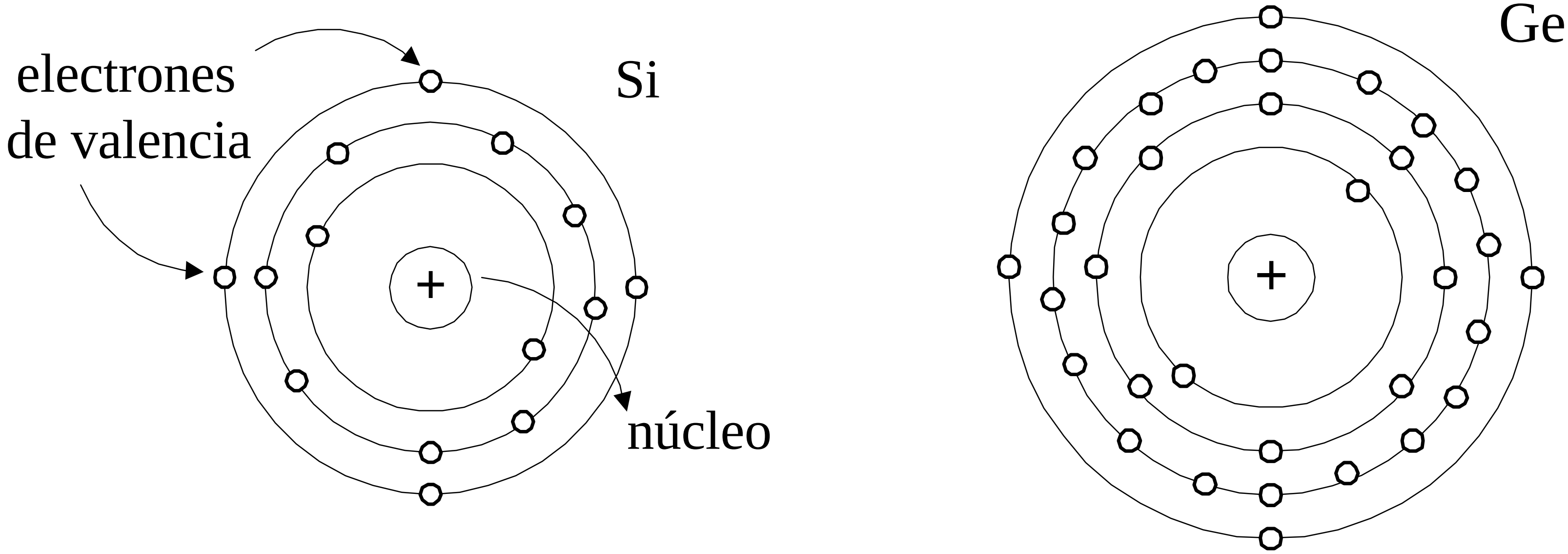
Semiconductores

Algunas de las figuras de esta presentación fueron tomadas de las páginas de internet de los autores del texto:

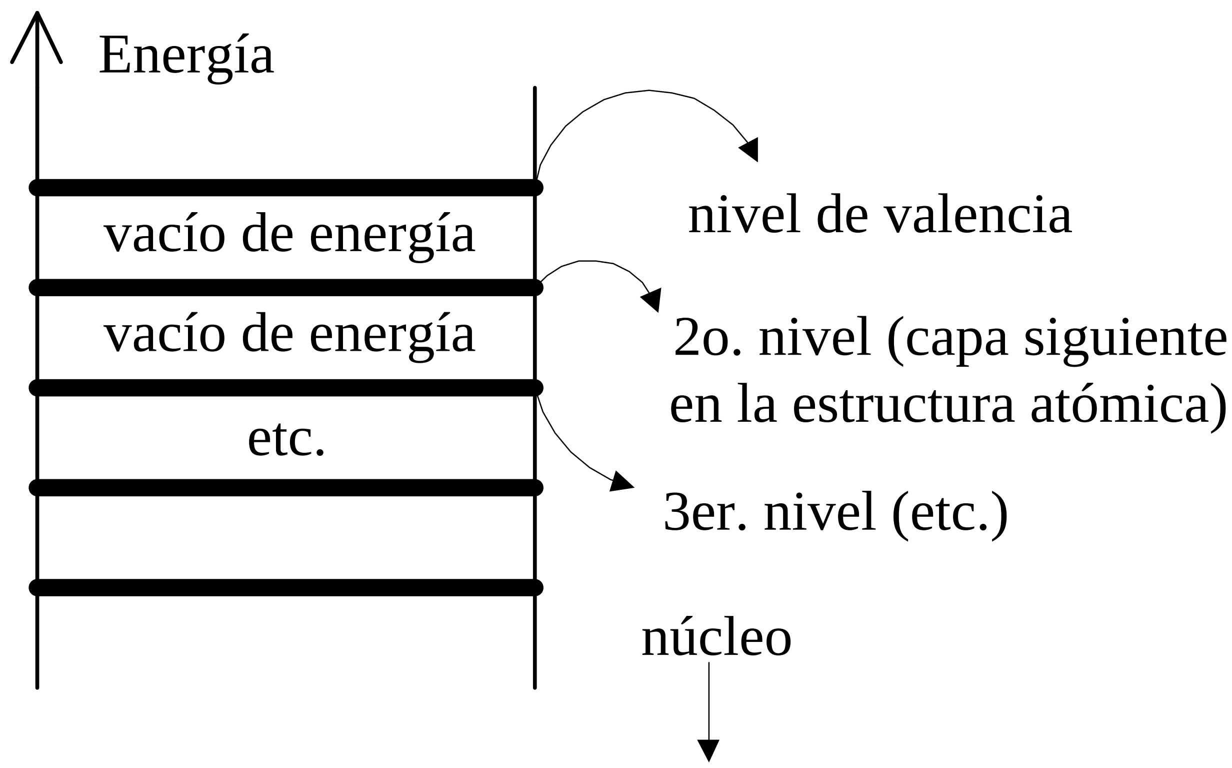
A.R. Hambley, *Electronics: A Top-Down Approach to Computer-Aided Circuit Design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2000.

