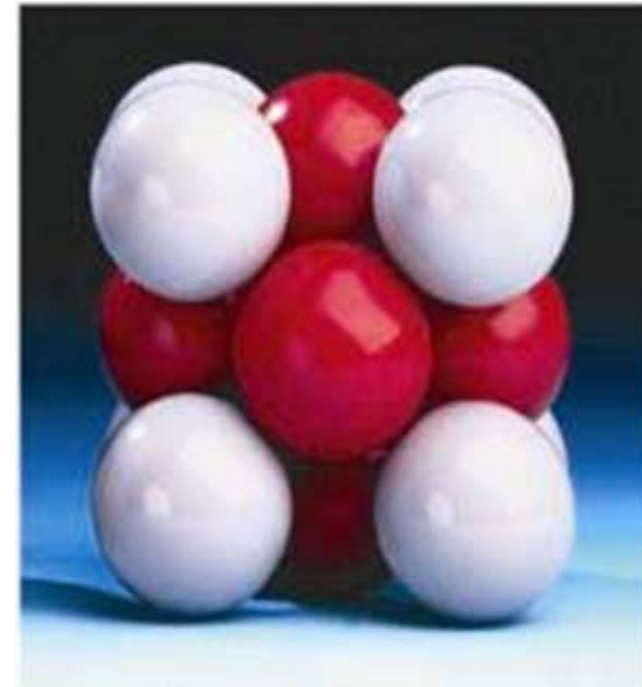
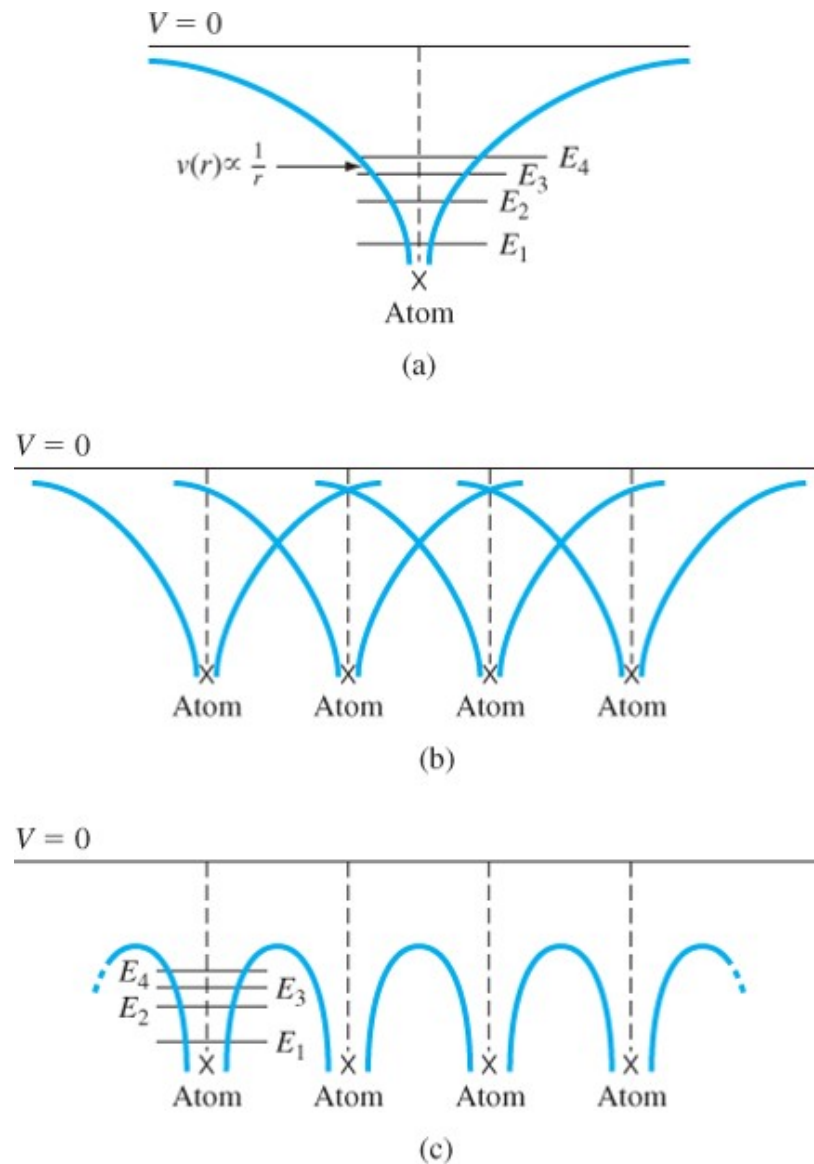


Tema 3: Fenómenos de transporte en semiconductores (electrones y huecos, concentración de portadores, ...). Ecuación de continuidad. Transporte de carga en semiconductores (corrientes difusión y arrastre, procesos de generación, recombinación, inyección).

Lecturas recomendadas:

- <http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-720j-integrated-microelectronic-devices-spring-2007/lecture-notes/> > L3
- **Cap.2 “Electrónica Integrada” Millman-Halkias**

CAMPO CRISTALINO (una dimensión)

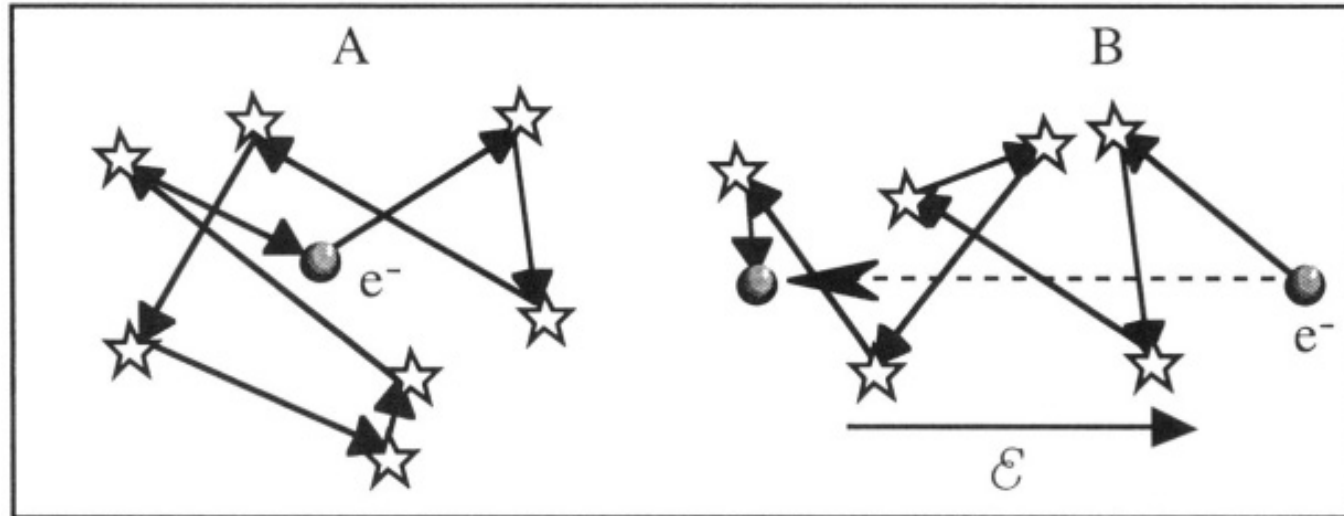


Cúbico centrado en las caras

Masa efectiva: m^*

Figure 3.5 | (a) Potential function of a single isolated atom. (b) Overlapping potential functions of adjacent atoms. (c) Net potential function of a one-dimensional single crystal.

