

Tema 6: Física de semiconductores

$$1 \mu m = 1 \cdot 10^{-6} m$$

$$K = ^\circ C + 273$$

Concentración de portadores en un semiconductor intrínseco

$$n \equiv \text{Concentración / Densidad de portadores de carga (electrones) por volumen } (e^-/m^3)$$

$$p \equiv \text{Concentración / Densidad de portadores de carga (huecos) por volumen } (h^+/m^3)$$

$$n = p = n_i \rightarrow n_i \equiv \text{Densidad intrínseca del semiconductor } (m^{-3})$$

$$n = N_c \cdot e^{-\frac{(E_c - E_F)}{KT}}$$

$$\begin{aligned} n &\equiv \text{Concentración / Densidad de portadores de carga (electrones) por volumen} \\ e &\equiv \text{Número de Euler (calculadora)} \\ E_c &\equiv \text{Energía (mínima) del borde inferior de la banda de conducción (J)} \\ E_F &\equiv \text{Energía de Fermi (J)} \\ K &\equiv \text{Constante de Boltzmann (J/K)} \\ T &\equiv \text{Temperatura (K)} \\ N_c &\equiv \text{Densidad efectiva de estados en la banda de conducción } (m^{-3}) \end{aligned}$$

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$\begin{aligned} N_c &\equiv \text{Densidad efectiva de estados en la banda de conducción} \\ m_n &\equiv \text{Masa efectiva de los electrones (kg)} \\ K &\equiv \text{Constante de Boltzmann} \\ T &\equiv \text{Temperatura} \\ h &\equiv \text{Constante de Planck (J \cdot s)} \end{aligned}$$

$$p = N_v \cdot e^{-\frac{(E_F - E_v)}{KT}}$$

$$\begin{aligned} p &\equiv \text{Concentración / Densidad de portadores de carga (huecos) por volumen} \\ N_v &\equiv \text{Densidad efectiva de estados en la banda de valencia } (m^{-3}) \\ e &\equiv \text{Número de Euler (calculadora)} \\ E_F &\equiv \text{Energía de Fermi} \\ E_v &\equiv \text{Energía (máxima) del borde superior de la banda de valencia (J)} \\ K &\equiv \text{Constante de Boltzmann} \\ T &\equiv \text{Temperatura} \end{aligned}$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$\begin{aligned} N_v &\equiv \text{Densidad efectiva de estados en la banda de valencia} \\ m_p &\equiv \text{Masa efectiva de los huecos (kg)} \\ K &\equiv \text{Constante de Boltzmann} \\ T &\equiv \text{Temperatura} \\ h &\equiv \text{Constante de Planck} \end{aligned}$$

$$np = N_c \cdot N_v \cdot e^{-\frac{E_g}{KT}}$$

$$\begin{aligned} n &\equiv \text{Concentración / Densidad de portadores de carga (electrones) por volumen} \\ p &\equiv \text{Concentración / Densidad de portadores de carga (huecos) por volumen} \\ N_c &\equiv \text{Densidad efectiva de estados en la banda de conducción} \\ N_v &\equiv \text{Densidad efectiva de estados en la banda de valencia} \\ e &\equiv \text{Número de Euler (calculadora)} \\ E_g &\equiv \text{Anchura de la banda prohibida (J)} \\ K &\equiv \text{Constante de Boltzmann} \\ T &\equiv \text{Temperatura} \end{aligned}$$

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot e^{-E_g/2kT}$$

n_i \equiv Densidad intrínseca del semiconductor
 N_c \equiv Densidad efectiva de estados en la banda de conducción
 N_v \equiv Densidad efectiva de estados en la banda de valencia
 e \equiv Número de Euler (calculadora)
 E_g \equiv Anchura de la banda prohibida
 k \equiv Constante de Boltzmann
 T \equiv Temperatura