Dr. J.E. Rayas Sánchez

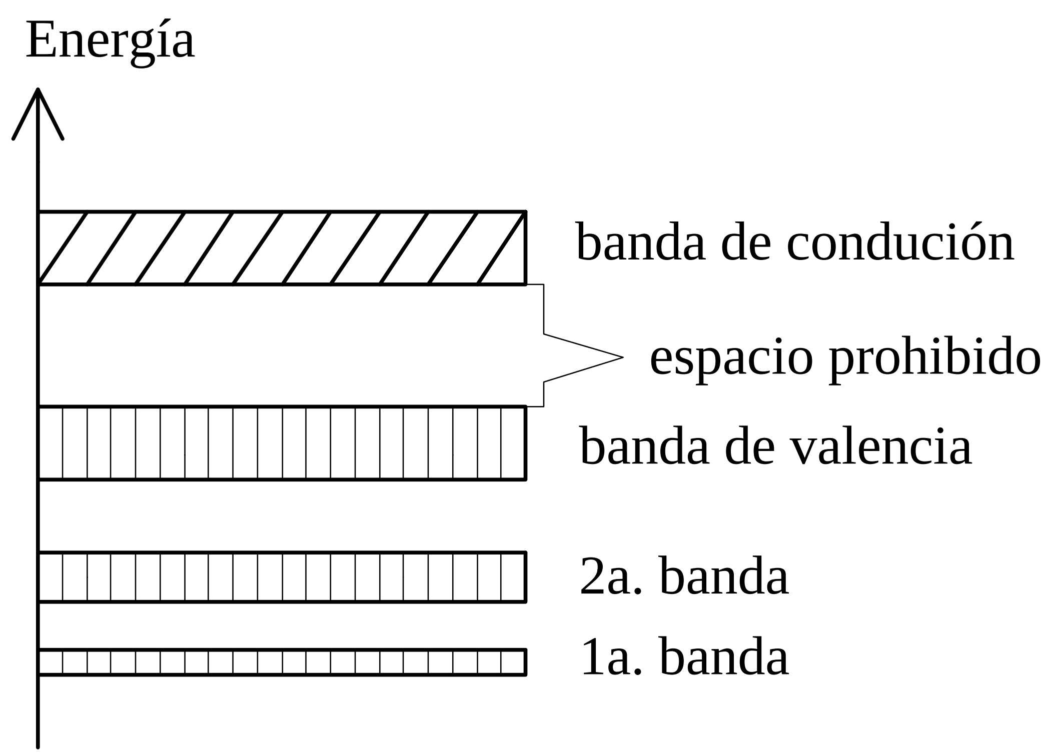
Átomos Semiconductores Aislados



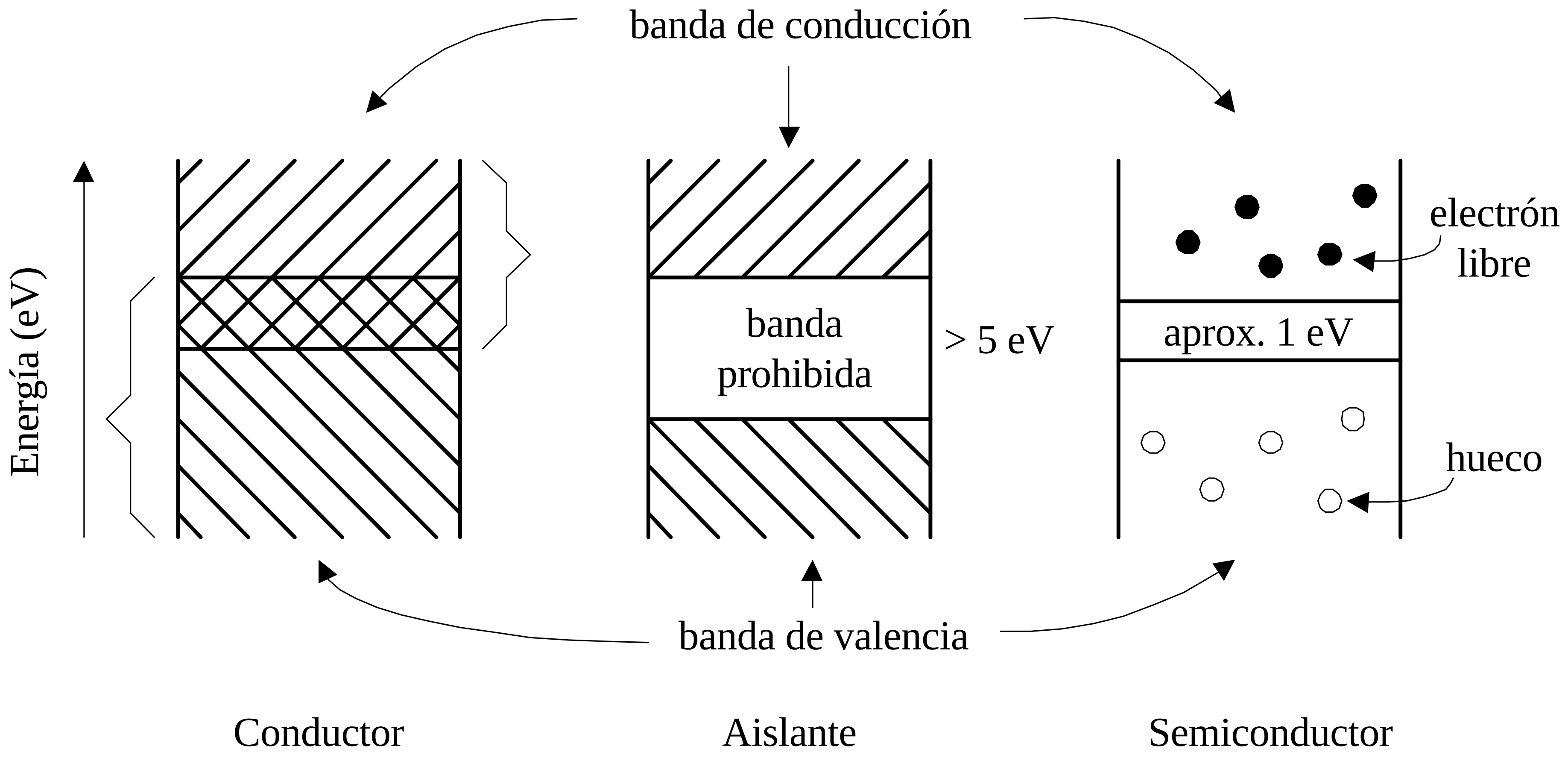
Niveles de Energía en un Átomo Aislado



Bandas de Energía



Conductores, Semiconductores y Aislantes



Hueco de energía a 0 K para el Si = 1.21 eV, para el Ge = 0.785 eV

Conducción en Metales

$\boldsymbol{E}$ Campo Eléctrico (V/m)

$\boldsymbol{J}$ Densidad de Corriente Eléctrica (A/m^2)