ELECTRONES EN SÓLIDOS



Movimiento browniano: $\frac{1}{2}mv_t^2 = \frac{3}{2}kT$

$$v_t \approx 10^7 \text{ cm/s}$$

Acción del campo eléctrico
(electrón en el vacío):

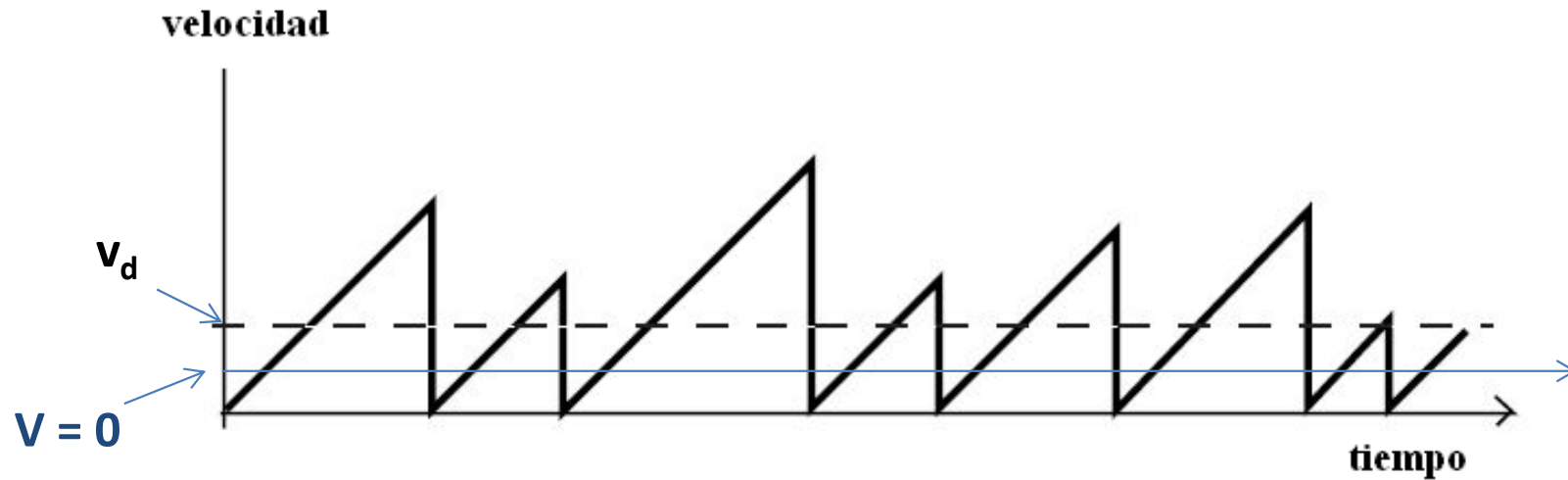
$$ma = -qE$$

Tiempo medio entre colisiones: $10^{-14} \sim 10^{-13} \text{ s}$

Velocidad térmica: $\sim 10^7 \text{ cm/s}$

Recorrido libre medio: $1 \sim 10 \text{ nm}$ ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)

VELOCIDAD DE ARRASTRE



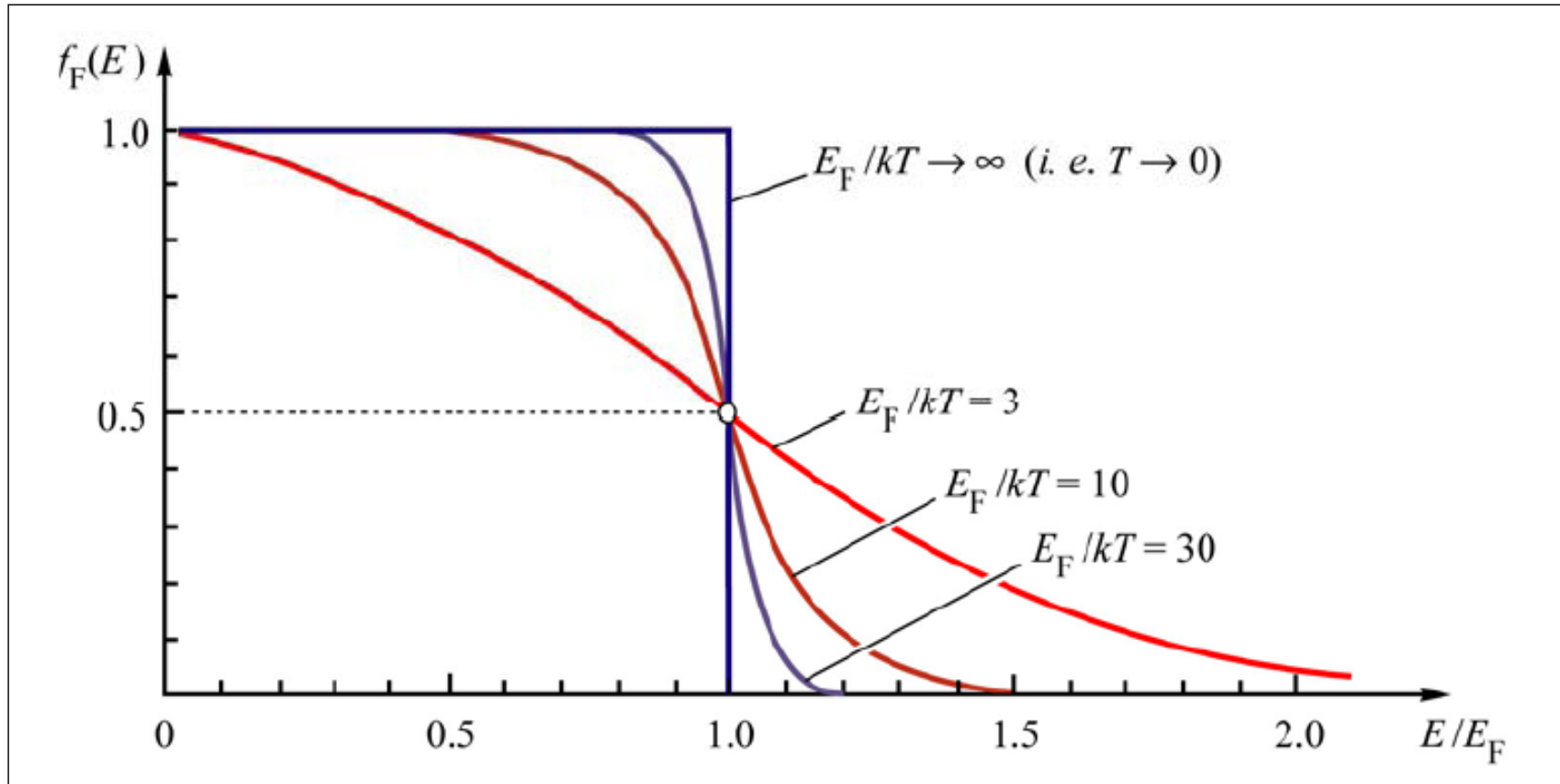
Velocidad media de arrastre: $v_d = -\mu E$

Movilidad: $\mu = q\tau/2m^*$ [unidades: $\text{cm}^2/(\text{Vs})$]