Ley de acción de masas (intrínseco y extrínseco)

$$n \cdot p = n_i^2 \rightarrow \left[\begin{array}{l} n \equiv \text{Concentración / Densidad de portadores de carga (electrones) por volumen} \\ p \equiv \text{Concentración / Densidad de portadores de carga (huecos) por volumen} \\ n_i \equiv \text{Densidad intrínseca del semiconductor} \end{array} \right]$$

$$N_x = N_A \cdot \frac{d_x}{M_x} \rightarrow \left[\begin{array}{l} N_x \equiv \text{Concentración de átomos por volumen en el sólido para cualquier sólido (átm/m}^3\text{)} \\ N_A \equiv \text{Número de Avogadro (mol}^{-1}\text{)} \\ d_x \equiv \text{Densidad de "x" (g/m}^3\text{)} \\ M_x \equiv \text{Masa molar de "x" (g/mol)} \end{array} \right]$$

Posición del nivel de Fermi en un semiconductor intrínseco

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{k \cdot T}{2} \cdot \ln \left(\frac{N_v}{N_c} \right) \rightarrow \left[\begin{array}{l} E_F \equiv \text{Energía de Fermi} \\ E_c \equiv \text{Energía (mínima) del borde inferior de la banda de conducción} \\ E_v \equiv \text{Energía (máxima) del borde superior de la banda de valencia} \\ k \equiv \text{Constante de Boltzmann} \\ T \equiv \text{Temperatura} \\ N_v \equiv \text{Densidad efectiva de estados en la banda de valencia} \\ N_c \equiv \text{Densidad efectiva de estados en la banda de conducción} \end{array} \right]$$

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} \cdot k \cdot T \cdot \ln \left(\frac{m_p}{m_n} \right) \rightarrow \left[\begin{array}{l} E_F \equiv \text{Energía de Fermi} \\ E_c \equiv \text{Energía (mínima) del borde inferior de la banda de conducción} \\ E_v \equiv \text{Energía (máxima) del borde superior de la banda de valencia} \\ k \equiv \text{Constante de Boltzmann} \\ T \equiv \text{Temperatura} \\ m_p \equiv \text{Masa efectiva de los huecos} \\ m_n \equiv \text{Masa efectiva de los electrones} \end{array} \right]$$

$$E_F \approx \frac{E_c + E_v}{2} \rightarrow \left[\begin{array}{l} E_F \equiv \text{Energía de Fermi} \\ E_c \equiv \text{Energía (mínima) del borde inferior de la banda de conducción} \\ E_v \equiv \text{Energía (máxima) del borde superior de la banda de valencia} \end{array} \right] \rightarrow \begin{array}{l} \text{Suponemos:} \\ - m_p \approx m_n \\ - T \text{ ordinaria} \end{array}$$

Concentración de portadores en un semiconductor extrínseco

• Tipo n ($N_A=0$) → SOLO si $N_D \gg n_i$

$$n_n \approx N_D \rightarrow \left[\begin{array}{l} n_n \equiv \text{Concentración/Densidad de electrones en un semiconductor extrínseco dopado tipo n (e}^-/\text{m}^3) \\ N_D \equiv \text{Concentración/Densidad de átomos donadores (m}^{-3}) \end{array} \right]$$

$$p_n \approx \frac{n_i^2}{N_D} \rightarrow \left[\begin{array}{l} p_n \equiv \text{Concentración/Densidad de huecos en un semiconductor extrínseco dopado tipo n (h}^+/\text{m}^3) \\ n_i \equiv \text{Densidad intrínseca del semiconductor} \\ N_D \equiv \text{Concentración/Densidad de átomos donadores} \end{array} \right]$$

• Tipo p ($N_D=0$) → SOLO si $N_A \gg n_i$

$$p_p \approx N_A \rightarrow \left[\begin{array}{l} p_p \equiv \text{Concentración/Densidad de huecos en un semiconductor extrínseco dopado tipo p (h}^+/\text{m}^3) \\ N_A \equiv \text{Concentración/Densidad de átomos aceptores (m}^{-3}) \end{array} \right]$$

$$n_p \approx \frac{n_i^2}{N_A} \rightarrow \left[\begin{array}{l} n_p \equiv \text{Concentración/Densidad de electrones en un semiconductor extrínseco dopado tipo n (e}^-/\text{m}^3) \\ n_i \equiv \text{Densidad intrínseca del semiconductor} \\ N_A \equiv \text{Concentración/Densidad de átomos aceptores} \end{array} \right]$$