$\boldsymbol{\sigma}$ Conductividad (Ω^{-1}/m)

$$\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E}$$

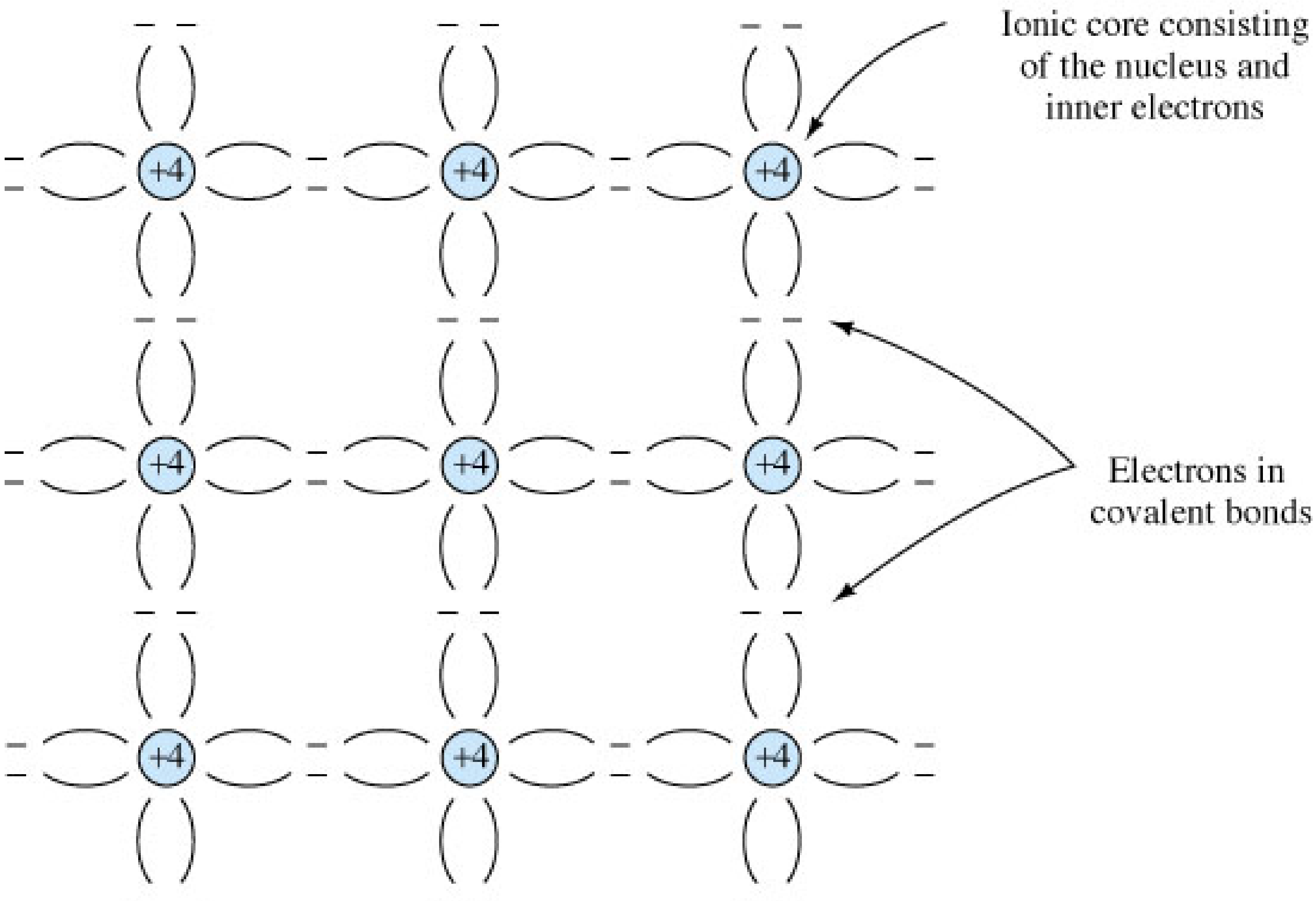
$$\sigma = nq\mu$$

n Concentración de electrones libres (m^{-3})

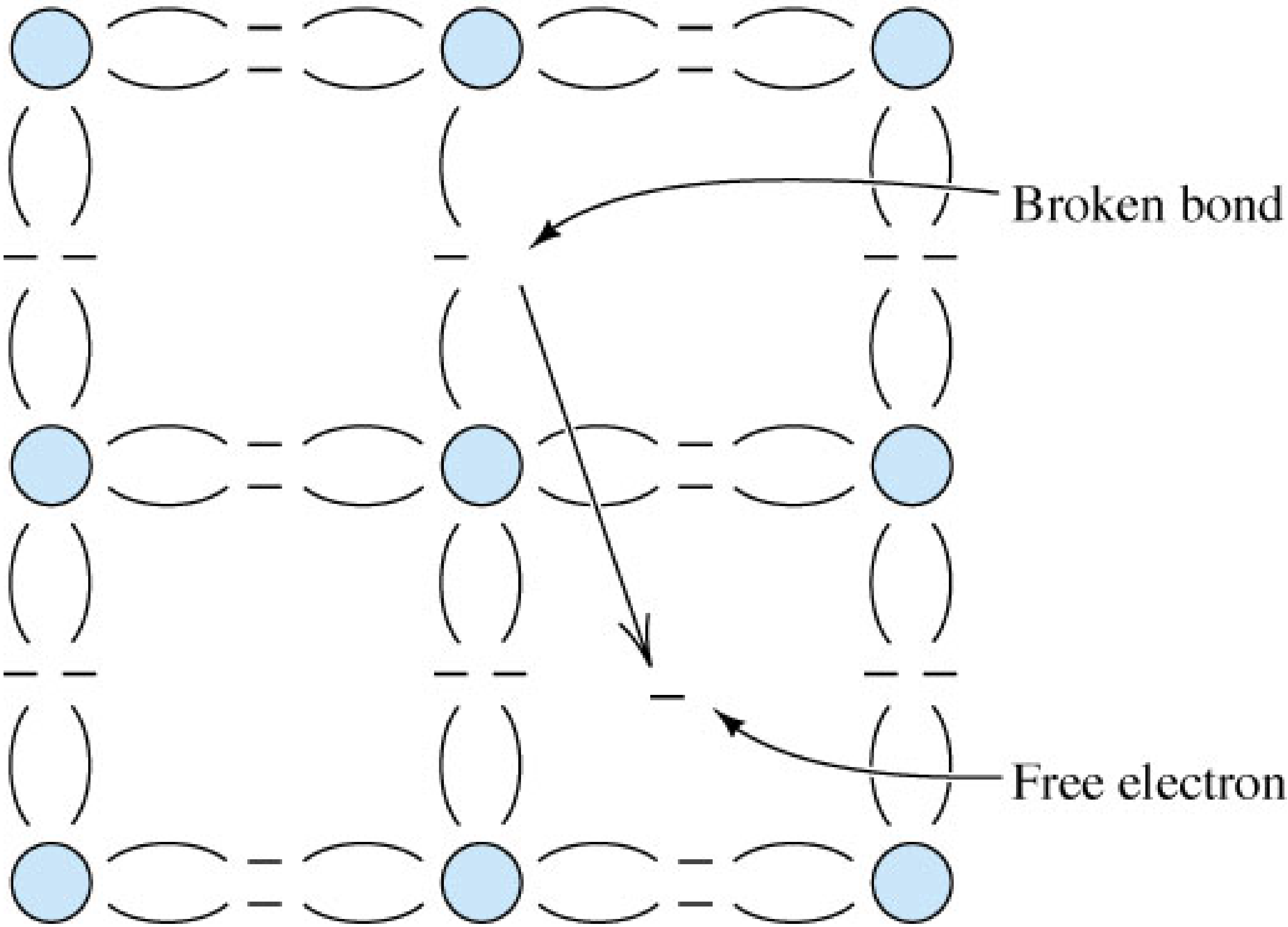
μ Movilidad de los electrones (m^2/Vs)

q Carga del electrón (1.6×10^{-19} C)

