT/e \approx 25.9 \text{ mV}$

1.3 1. Modelo atomico: de Rutherford a la mecanica cuantica

1.3.1 1.1 Modelo de Rutherford (1911)

El modelo planetario propone que los electrones orbitan alrededor del nucleo, pero tiene un problema fundamental: un electron acelerado (en movimiento circular) **emite radiacion** y perderia energia continuamente, colapsando sobre el nucleo.

1.3.2 1.2 Modelo de Bohr (1913)

Bohr resuelve el problema imponiendo **postulados de cuantizacion**:

1. Los electrones solo pueden ocupar **orbitas estacionarias** con momento angular cuantizado:
 $L = n\hbar$
2. Solo se emite/absorbe radiacion al **transitar entre orbitas**: $E_\gamma = E_{n_f} - E_{n_i}$
3. Las orbitas permitidas tienen **energias discretas**: $E_n = -13.6/n^2 \text{ eV}$ (para el hidrogeno)

1.3.3 1.3 Modelo de Schrodinger (1926)

La mecanica cuantica completa reemplaza las orbitas por **orbitales** (funciones de onda ψ). La probabilidad de encontrar al electron en una posicion se obtiene con $|\psi|^2$. Cada estado se describe con 4 numeros cuanticos: n, l, m_l, m_s .

1.4 2. Bandas de energia en solidos cristalinos

Cuando los atomos se unen formando un cristal, los niveles de energia discretos se ensanchan en **bandas** debido a la interaccion entre atomos vecinos.

1.4.1 Conceptos clave

- **Banda de valencia (BV):** Ultima banda completamente llena a 0 K. Los electrones aqui estan ligados a los enlaces covalentes.
- **Banda de conduccion (BC):** Primera banda vacia (o parcialmente llena) por encima de la BV. Los electrones aqui son **libres** para conducir corriente.
- **Banda prohibida (E_g):** Gap de energia entre BV y BC. No existen estados permitidos.

1.4.2 Clasificacion de materiales segun E_g

Material	E_g	Ejemplo
Conductor	0 eV (bandas solapadas)	Cu, Al, Au
Semiconductor	0.1 - 4 eV	Si (1.12), Ge (0.66), GaAs (1.42)
Aislante	> 4 eV	SiO ₂ (9), Diamante (5.5)

1.5 3. Semiconductores intrinsecos

Un semiconductor **intrinseco** es un cristal puro, sin impurezas. A 0 K se comporta como aislante, pero a temperatura ambiente los electrones adquieren energia termica suficiente para saltar de la BV a la BC.

1.5.1 Generacion de pares electron-hueco

Cada electron que salta a la BC deja un **hueco** en la BV. En un SC intrinseco:

$$n = p = n_i$$

donde n_i es la **concentracion intrinseca**, que depende fuertemente de la temperatura:

$$n_i^2 = N_c \cdot N_v \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

1.5.2 Valores de n_i a 300 K

Material	E_g (eV)	n_i (cm ⁻³)
Germanio (Ge)	0.66	2.4×10^{13}
Silicio (Si)	1.12	1.5×10^{10}
Arseniuro de Galio (GaAs)	1.42	1.8×10^6

Nota: A mayor E_g , menor n_i . El GaAs tiene muchísimos menos portadores intrínsecos que el Ge, lo que lo hace mejor para alta temperatura.

1.6 4. Semiconductores extrínsecos (dopaje)

El **dopaje** consiste en introducir impurezas controladas para modificar la concentración de portadores.

1.6.1 4.1 Tipo N (donores)

Se introduce un átomo del grupo V (P, As, Sb) que tiene **5 electrones de valencia**. Cuatro forman enlaces covalentes con el Si, y el quinto queda débilmente ligado.

- El átomo donador crea un **nivel de energía** E_D justo debajo de E_c (~ 0.045 eV para P en Si)
- A temperatura ambiente, el electrón extra se ioniza fácilmente: $n \approx N_D$
- Los electrones son **portadores mayoritarios**, los huecos son minoritarios

$$n \approx N_D, \quad p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

1.6.2 4.2 Tipo P (aceptores)

Se introduce un átomo del grupo III (B, Al, Ga) que tiene **3 electrones de valencia**. Le falta un electrón para completar los 4 enlaces, creando un hueco.

- El átomo aceptor crea un **nivel de energía** E_A justo encima de E_v (~ 0.045 eV para B en Si)
- A temperatura ambiente, acepta un electrón de la BV: $p \approx N_A$
- Los huecos son **portadores mayoritarios**, los electrones son minoritarios

$$p \approx N_A, \quad n = \frac{n_i^2}{N_A}$$

1.7 5. Estadística de Fermi-Dirac

La función de distribución de Fermi-Dirac da la **probabilidad** de que un estado de energía E este ocupado por un electrón:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

1.7.1 Propiedades fundamentales

1. **En $E = E_F$:** $f(E_F) = 0.5$ (50% de probabilidad de ocupacion)
2. **Para $E \gg E_F$:** $f(E) \rightarrow 0$ (estados vacios)
3. **Para $E \ll E_F$:** $f(E) \rightarrow 1$ (estados llenos)
4. **A $T = 0$ K:** La funcion es un escalon: $f = 1$ si $E < E_F$, $f = 0$ si $E > E_F$
5. **Al aumentar T:** La transicion se suaviza, mas electrones tienen energia para saltar por encima de E_F

1.7.2 Interpretacion para semiconductores

- La probabilidad de encontrar un **electron** en la BC es $f(E)$
- La probabilidad de encontrar un **hueco** en la BV es $1 - f(E)$
- El nivel de Fermi E_F actua como referencia energetica del sistema

1.8 6. Concentracion de portadores en equilibrio

La concentracion de electrones y huecos en equilibrio termico se calcula combinando la densidad de estados $g(E)$ con la funcion de Fermi-Dirac $f(E)$:

1.8.1 En la banda de conduccion (electrones)

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$$

donde $N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$ es la densidad efectiva de estados en la BC.