Ley de neutralidad eléctrica (tipo p y tipo n)

$$\left[\begin{array}{l} N_D + p = N_A + n \\ n \cdot p = n_i^2 \end{array} \right] \rightarrow \left[\begin{array}{l} N_D \equiv \text{Concentración/Densidad de átomos donadores} \\ p \equiv \text{Concentración/Densidad de portadores de carga (huecos) por volumen} \\ N_A \equiv \text{Concentración/Densidad de átomos aceptores} \\ n \equiv \text{Concentración/Densidad de portadores de carga (electrones) por volumen} \end{array} \right]$$

→ SIN aproximar

$$n = n_i \cdot e^{\frac{(E_F - E_{Fi})}{KT}}$$

$$\frac{(E_F - E_{Fi})}{KT}$$

$$\rightarrow \left[\begin{array}{l} n \equiv \text{Concentración/Densidad de portadores de carga (electrones) por volumen} \\ n_i \equiv \text{Densidad intrínseca del semiconductor} \\ e \equiv \text{Número de Euler (calculadora)} \\ E_F \equiv \text{Energía de Fermi} \\ E_{Fi} \equiv \text{Energía de Fermi en semiconductor intrínseco (J)} \\ k \equiv \text{Constante de Boltzmann} \\ T \equiv \text{Temperatura} \end{array} \right]$$

$$p = n_i \cdot e^{\frac{(E_{Fi} - E_F)}{KT}}$$

$$\frac{(E_{Fi} - E_F)}{KT}$$

$$\rightarrow \left[\begin{array}{l} p \equiv \text{Concentración/Densidad de portadores de carga (huecos) por volumen} \\ n_i \equiv \text{Densidad intrínseca del semiconductor} \\ e \equiv \text{Número de Euler (calculadora)} \\ E_{Fi} \equiv \text{Energía de Fermi en semiconductor intrínseco} \\ E_F \equiv \text{Energía de Fermi} \\ k \equiv \text{Constante de Boltzmann} \\ T \equiv \text{Temperatura} \end{array} \right]$$

Posición del nivel de Fermi en un semiconductor extrínseco

• Tipo n

$$n = N_c \cdot e^{-\frac{(E_c - E_F)}{KT}} \rightarrow \text{[Explicada anteriormente]}$$

$$n_n \approx N_D \rightarrow \text{[Explicada anteriormente]}$$

$$E_{F(n)} = E_c - KT \cdot \ln\left(\frac{N_c}{N_D}\right) \rightarrow \left[\begin{array}{l} E_{F(n)} \equiv \text{Energía de Fermi en semiconductor extrínseco tipo n (J)} \\ E_c \equiv \text{Energía (mínima) del borde inferior de la banda de conducción} \\ K \equiv \text{Constante de Boltzmann} \\ T \equiv \text{Temperatura} \\ N_c \equiv \text{Densidad efectiva de estados en la banda de conducción} \\ N_D \equiv \text{Concentración / Densidad de átomos donadores} \end{array} \right]$$

• Tipo p

$$p = N_v \cdot e^{-\frac{(E_F - E_v)}{KT}} \rightarrow \text{[Explicada anteriormente]}$$

$$p_p \approx N_A \rightarrow \text{[Explicada anteriormente]}$$

$$E_{F(p)} = E_v + K \cdot T \cdot \ln\left(\frac{N_v}{N_A}\right) \rightarrow \left[\begin{array}{l} E_{F(p)} \equiv \text{Energía de Fermi en semiconductor extrínseco tipo p (J)} \\ E_v \equiv \text{Energía (máxima) del borde superior de la banda de valencia} \\ K \equiv \text{Constante de Boltzmann} \\ T \equiv \text{Temperatura} \\ N_v \equiv \text{Densidad efectiva de estados en la banda de valencia} \\ N_A \equiv \text{Concentración / Densidad de átomos aceptores} \end{array} \right]$$