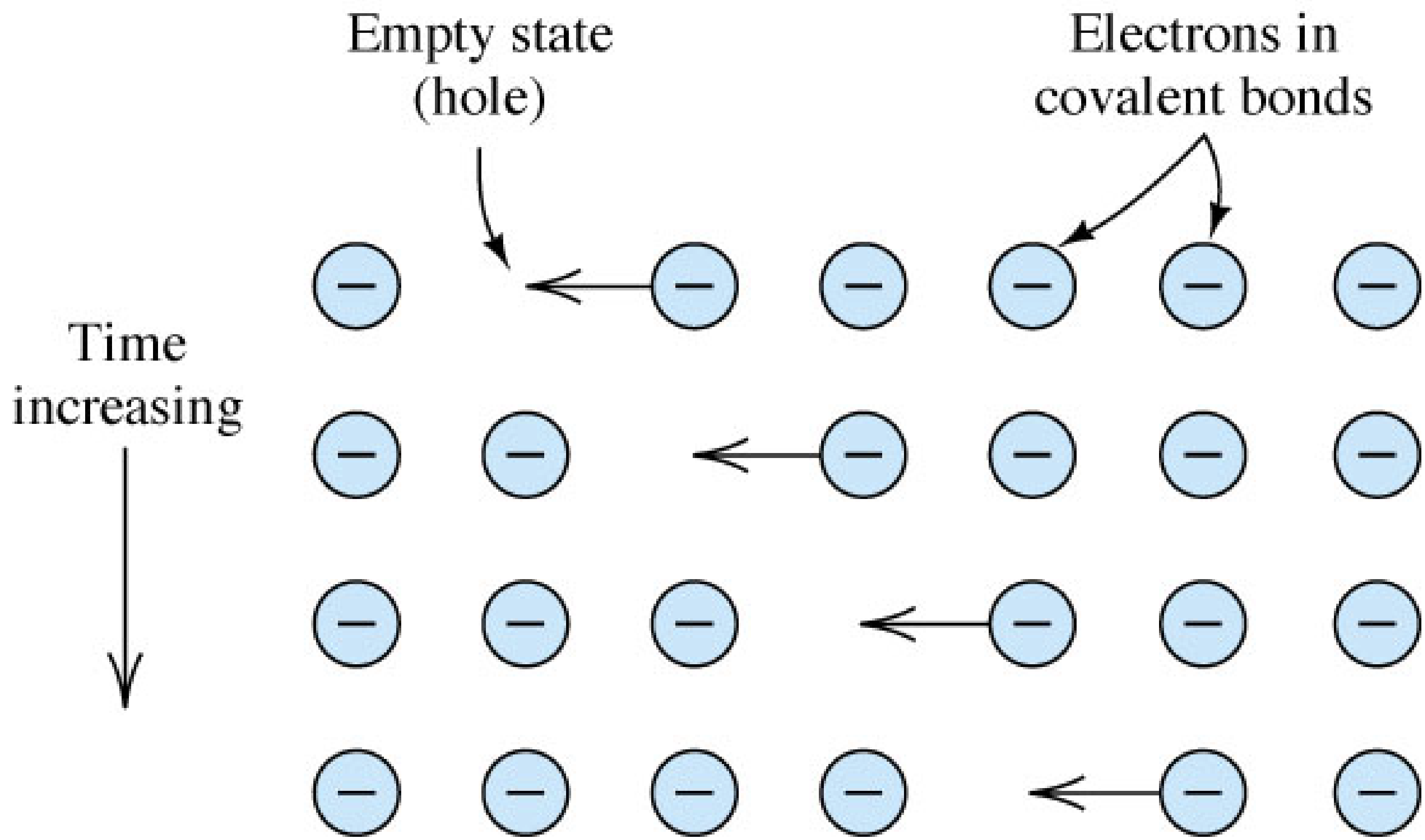
Silicio Intrínseco a 0 Kelvins



Silicio Intrínseco a $T > 0$ Kelvins



Corriente de Huecos en un Semiconductor



Corriente de Arrastre en un Semiconductor

$$\boldsymbol{J}_{COND} = \sigma \boldsymbol{E}$$

$$\boldsymbol{J}_{COND} = (\sigma_n + \sigma_p)\boldsymbol{E}$$

$$\boldsymbol{J}_{COND} = q(n\mu_n + p\mu_p)\boldsymbol{E}$$

n Concentración de electrones libres (m^{-3})

p Concentración de huecos (m^{-3})

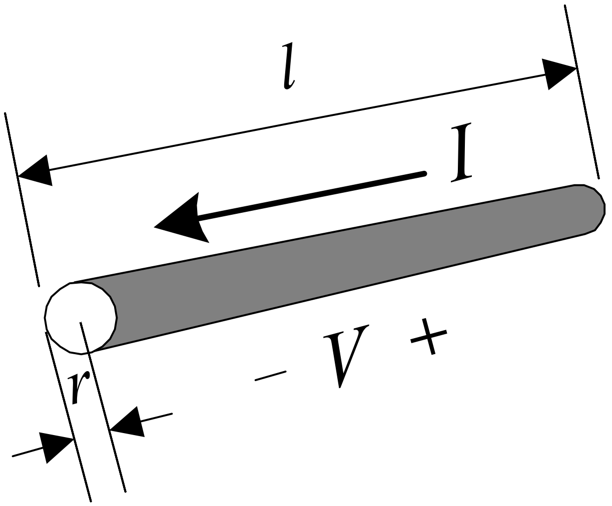
μ_n Movilidad de los electrones (m^2/Vs)

μ_p Movilidad de los huecos (m^2/Vs)