Masa efectiva: m^*

FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE FERMI-DIRAC

$$f(E) = \{1 + \exp[(E - E_F)/(kT)]\}^{-1}$$



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

Maxwell-Boltzmann

DENSIDADES DE ESTADOS

$$g_C = (4\pi/h^3)(2m_n^*)^{3/2}(E-E_C)^{1/2}$$

$$g_V = (4\pi/h^3)(2m_p^*)^{3/2}(E_V-E)^{1/2}$$

- unidades: $\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1}$

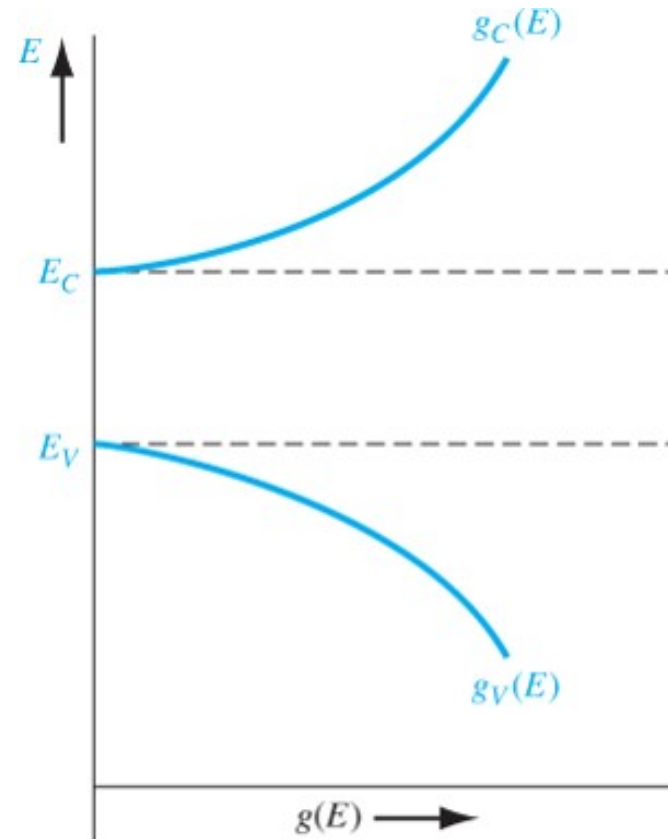
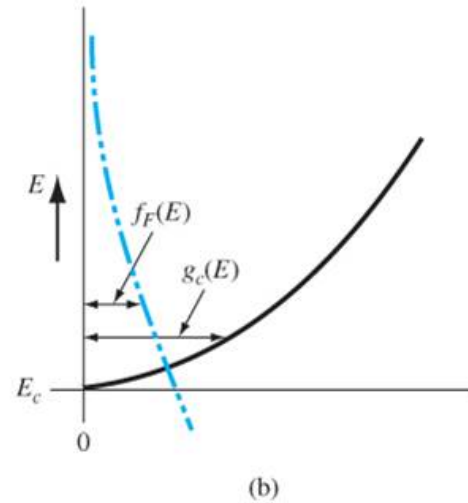
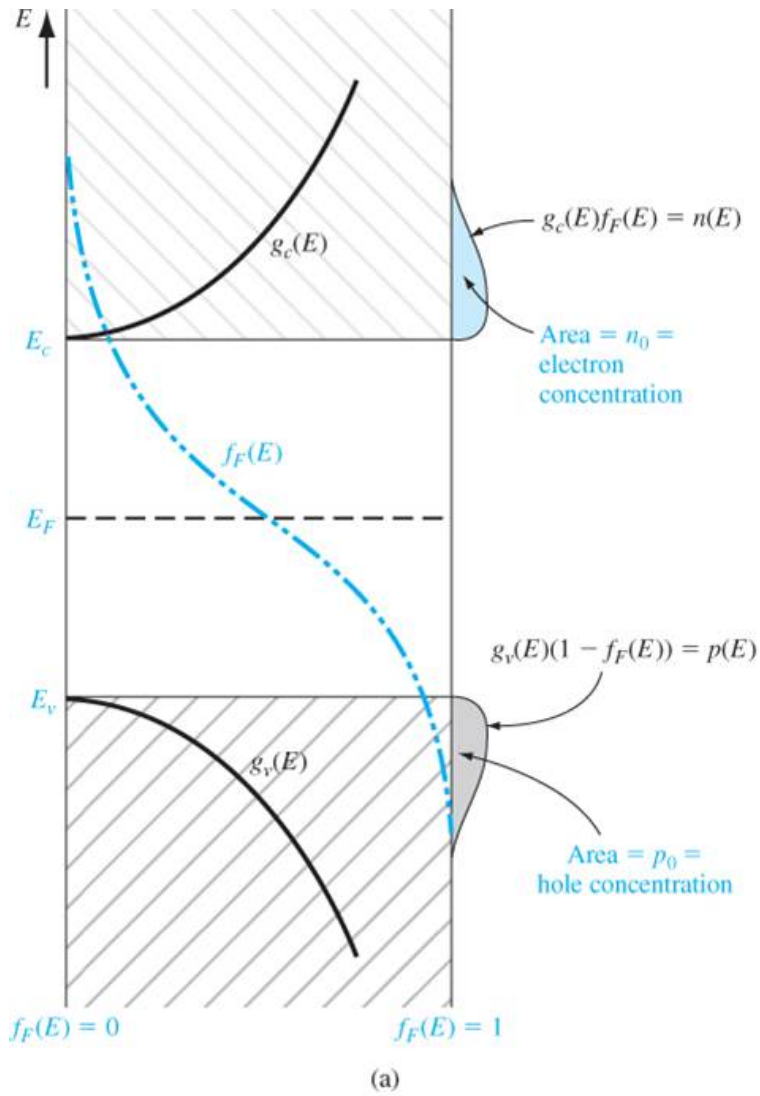


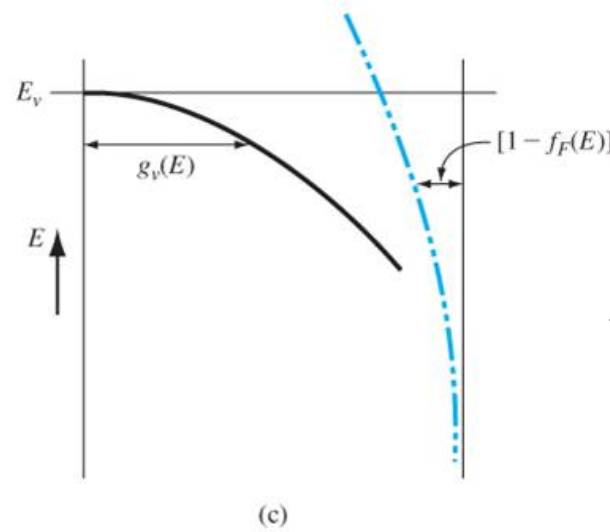
Figure 3.27 | The density of energy states in the conduction band and the density of energy states in the valence band as a function of energy.