Conductividad en un semiconductor intrínseco

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p \rightarrow \left[\begin{array}{l} \sigma \equiv \text{Conductividad del semiconductor intrínseco } (\Omega/m)^{-1} \\ \sigma_n \equiv \text{Conductividad de los electrones } (\Omega/m)^{-1} \\ \sigma_p \equiv \text{Conductividad de los huecos } (\Omega/m)^{-1} \end{array} \right]$$

$$\sigma_n = e \cdot n \cdot \mu_n \rightarrow \left[\begin{array}{l} \sigma_n \equiv \text{Conductividad de los electrones} \\ e \equiv \text{Carga del electrón (C)} \\ n \equiv \text{Densidad de portadores de carga (electrones) por volumen} \\ \mu_n \equiv \text{Movilidad de carga (electrones) } (m^2/V \cdot s) \end{array} \right]$$

$$\sigma_p = e \cdot p \cdot \mu_p \rightarrow \left[\begin{array}{l} \sigma_p \equiv \text{Conductividad de los huecos} \\ e \equiv \text{Carga del electrón} \\ p \equiv \text{Densidad de portadores de carga (huecos) por volumen} \\ \mu_p \equiv \text{Movilidad de carga (huecos) } (m^2/V \cdot s) \end{array} \right]$$

$$\sigma = n_i \cdot e (\mu_n + \mu_p) \rightarrow \left[\begin{array}{l} \sigma \equiv \text{Conductividad del semiconductor intrínseco} \\ n_i \equiv \text{Densidad intrínseca del semiconductor} \\ e \equiv \text{Carga del electrón} \\ \mu_n \equiv \text{Movilidad de carga (electrones)} \\ \mu_p \equiv \text{Movilidad de carga (huecos)} \end{array} \right]$$

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-E_g/kT} \rightarrow \left[\begin{array}{l} \sigma \equiv \text{Conductividad del semiconductor intrínseco} \\ \sigma_0 \equiv \text{Conductividad específica } (\Omega/m)^{-1} \\ e \equiv \text{Número de Euler (calculadora)} \\ E_g \equiv \text{Anchura de la banda prohibida} \\ k \equiv \text{Constante de Boltzmann} \\ T \equiv \text{Temperatura} \end{array} \right]$$

$$\sigma_0 = e \cdot \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot (\mu_n + \mu_p) \rightarrow \left[\begin{array}{l} \sigma_0 \equiv \text{Conductividad específica} \\ e \equiv \text{Carga del electrón} \\ \mu_n \equiv \text{Movilidad de la carga (electrones)} \\ \mu_p \equiv \text{Movilidad de la carga (huecos)} \\ N_c \equiv \text{Densidad efectiva de estados en la banda de conducción} \\ N_v \equiv \text{Densidad efectiva de estados en la banda de valencia} \end{array} \right]$$

Conductividad en un semiconductor extrínseco

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p \rightarrow \left[\begin{array}{l} \sigma \equiv \text{Conductividad del semiconductor extrínseco } (\Omega/m)^{-1} \\ e \equiv \text{Carga del electrón} \\ n \equiv \text{Densidad de portadores de carga (electrones) por volumen} \\ \mu_n \equiv \text{Movilidad de carga (electrones)} \\ p \equiv \text{Densidad de portadores de carga (huecos) por volumen} \\ \mu_p \equiv \text{Movilidad de carga (huecos)} \end{array} \right]$$

→ SIN aproximar

• Tipo n → SOLO si $n \gg p$

$$\sigma_n \approx e \cdot n_n \cdot \mu_n \rightarrow \left[\begin{array}{l} \sigma_n \equiv \text{Conductividad del semiconductor extrínseco dopado tipo n } (\Omega/m)^{-1} \\ e \equiv \text{Carga del electrón} \\ n_n \equiv \text{Concentración/Densidad de electrones en un semiconductor extrínseco dopado tipo n} \\ \mu_n \equiv \text{Movilidad de carga (electrones)} \end{array} \right]$$