Para un semiconductor puro, $n = p = n_i$ (concentración intrínseca de portadores libres)

$$\boldsymbol{J} = qn_i(\mu_n + \mu_p)\boldsymbol{E}$$

Ejemplo



r = 300 μm, l = 5 mm, calcular V para una I = 10 μA, si el material es

a) Aluminio ($\sigma = 3.816\times10^{7}\ \Omega^{-1}$/m)

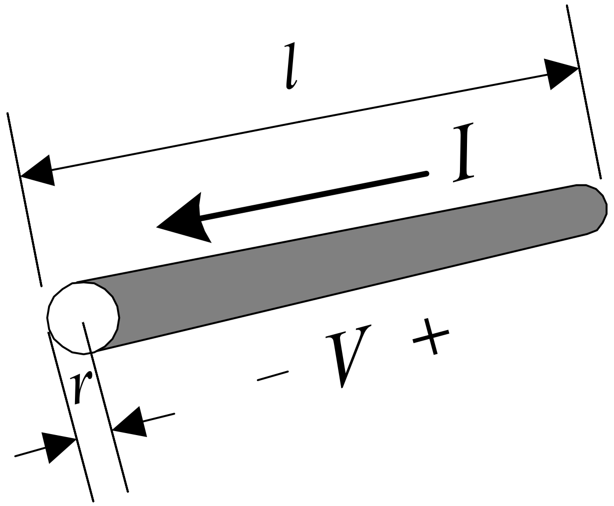
b) Silicio ($n_i = 1.5\times10^{10}$ /cm^3, μ_n = 1,300 cm^2/Vs, μ_p = 500 cm^2/Vs)

$$J = \frac{I}{A} = \frac{10\mu\text{A}}{\pi(300\mu\text{m}^2)} = 3.54\text{mA}/\text{cm}^2$$

a) $E = J/\sigma = 0.93\mu\text{V/m},$

$$V = El = (0.93\mu\text{V/m})(5\times10^{-3}\text{m}) = 4.63\text{nV}$$

Ejemplo (cont.)



r = 300 µm, l = 5 mm, calcular V para una I = 10 µA, si el material es

a) Aluminio ($\sigma = 3.816\times10^{7}\ \Omega^{-1}$/m)

b) Silicio ($n_i = 1.5\times10^{10}$ /cm^3, μ_n = 1,300 cm^2/Vs, μ_p = 500 cm^2/Vs)

$$J = \frac{I}{A} = \frac{10\mu\text{A}}{\pi(300\mu\text{m}^2)} = 3.54\text{mA}/\text{cm}^2$$

b) $$E = \frac{J}{qn_i(\mu_n + \mu_p)} = \frac{3.54\text{mA/cm}^2}{(1.6\times10^{-19}\text{C})(1.5\times10^{10}/\text{cm}^3)(1800\text{cm}^2/\text{Vs})}$$

$$E = 819.4\text{V}/\text{cm}$$

$$V = El = (819.4\text{V/cm})(5\text{mm}) = 409.7\text{V}$$

Contaminación (Doping)

- Es el proceso de agregar impurezas a un semiconductor intrínseco
- Semiconductor contaminado = semiconductor extrínseco
- Impurezas donadoras

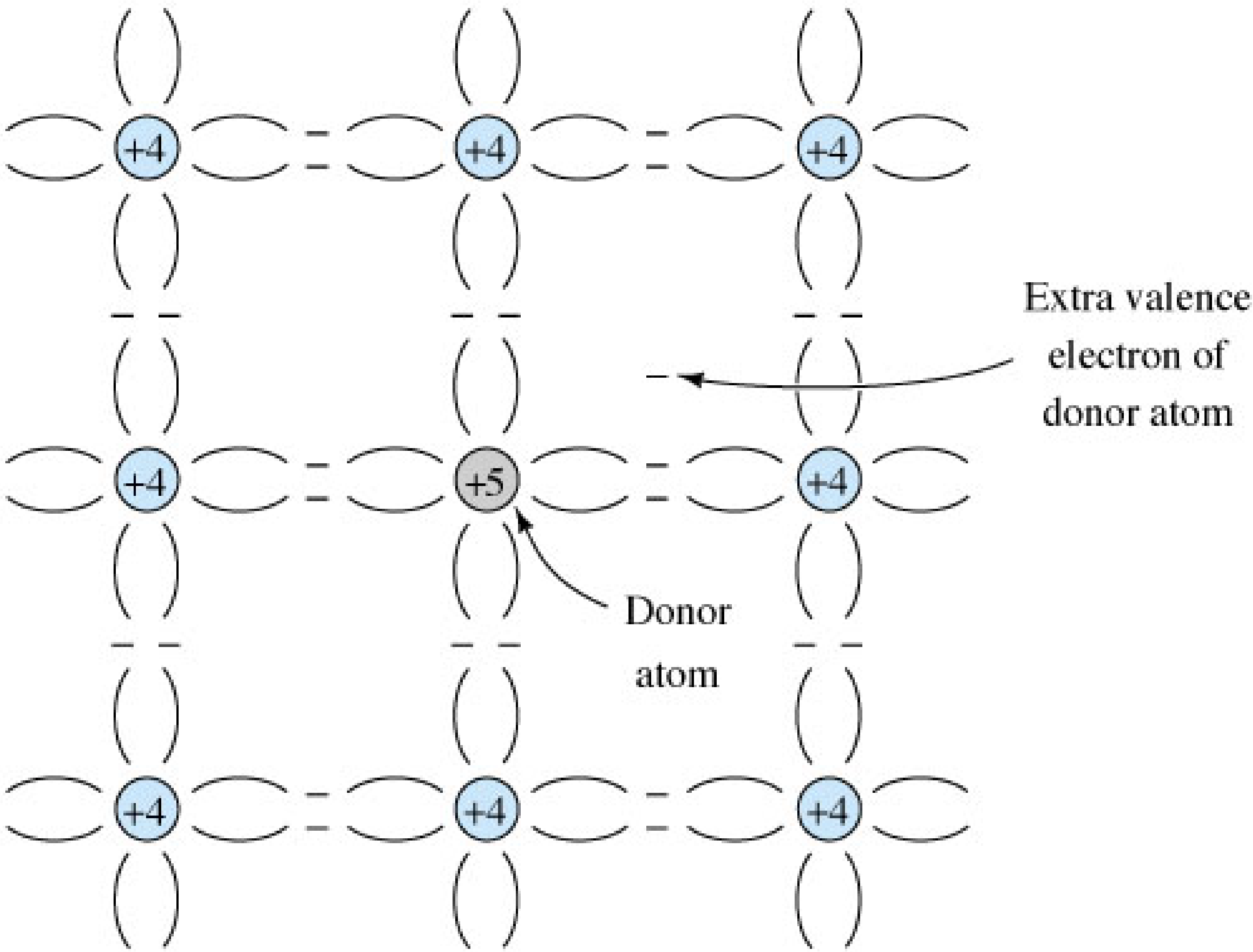
  átomos pentavalentes (Sb, P, As)