DENSIDADES DE ELECTRONES Y HUECOS



$$g_c(\mathbf{E}) \cdot f_F(\mathbf{E}) = n(\mathbf{E})$$

$$(\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1})$$

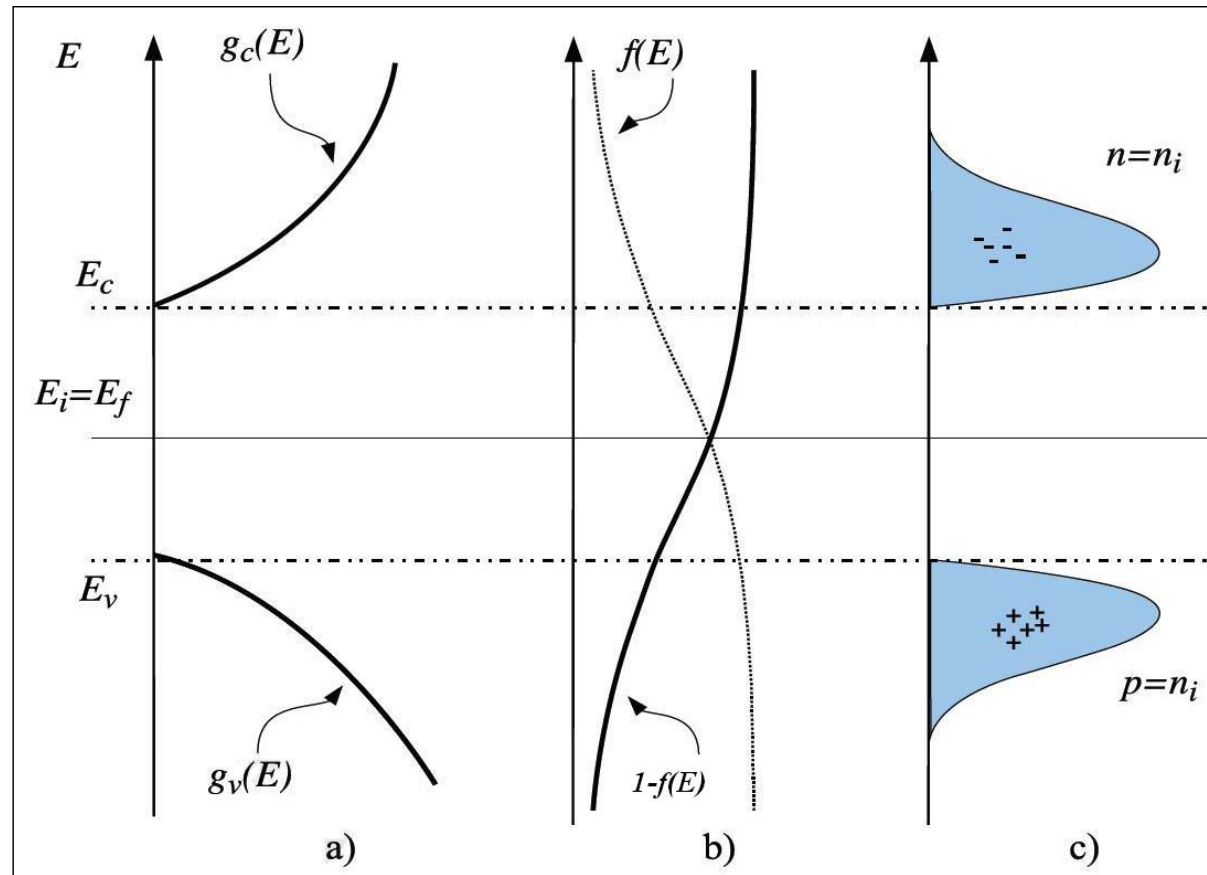


$$g_v(\mathbf{E}) \cdot [1 - f_F(\mathbf{E})] = p(\mathbf{E})$$

$$(\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1})$$

Figure 4.1 | (a) Density of states functions, Fermi–Dirac probability function, and areas representing electron and hole concentrations for the case when E_F is near the midgap energy; (b) expanded view near the conduction-band energy; and (c) expanded view near the valence-band energy.

Nivel de Fermi intrínseco



$$n(E) = f(E) g_C(E)$$

$$p(E) = [1-f(E)] g_V(E)$$

- Energía de Fermi, E_f → probabilidad de ocupación del nivel es $1/2$

Concentraciones de portadores en el equilibrio

$$n_0 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right); N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$$

$$p_0 = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right); N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$$

$$n_i = n_0 = p_0 = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right)$$

$$E_{Fi} = E_V + \frac{E_G}{2} + \frac{1}{2} kT \cdot \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) \approx E_V + \frac{E_G}{2}$$

SEMICONDUCTOR TIPO N

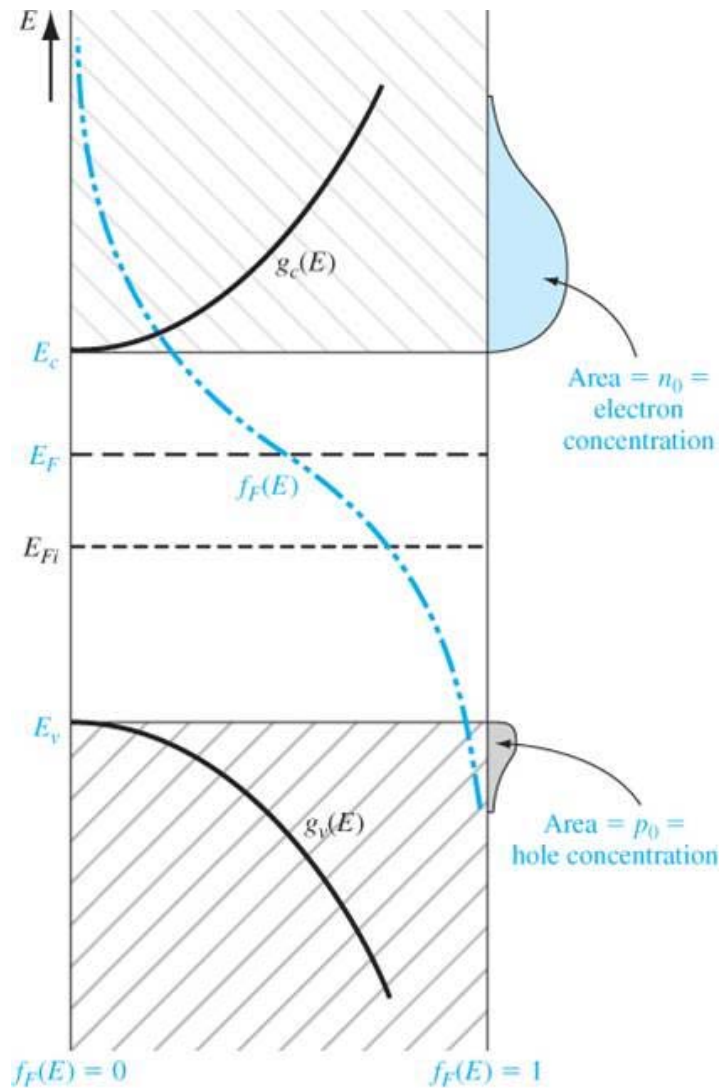


Figure 4.8 | Density of states functions, Fermi–Dirac probability function, and areas representing electron and hole concentrations for the case when E_F is above the intrinsic Fermi energy.

$$n_0 = p_0 + N_D$$

$$n_0 = \frac{1}{2} \left(N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2} \right)$$

$$N_D \gg n_i ; n_0 = p_0 + N_D \approx N_D$$

$$E_F = E_C - kT \cdot \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right)$$

SEMICONDUCTOR TIPO P

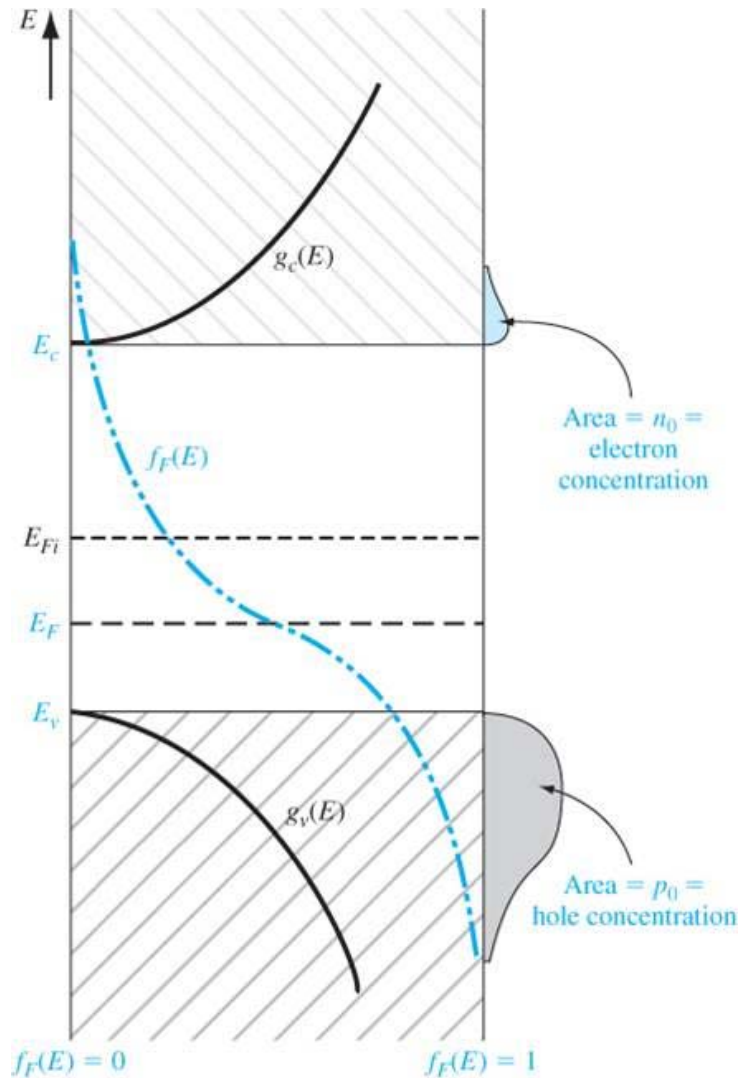


Figure 4.9 | Density of states functions, Fermi-Dirac probability function, and areas representing electron and hole concentrations for the case when E_F is below the intrinsic Fermi energy.