• Tipo p → SOLO si $p \gg n$

$$\sigma_p \approx e \cdot p_p \cdot \mu_p \rightarrow \left[\begin{array}{l} \sigma_p \equiv \text{Conductividad del semiconductor extrínseco dopado tipo p } (\Omega/m)^{-1} \\ e \equiv \text{Carga del electrón} \\ p_p \equiv \text{Concentración/Densidad de huecos en un semiconductor extrínseco dopado tipo p} \\ \mu_p \equiv \text{Movilidad de carga (huecos)} \end{array} \right]$$

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{L}{S} \rightarrow \left[\begin{array}{l} R \equiv \text{Resistencia } (\Omega) \\ \sigma \equiv \text{Conductividad de un semiconductor intrínseco o extrínseco} \\ L \equiv \text{Longitud (m)} \\ S \equiv \text{Sección (m}^2\text{)} \end{array} \right]$$

$$(V-V') = I \cdot R \rightarrow \left[\begin{array}{l} V-V' \equiv \text{Diferencia de potencial (V)} \\ I \equiv \text{Intensidad / Corriente (A)} \\ R \equiv \text{Resistencia} \end{array} \right] \quad (V-V') = E \cdot L \rightarrow \left[\begin{array}{l} V-V' \equiv \text{Diferencia de potencial} \\ E \equiv \text{Campo eléctrico (V/m)} \\ L \equiv \text{Longitud} \end{array} \right]$$

En semiconductores extrínsecos

• Tipo n

$$n = p + N_D \rightarrow \left[\begin{array}{l} n \equiv \text{Densidad de portadores de carga (electrones) por volumen} \\ p \equiv \text{Densidad de portadores de carga (huecos) por volumen} \\ N_D \equiv \text{Concentración / Densidad de átomos donadores} \end{array} \right]$$

→ SIN aproximar

• Tipo p

$$p = n + N_A \rightarrow \left[\begin{array}{l} p \equiv \text{Densidad de portadores de carga (huecos) por volumen} \\ n \equiv \text{Densidad de portadores de carga (electrones) por volumen} \\ N_A \equiv \text{Concentración / Densidad de átomos aceptores} \end{array} \right]$$

→ SIN aproximar

Corriente de arrastre

$$J_{\text{arrastre}} = \sigma \cdot E \rightarrow \left[\begin{array}{l} J_{\text{arrastre}} \equiv \text{Densidad de corriente de arrastre (A/m}^2\text{)} \\ \sigma \equiv \text{Conductividad de un semiconductor intrínseco o extrínseco} \\ E \equiv \text{Campo eléctrico} \end{array} \right]$$

• Semiconductor intrínseco

$$J_{\text{arrastre}} = E \cdot e (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \rightarrow \left[\begin{array}{l} J_{\text{arrastre}} \equiv \text{Densidad de corriente de arrastre} \\ E \equiv \text{Campo eléctrico} \\ e \equiv \text{Carga del electrón} \\ n \equiv \text{Densidad de portadores de carga (electrones) por volumen} \\ \mu_n \equiv \text{Movilidad de carga (electrones)} \\ p \equiv \text{Densidad de portadores de carga (huecos) por volumen} \\ \mu_p \equiv \text{Movilidad de carga (huecos)} \end{array} \right]$$

$$J_{\text{arrastre}} = E \cdot n_i \cdot e (\mu_n + \mu_p) \rightarrow \left[\begin{array}{l} J_{\text{arrastre}} \equiv \text{Densidad de corriente de arrastre} \\ E \equiv \text{Campo eléctrico} \\ n_i \equiv \text{Densidad intrínseca del semiconductor} \\ e \equiv \text{Carga del electrón} \\ \mu_n \equiv \text{Movilidad de carga (electrones)} \\ \mu_p \equiv \text{Movilidad de carga (huecos)} \end{array} \right]$$

• Semiconductor extrínseco

• Tipo n

$$J_{\text{arrastré}} = \sigma_n \cdot E \rightarrow \left[\begin{array}{l} J_{\text{arrastré}} \equiv \text{Densidad de corriente de arrastre} \\ \sigma_n \equiv \text{Conductividad del semiconductor extrínseco dopado tipo n} \\ E \equiv \text{Campo eléctrico} \end{array} \right]$$