  semiconductor tipo n
- Impurezas aceptoras

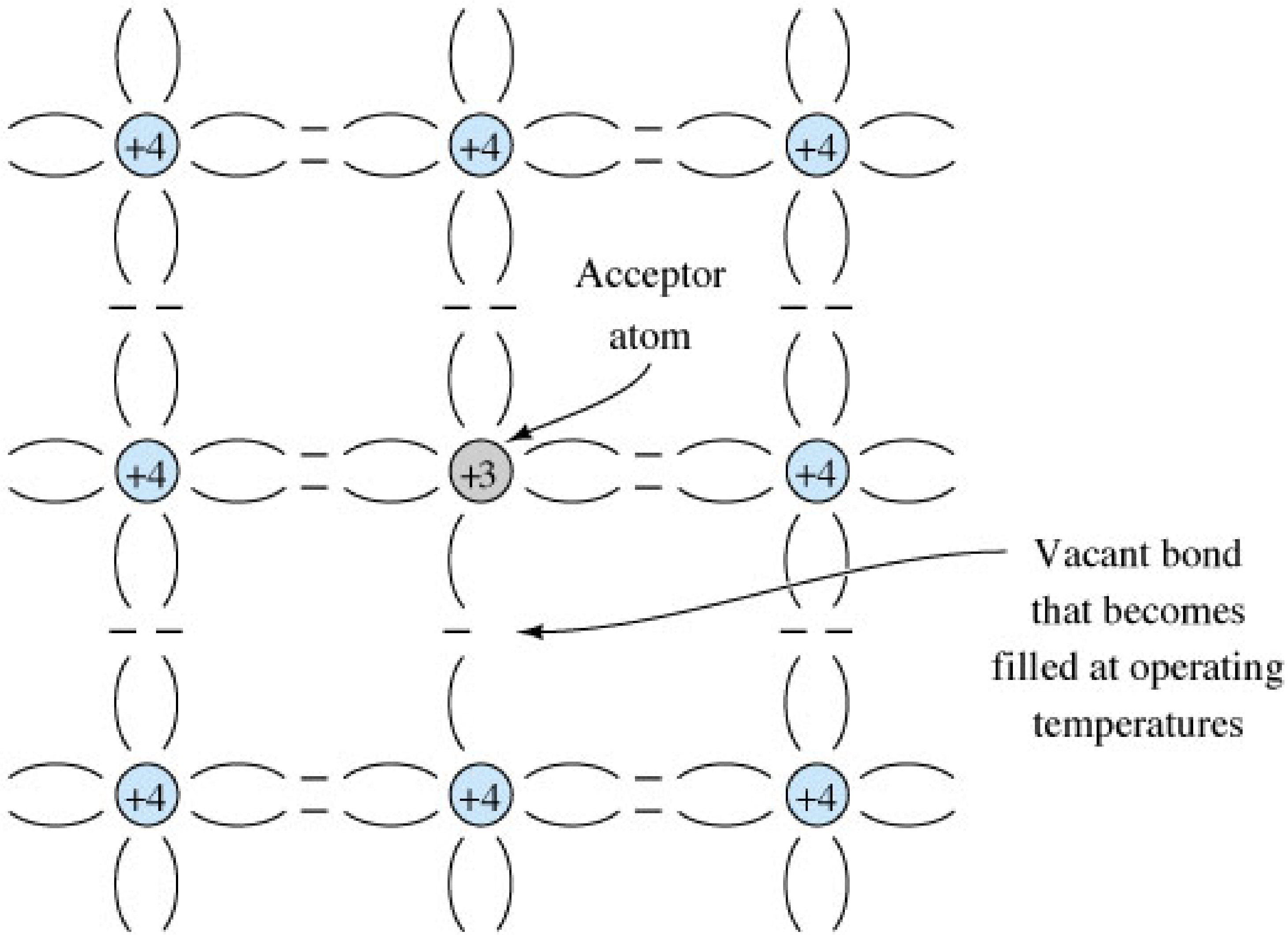
  átomos trivalentes (B, Ga, In)

  semiconductor tipo p

Contaminación con Átomos Donadores



Contaminación con Átomos Aceptores



Ley de Acción de Masas

$$np = n_i^2$$

- Semiconductor intrínseco

$n = p = n_i$

- Semic. tipo n (N_D: concentración de átomos donadores)

$n = p + N_D$

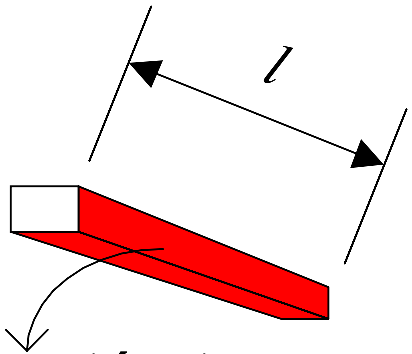
como $N_D >> p, n \approx N_D, \; p \approx \dfrac{n_i^2}{N_D}$

- Semic. tipo p (N_A: concentración de átomos aceptores)

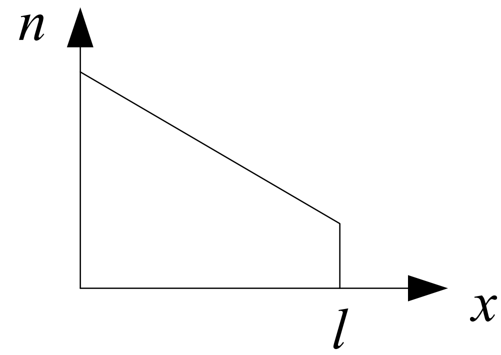
$p = n + N_A$

como $N_A >> n, \; p \approx N_A, \; n \approx \dfrac{n_i^2}{N_A}$

Corriente de Difusión



contaminación tipo n,
no-uniforme



$$\frac{dn}{dx} \neq 0$$

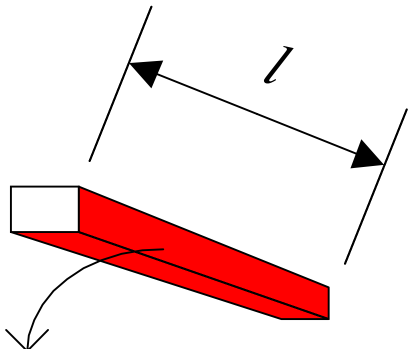
$\frac{dn}{dx}$ gradiente de concentración

$$J_{n_{DIF}} = qD_n \frac{dn}{dx}$$

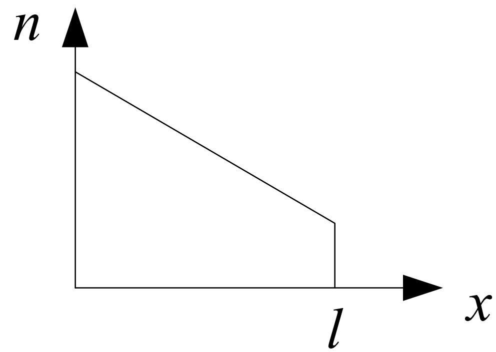
D_n Constante de difusión de los electrones (m^2/s)