$$n_0 + N_A = p_0$$

$$p_0 = \frac{1}{2} \left(N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2} \right)$$

$$N_A \gg n_i ; p_0 = n_0 + N_A \approx N_A$$

$$E_F = E_V + kT \cdot \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right)$$

Concentración de portadores

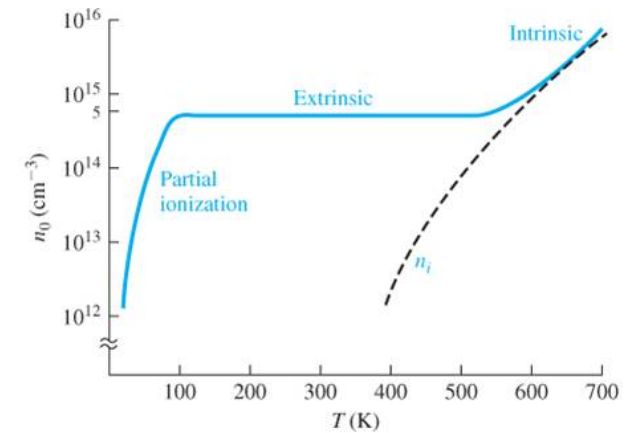
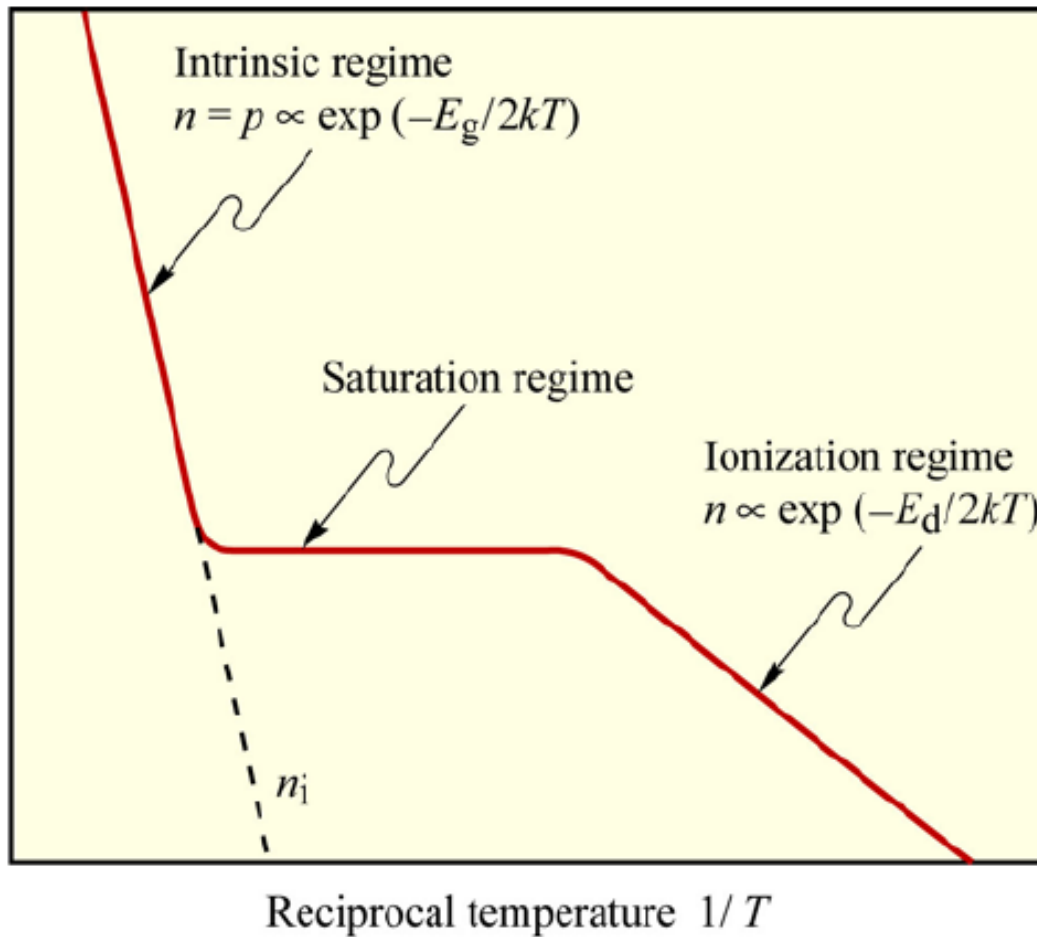


Figure 4.16 | Electron concentration versus temperature showing the three regions: partial ionization, extrinsic, and intrinsic.

INTRÍNSECO:

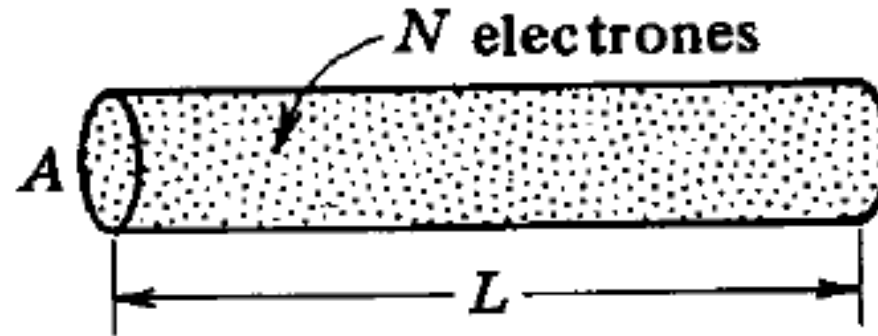
$$n_0 = p_0 = n_i = (N_C N_V)^{1/2} \exp(-E_G/2kT)$$

EXTRÍNSECO:

TIPO N: $n_0 \approx N_D$

TIPO P: $p_0 \approx N_A$

ELECTRONES EN METALES



- Velocidad: $v = L/T$
- Número de electrones que atraviesan un área A por unidad de tiempo: N/T
- Intensidad: $I = -qN/T = -qNv/L$
- Concentración de electrones: $n = N/(LA)$
- Densidad de corriente: $J = -qnv$