• Tipo p

$$J_{\text{arrastré}} = \sigma_p \cdot E \rightarrow \left[\begin{array}{l} J_{\text{arrastré}} \equiv \text{Densidad de corriente de arrastre} \\ \sigma_p \equiv \text{Conductividad del semiconductor extrínseco dopado tipo p} \\ E \equiv \text{Campo eléctrico} \end{array} \right]$$

Corriente de difusión (intrínseco y extrínseco)

$$J_{n,\text{difusión}} = e \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} \rightarrow \left[\begin{array}{l} J_{n,\text{difusión}} \equiv \text{Densidad de corriente de difusión de los electrones (A/m}^2\text{)} \\ e \equiv \text{Carga del electrón} \\ D_n \equiv \text{Difusividad de los electrones (m}^2\text{/s)} \\ \frac{dn}{dx} \equiv \text{Derivada de "la densidad de portadores de carga (electrones) por volumen"} \\ \text{en "la posición"} \end{array} \right]$$

$$J_{p,\text{difusión}} = -e \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx} \rightarrow \left[\begin{array}{l} J_{p,\text{difusión}} \equiv \text{Densidad de corriente de difusión de los huecos (A/m}^2\text{)} \\ e \equiv \text{Carga del electrón} \\ D_p \equiv \text{Difusividad de los huecos (m}^2\text{/s)} \\ \frac{dp}{dx} \equiv \text{Derivada de "la densidad de portadores de carga (huecos) por volumen"} \\ \text{en "la posición"} \end{array} \right]$$

Relación de Einstein

$$V_T = \frac{k}{e} \cdot T = \frac{D_{n/p}}{\mu_{n/p}} \rightarrow \left[\begin{array}{l} V_T \equiv \text{Potencial térmico (V)} \\ k \equiv \text{Constante de Boltzmann} \\ e \equiv \text{Carga del electrón} \\ T \equiv \text{Temperatura} \\ D_{n/p} \equiv \text{Difusividad de los electrones / huecos} \\ \mu_{n/p} \equiv \text{Movilidad de carga (electrones / huecos)} \end{array} \right]$$

$$J = J_n + J_p \rightarrow \begin{cases} J \equiv \text{Densidad de corriente total (A/m}^2\text{)} \\ J_n \equiv \text{Densidad de corriente de los electrones (A/m}^2\text{)} \\ J_p \equiv \text{Densidad de corriente de los huecos (A/m}^2\text{)} \end{cases}$$

$$J_n = J_{n, \text{arrastre}} + J_{n, \text{difusión}} \rightarrow \begin{cases} J_n \equiv \text{Densidad de corriente de los electrones} \\ J_{n, \text{arrastre}} \equiv \text{Densidad de corriente de arrastre de los electrones} \\ J_{n, \text{difusión}} \equiv \text{Densidad de corriente de difusión de los electrones} \end{cases}$$

$$J_p = J_{p, \text{arrastre}} + J_{p, \text{difusión}} \rightarrow \begin{cases} J_p \equiv \text{Densidad de corriente de los huecos} \\ J_{p, \text{arrastre}} \equiv \text{Densidad de corriente de arrastre de los huecos} \\ J_{p, \text{difusión}} \equiv \text{Densidad de corriente de difusión de los huecos} \end{cases}$$

Columna III \rightarrow B (Boro), Al (Aluminio), Ga (Galio), In (Indio), Tl (Talio), Nh (Nihonio) $\begin{matrix} \nearrow \text{Impurezas aceptores (N}_A\text{)} \\ \rightarrow \text{Tipo p} \end{matrix}$

Columna V \rightarrow N (Nitrógeno), P (Fósforo), As (Arsénico), Sb (Antimonio), Bi (Bismuto), Hg (Moscovio) $\begin{matrix} \rightarrow \text{Tipo n} \\ \searrow \text{Impurezas donadoras (N}_D\text{)} \end{matrix}$