J_{nDIF} Densidad de corriente de difusión de los electrones (A/m^2)

Corriente de Difusión (cont.)



contaminación tipo n,
no-uniforme



$$\frac{dp}{dx} \neq 0$$

$\frac{dp}{dx}$ gradiente de concentración de huecos

$$J_{p_{DIF}} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

D_p Constante de difusión de los huecos (m^2/s)

J_{pDIF} Densidad de corriente de difusión de los huecos (A/m^2)

Corriente Total en un Semiconductor Graduado

$$J_n = J_{n_{COND}} + J_{n_{DIF}}$$

$$J_n = \sigma_n E + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = J_{p_{COND}} + J_{p_{DIF}}$$

$$J_p = \sigma_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$J = J_n + J_p$$

Relación de Einstein

Relaciona dos fenómenos termodinámicos y estadísticos

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$$

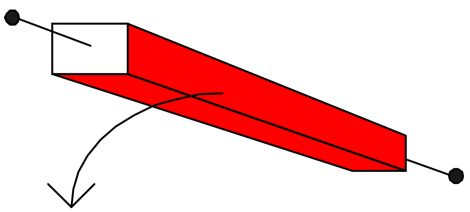
$$V_T = \frac{kT}{q} \approx \frac{T}{11{,}594}$$

V_T Voltaje equivalente de temperatura (V)

k Constante de Boltzman = 1.381×10^{-23} J/K

T Temperatura en Kelvins (K)

Potencial Interno



semiconductor graduado

$$\frac{dn}{dx} \neq 0 \qquad \frac{dp}{dx} \neq 0 \qquad \Longrightarrow \qquad \exists\, J_{n_{DIF}}, J_{p_{DIF}}$$

Como $J_n = J_p = 0$

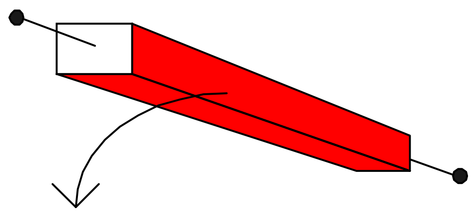
$\Longrightarrow$ $\exists\, J_{n_{COND}}, J_{p_{COND}}$ tal que

$$qn\mu_n E = -qD_n \frac{dn}{dx} \qquad qp\mu_p E = qD_p \frac{dp}{dx}$$

$\Longrightarrow$ $\exists\, E$ interno

$\Longrightarrow$ $\exists\, V$ interno $\left(V = -\int E dx\right)$

Potencial Interno (cont.)



semiconductor graduado

$$qn\mu_n E = -qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$E = \frac{-D_n}{n\mu_n}\frac{dn}{dx} = \frac{-V_T}{n}\frac{dn}{dx}$$

$$\text{Como } E = -\frac{dV}{dx}$$

$$\int_{V_1}^{V_2} dV = V_T \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{n}$$

$$V_2 - V_1 = V_T \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad \text{análogamente} \quad V_2 - V_1 = V_T \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

Ley de Acción de Masas -extendida-

$$V_2 - V_1 = V_T \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \qquad V_2 - V_1 = V_T \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

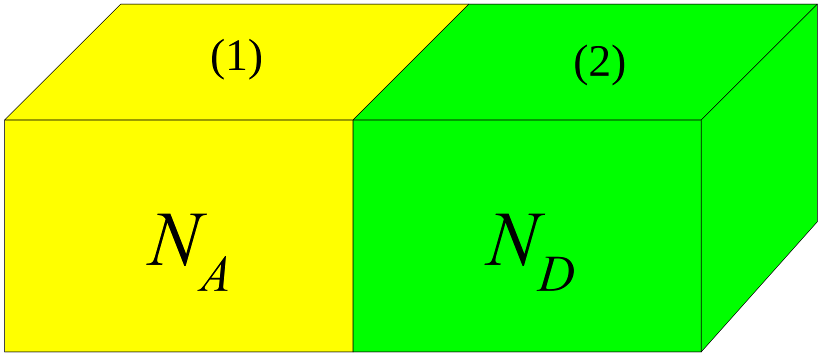
$$n_2 = n_1 e^{\frac{V_2 - V_1}{V_T}} \qquad p_2 = p_1 e^{-\left(\frac{V_2 - V_1}{V_T}\right)}$$

$$n_2 p_2 = n_1 p_1$$

Para un semiconductor no graduado, $n_1 = n_2 = n$, $p_1 = p_2 = p$,

$np = n_i^2$

Semiconductor Graduado en Escalón



$$V_2 - V_1 = V_T \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

$$V_2 - V_1 \approx V_T \ln\left(\frac{N_A}{n_i^2 / N_D}\right)$$

$$\psi_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A}{n_i^2 / N_D}\right) = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

(diferencia de potencial de contacto)

(potencial interno de una unión p-n abrupta)

Problema

Para un trozo de silicio graduado en escalón, calcular su potencial interno a temperatura ambiente si

a) $N_A = 10^{15}/\text{cm}^3 = N_D$

$$\psi_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \qquad n_i(T = 300\text{K}) = 1.5\times10^{10}\,\text{cm}^{-3}$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \approx \frac{T}{11{,}594} = \frac{300}{11{,}594} = 25.87\text{mV}$$

$$\psi_0 = (25.87\text{mV})\ln\left(\frac{10^{15}10^{15}}{1.5^2\times10^{20}}\right) = 0.57\text{V}$$

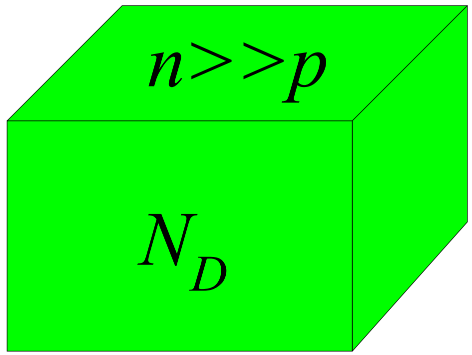
Problema (cont.)