ELECTRONES Y HUECOS

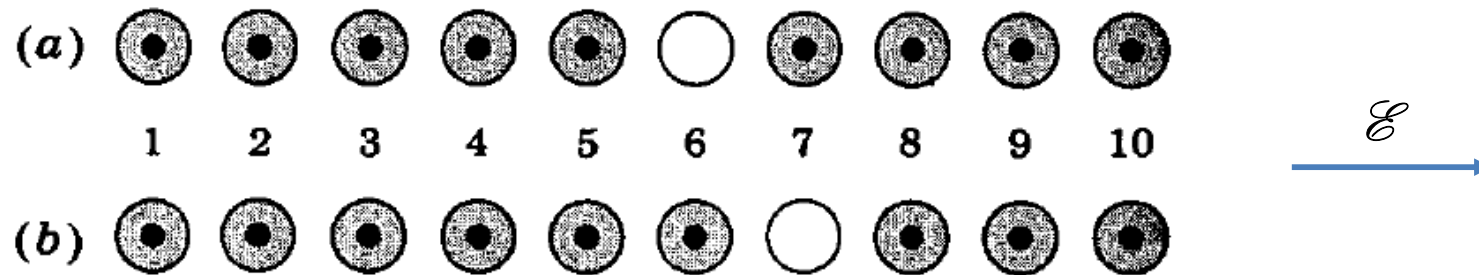
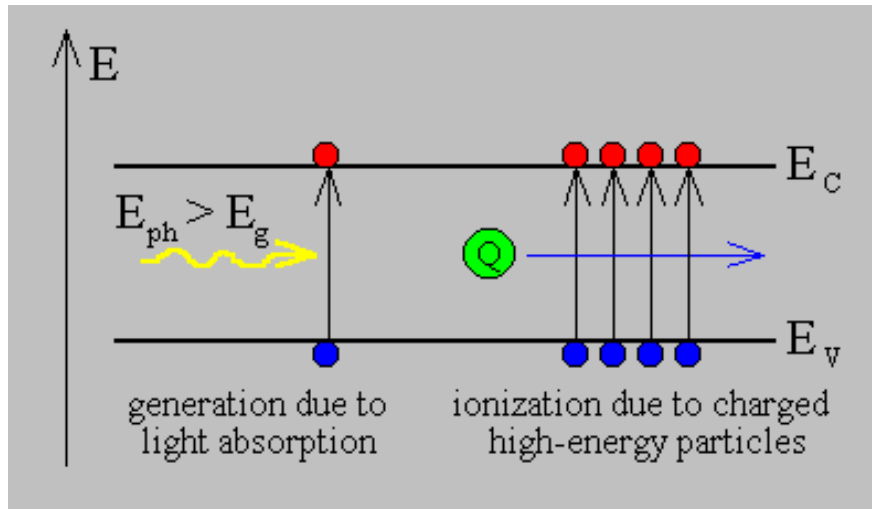


Fig. 2-5. Mecanismo por el que un hueco contribuye a la conductividad.

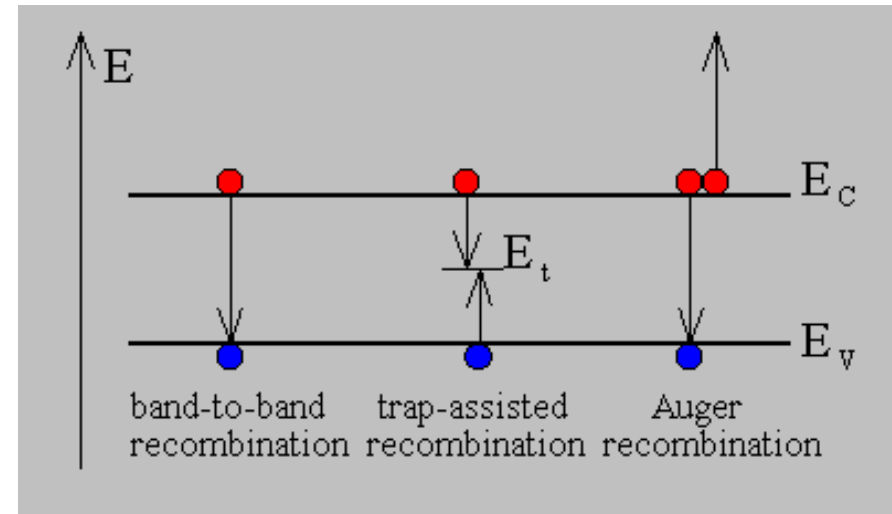
- El estado vacío se comporta como una carga positiva: ¡HUECO!
- Contribución de los huecos a la corriente: $v = \mu_p E$
- Densidad de corriente: $J = -qn(-\mu_n E) + q\mu_p pE = \sigma E$
- Conductividad: $\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p)$

GENERACIÓN-RECOMBINACIÓN EN SEMICONDUCTORES

generación

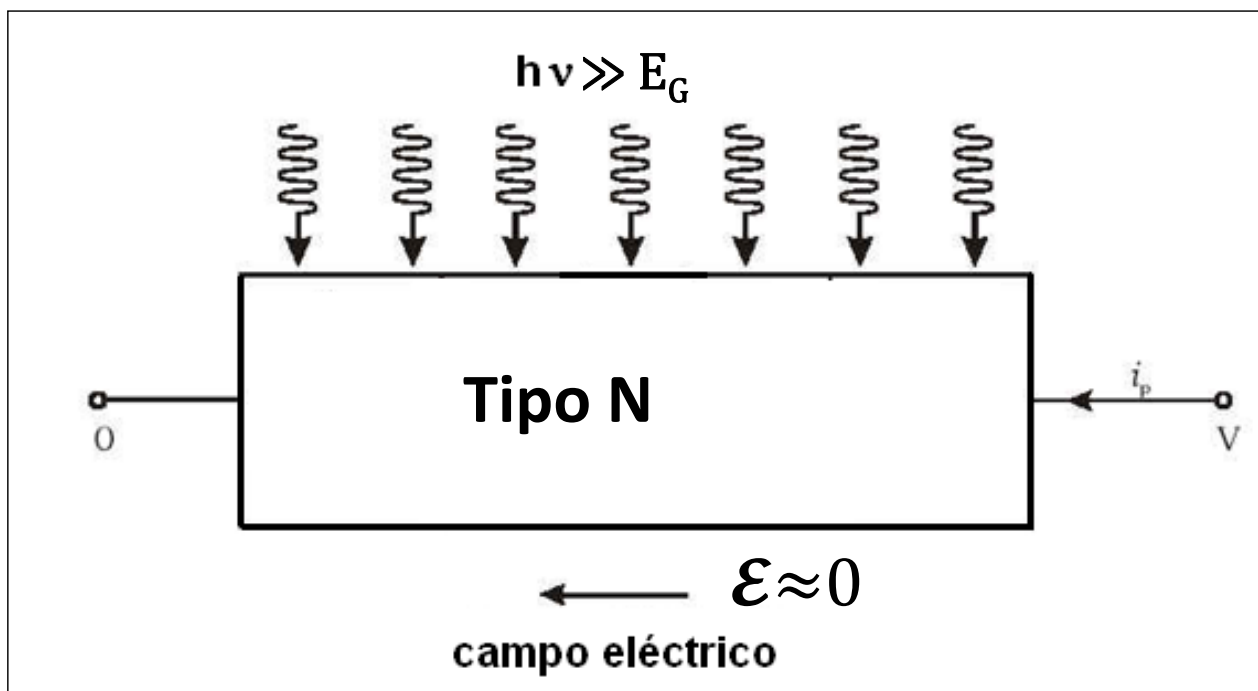


recombinación



- **Vidas medias:** - electrones, τ_n
- huecos, τ_p
- **Ritmos de recombinación:** $r_p = p/\tau_p$; $r_n = n/\tau_n$

COMPORTAMIENTO TRANSITORIO



- Semiconductor homogéneo tipo N: $n_0 \gg p_0$
- Iluminación $h\nu \gg E_G$
- $\mathcal{E} \approx 0$
- $J=0$