1.8.2 En la banda de valencia (huecos)

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$$

donde $N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$ es la densidad efectiva de estados en la BV.

1.8.3 Ley de accion de masas

Multiplicando $n \cdot p$:

$$n \cdot p = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) = n_i^2$$

Esta relacion es **independiente del nivel de Fermi** y se cumple siempre en equilibrio, tanto para semiconductores intrinsecos como extrinsecos.

1.9 Ejercicios resueltos

1.9.1 Ejercicio 1: Niveles de energia del atomo de hidrogeno

Enunciado: Calcular la energia de los 4 primeros niveles del atomo de hidrogeno segun el modelo de Bohr. Determinar la longitud de onda del foton emitido en la transicion $n = 3 \rightarrow n = 2$ (linea H-alpha de la serie de Balmer).

1.9.2 Ejercicio 2: Concentracion intrinseca del Silicio

Enunciado: Calcular la concentracion intrinseca de portadores n_i del Silicio a $T = 300$ K, sabiendo que $N_c = 2.86 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_v = 1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ y $E_g = 1.12 \text{ eV}$.

1.9.3 Ejercicio 3: Semiconductor tipo N

Enunciado: Una muestra de Silicio se dopa con $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ atomos de fosforo. A $T = 300$ K, calcular:

- La concentracion de electrones n y huecos p
- La posicion del nivel de Fermi respecto al nivel de Fermi intrinseco $E_F - E_{Fi}$

1.9.4 Ejercicio 4: Semiconductor tipo P

Enunciado: Una muestra de Silicio se dopa con $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ atomos de boro. A $T = 300$ K, calcular:

- La concentracion de huecos p y electrones n
 - La posicion del nivel de Fermi respecto al nivel de Fermi intrinseco $E_F - E_{Fi}$
 - Verificar que se cumple la ley de accion de masas $n \cdot p = n_i^2$
-

1.10 Catalogo de ejercicios propuestos

1.10.1 Tipo 1: Modelo de Bohr

- Calcular los 5 primeros niveles de energia del ion He^+ ($Z = 2$)
- Determinar la longitud de onda de la transicion $n = 4 \rightarrow n = 1$ (serie de Lyman)
- Encontrar el nivel minimo n para ionizar el hidrogeno con un foton de 0.85 eV

1.10.2 Tipo 2: Concentracion intrinseca

- Calcular n_i para Ge a 300 K ($E_g = 0.66 \text{ eV}$, $N_c = 1.04 \times 10^{19}$, $N_v = 6.0 \times 10^{18}$)
- A que temperatura el Si tiene $n_i = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$?
- Comparar n_i de Si y GaAs a 400 K

1.10.3 Tipo 3: Semiconductores tipo N

- Si dopado con $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$: calcular n , p , y $E_F - E_{Fi}$
- Si tipo N con $n = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$: calcular N_D y la concentracion de huecos
- Determinar N_D para que E_F este 0.3 eV por encima de E_{Fi}

1.10.4 Tipo 4: Semiconductores tipo P

10. Si dopado con $N_A = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$: calcular p , n , y $E_F - E_{Fi}$
11. Ge tipo P con $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$: calcular portadores y verificar $np = n_i^2$
12. Determinar N_A para que E_F este 0.25 eV por debajo de E_{Fi}

1.10.5 Tipo 5: Dopaje compensado y Fermi-Dirac

13. Si con $N_D = 3 \times 10^{16}$ y $N_A = 1 \times 10^{16}$: calcular portadores netos
14. Calcular $f(E)$ para $E - E_F = 0.1 \text{ eV}$ a $T = 300 \text{ K}$ y $T = 500 \text{ K}$
15. Demostrar que $f(E_F + \Delta E) + f(E_F - \Delta E) = 1$ (simetria de Fermi-Dirac)

1.11 Tabla resumen

Concepto	Formula / Valor	Notas
Energia Bohr	$E_n = -(Z/n)^2 \cdot 13.6 \text{ eV}$	$n = 1, 2, 3, \dots$
Foton emitido	$\lambda = 12400 / (E_{nf} - E_{ni}) \text{ A}$	Transicion entre niveles
n_i Si (300 K)	$1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$	$E_g = 1.12 \text{ eV}$
n_i Ge (300 K)	$2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$	$E_g = 0.66 \text{ eV}$
n_i GaAs (300 K)	$1.8 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$	$E_g = 1.42 \text{ eV}$
Ley accion masas	$n \cdot p = n_i^2$	Siempre en equilibrio
Tipo N	$n \approx N_D, p = n_i^2 / N_D$	E_F por encima de E_{Fi}
Tipo P	$p \approx N_A, n = n_i^2 / N_A$	E_F por debajo de E_{Fi}
Fermi-Dirac en E_F	$f(E_F) = 0.5$	Independiente de T
kT a 300 K	$25.9 \text{ meV} = 0.0259 \text{ eV}$	Energia termica

1.12 Siguiente tema

Tema 2 - La union PN y el diodo semiconductor

- Formacion de la zona de deplexion
- Potencial de contacto y barrera de potencial
- Ecuacion de Shockley del diodo
- Curva caracteristica I-V

Notebook creado para Electronica General - 2o GIERM

Ultima actualizacion: Marzo 2026