- Exceso de portadores:
 $p'(t) = p(t) - p_0$

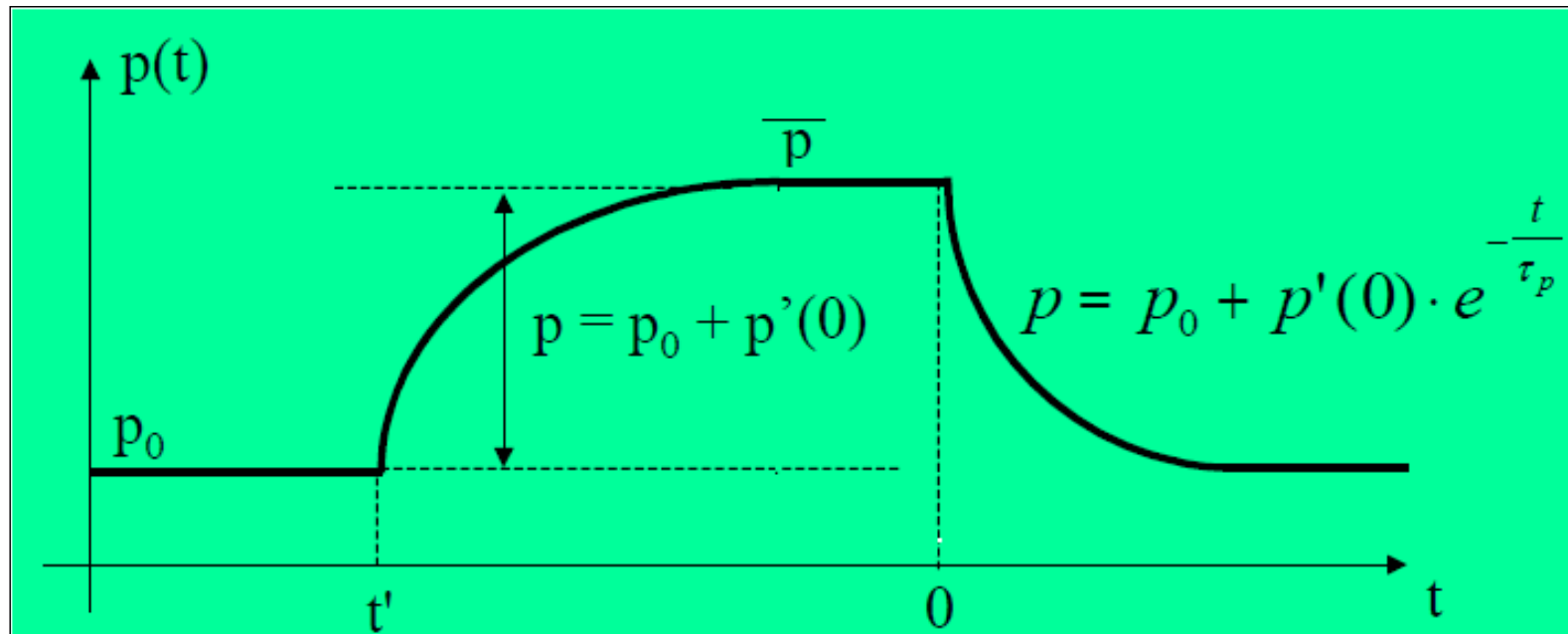
- Equilibrio térmico: $g = p_0/\tau_p$
- Baja inyección: $p - p_0 = n - n_0 \ll n_0$
- Variación temporal del exceso de portadores:

$$\frac{dp}{dt} = g - \frac{p}{\tau_p} = \frac{p_0 - p}{\tau_p} = -\frac{p'}{\tau_p}$$

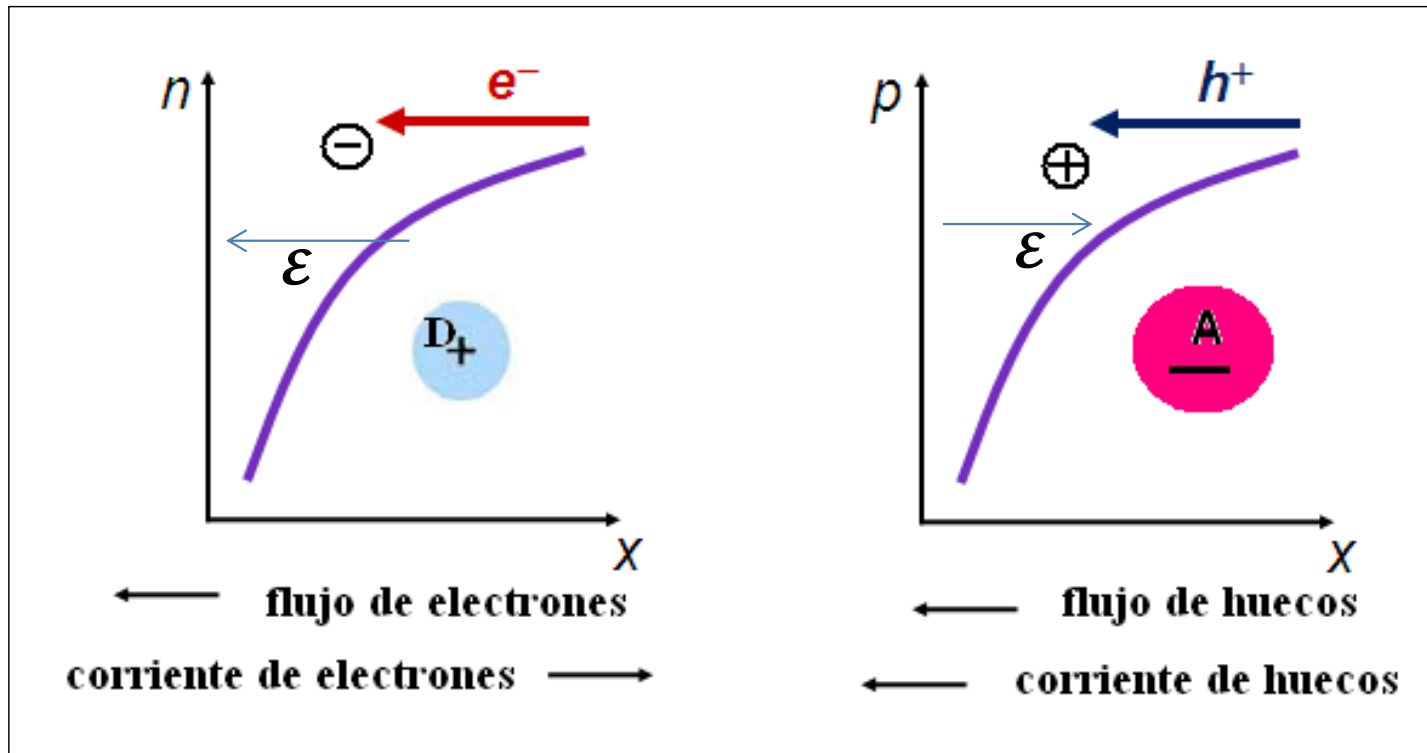
Recombinación de portadores minoritarios

- Solución: $p'(t) = p'(0) \cdot e^{-t/\tau_p}$

$$p(t) = p_0 + p'(0) \cdot e^{-t/\tau_p}$$



Difusión



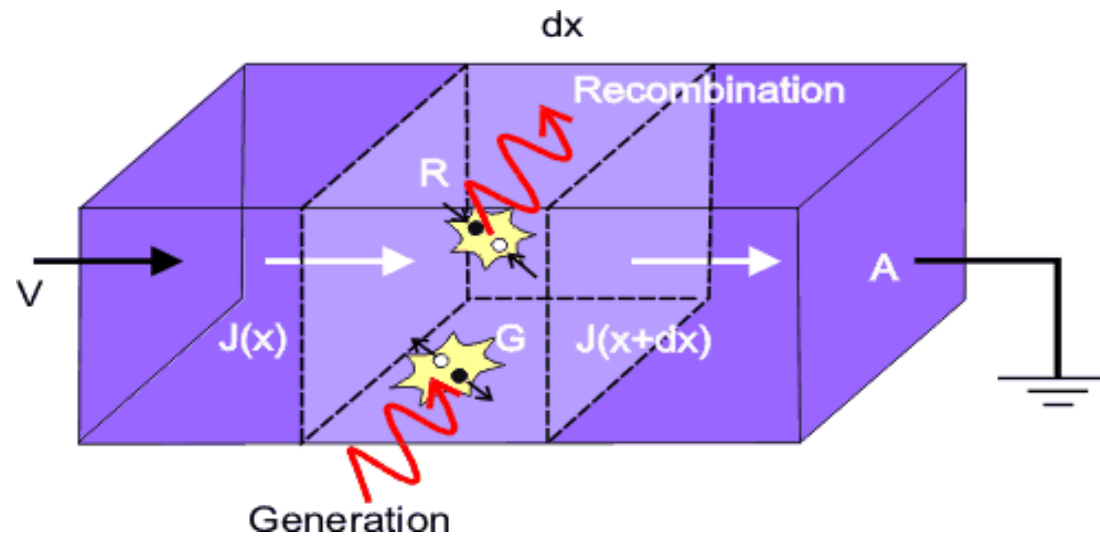
$$J_n = -q \left[-D_n \left(\frac{dn}{dx} \right) \right]$$

$$J_p = -q D_p \left(\frac{dp}{dx} \right)$$

D_n y D_p (cm^2/s), coeficientes de difusión

Relación de Einstein: $(D_n/\mu_n) = (D_p/\mu_p) = kT/q$

Ecuación de continuidad



- Disminución (aumento) de la concentración de huecos por segundo debido a la divergencia de I_p :

$$\frac{1}{qA} \frac{dI_p}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx}$$

- Aumento (disminución) debido a la generación y recombinación:

$$\frac{p_0 - p}{\tau_p}$$

- Variación total con el tiempo:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{p_0 - p}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x}$$

INYECCIÓN DE PORTADORES MINORITARIOS

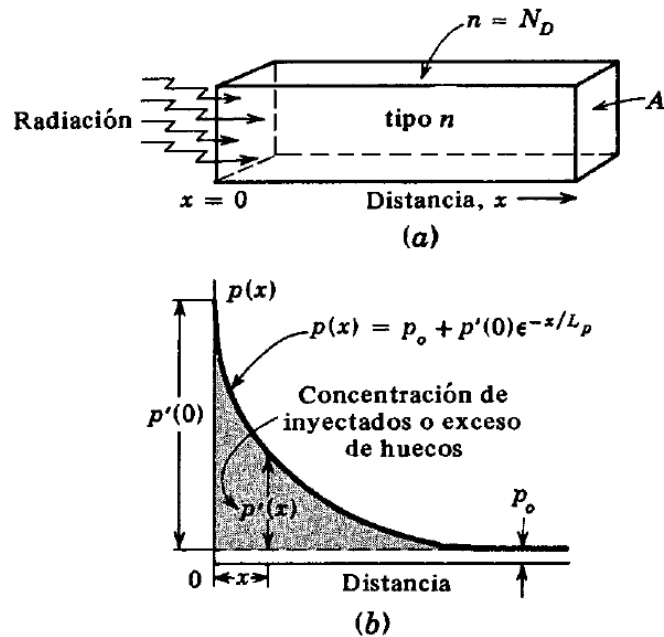


Fig. 2-16. (a) La luz incide sobre el extremo de una barra larga de semiconductor. Esta excitación origina pares de electrón-huecos que se inyectan en $x = 0$. (b) La concentración de huecos (minoritarios) $p(x)$ en la barra en función de la distancia x contada a partir del extremo de la barra. La concentración inyectada es $p'(x) = p(x) - p_0$. La radiación inyecta $p'(0)$ portadores/m³ en la barra a $x = 0$. (No se dibuja a escala, puesto que $p'(0) \gg p_0$.)

Baja inyección: $p = p' + p_0 \ll n_0$

Campo eléctrico despreciable

Estado estacionario $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{p_0 - p}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x}$$

Corriente de difusión de huecos:

$$J_p = -qD_p \left(\frac{dp}{dx} \right)$$

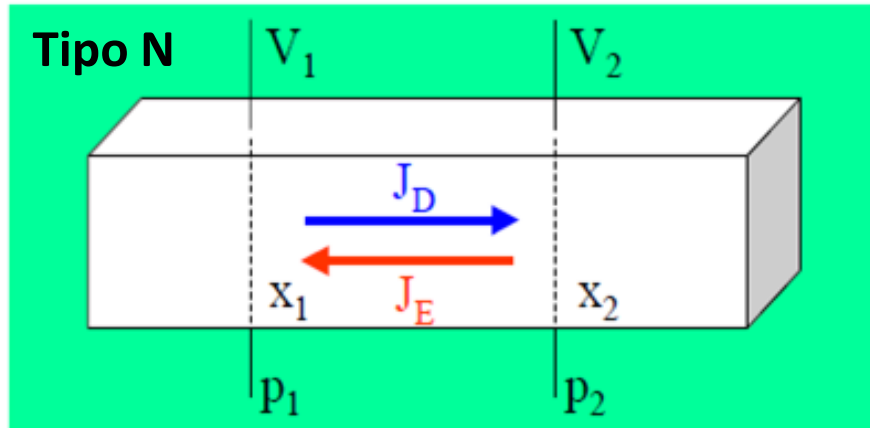
$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{p - p_0}{D_p \tau_p}$$



$$p(x) = p_0 + p'(0)e^{-x/L_p} ; L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

- Calcular la corriente de difusión

POTENCIAL EN UN SEMICONDUCTOR INHOMOGÉNEO



- Estado estacionario
- Sin inyección de portadores
- Tensión aplicada nula

- Corriente de huecos nula:

$$J_t \approx J_p = 0 = q\mu_p p \mathcal{E} - qD_p \frac{dp}{dx} \quad \Rightarrow$$

→ Campo eléctrico inducido:

$$\mathcal{E} = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} = \frac{kT}{q} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \quad \Rightarrow$$

- Tensión equivalente a la temperatura:

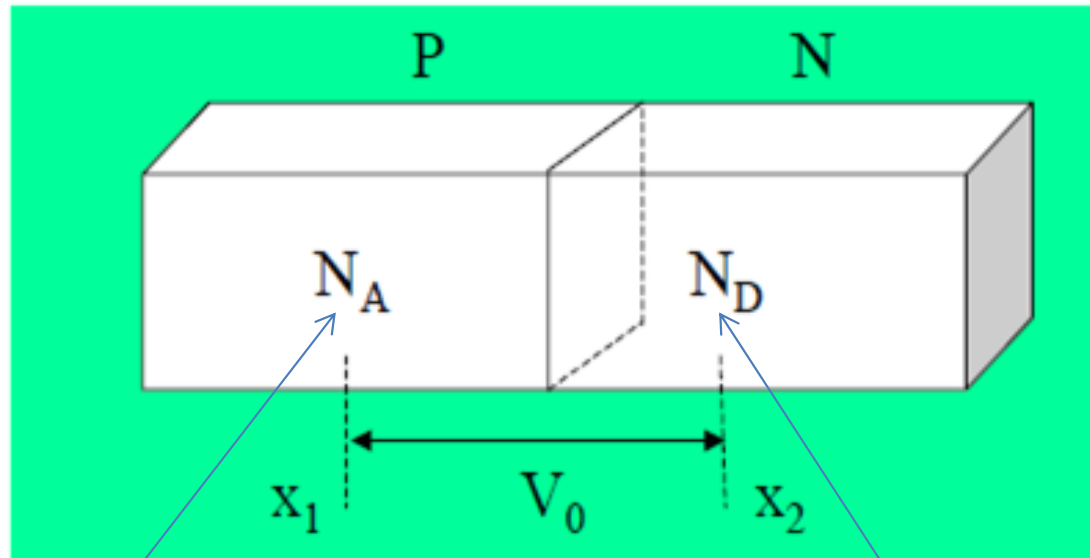
$$V_T = \frac{kT}{q}$$

$$\Rightarrow \frac{dV}{dx} = -\frac{V_T}{p} \frac{dp}{dx} \quad \Rightarrow \quad V_{21} = V_2 - V_1 = V_T \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) \quad \Rightarrow \quad p_1 = p_2 e^{V_{21}/V_T}$$

- Análogamente para un semiconductor tipo P:

$$n_1 = n_2 e^{-V_{21}/V_T}$$

Unión P-N



$$p_1 = p_{p0} = N_A$$

$$p_2 = p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

- Potencial de contacto (tensión en circuito abierto):

$$V_{21} = V_0 = V_T \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = V_T \cdot \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$