Para un trozo de silicio graduado en escalón, calcular su potencial interno si

b) $N_A = 10^{17}/\text{cm}^3$ y $N_D = 10^{15}/\text{cm}^3$

$$\psi_0 = (25.87\text{mV})\ln\left(\frac{10^{17}10^{15}}{1.5^2 \times 10^{20}}\right) = 0.69\text{V}$$

Ecuación de Continuidad

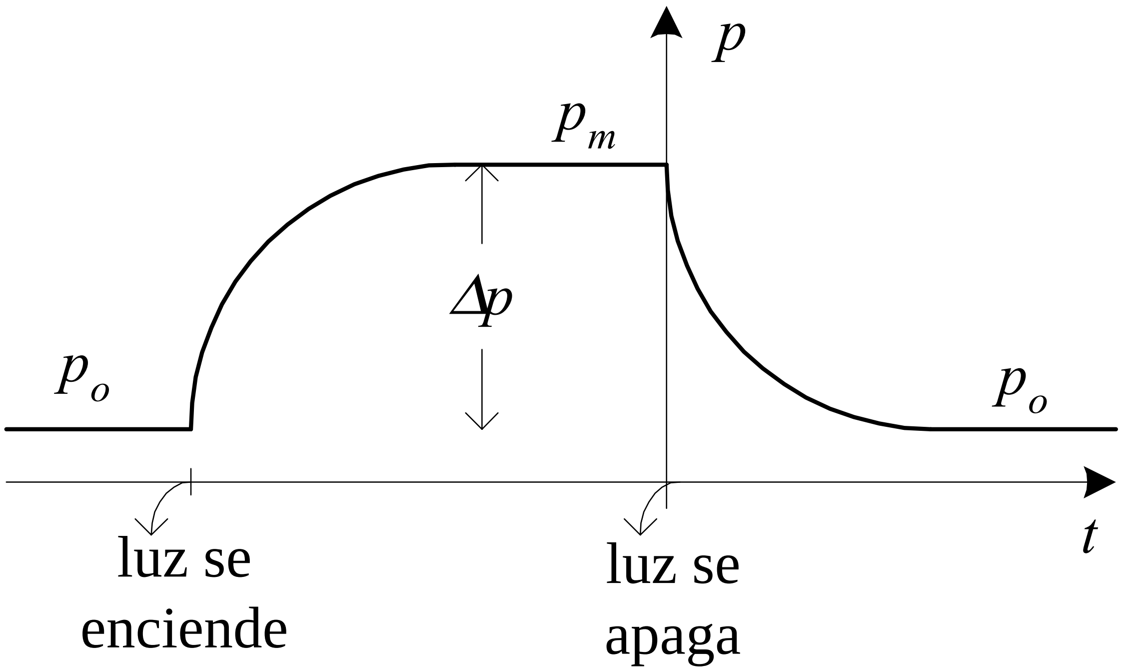


En equilibrio, $n = n_o$, $p = p_o$

τ_p Tiempo medio de vida de los huecos

Al aplicar una perturbación...

Como $\Delta n = \Delta p$, solo los portadores minoritarios se ven afectados significativamente



Ecuación de Continuidad (cont.)

dp/dt Velocidad de cambio de p

p/τ_p Disminución en p por segundo debido a la recombinación

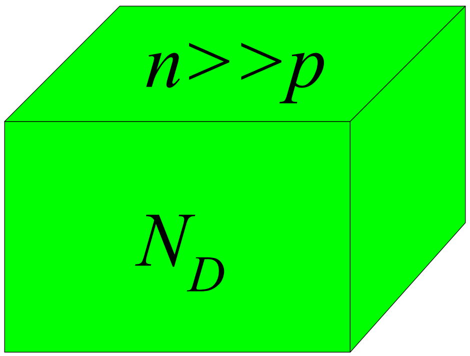
g Incremento en p por segundo debido a la radiación

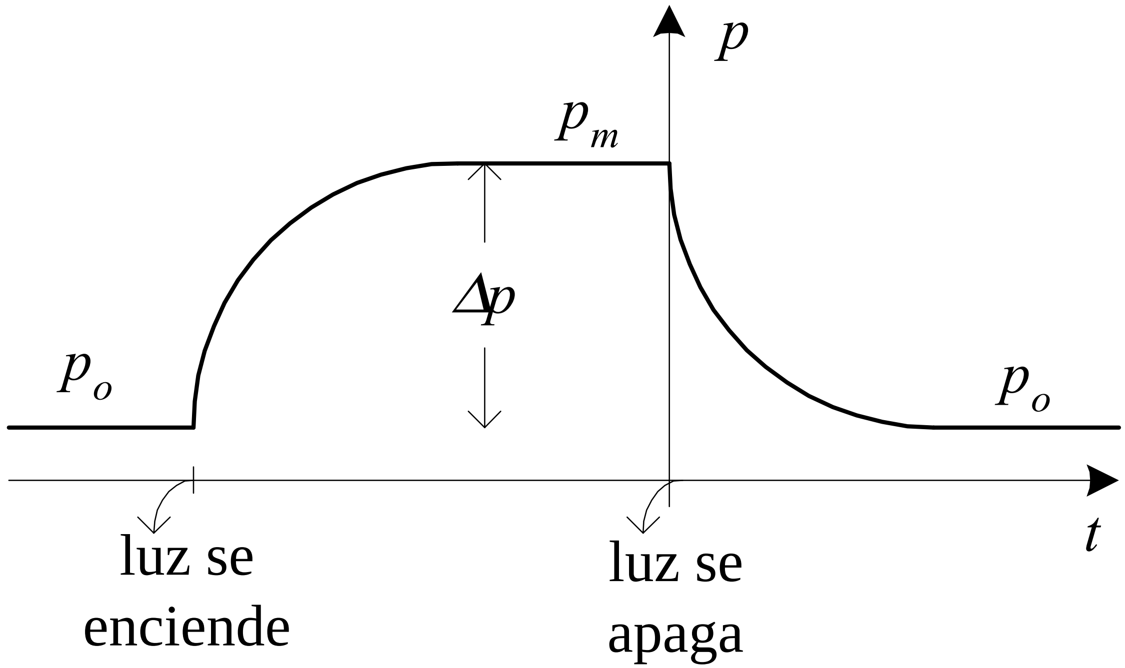
$$\frac{dp}{dt} = g - \frac{p}{\tau_p}$$

Como $p = p_o$ y $dp/dt = 0$ cuando no hay radiación $\Longrightarrow$ $g = \dfrac{p_o}{\tau_p}$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{p_o - p}{\tau_p} \Longrightarrow \int_{p_m}^{p} \frac{dp}{p_o - p} = \int_0^t \frac{dt}{\tau_p} \Longrightarrow p = p_o + (p_m - p_o)e^{-\frac{t}{\tau_p}}$$

Ecuación de Continuidad (cont.)

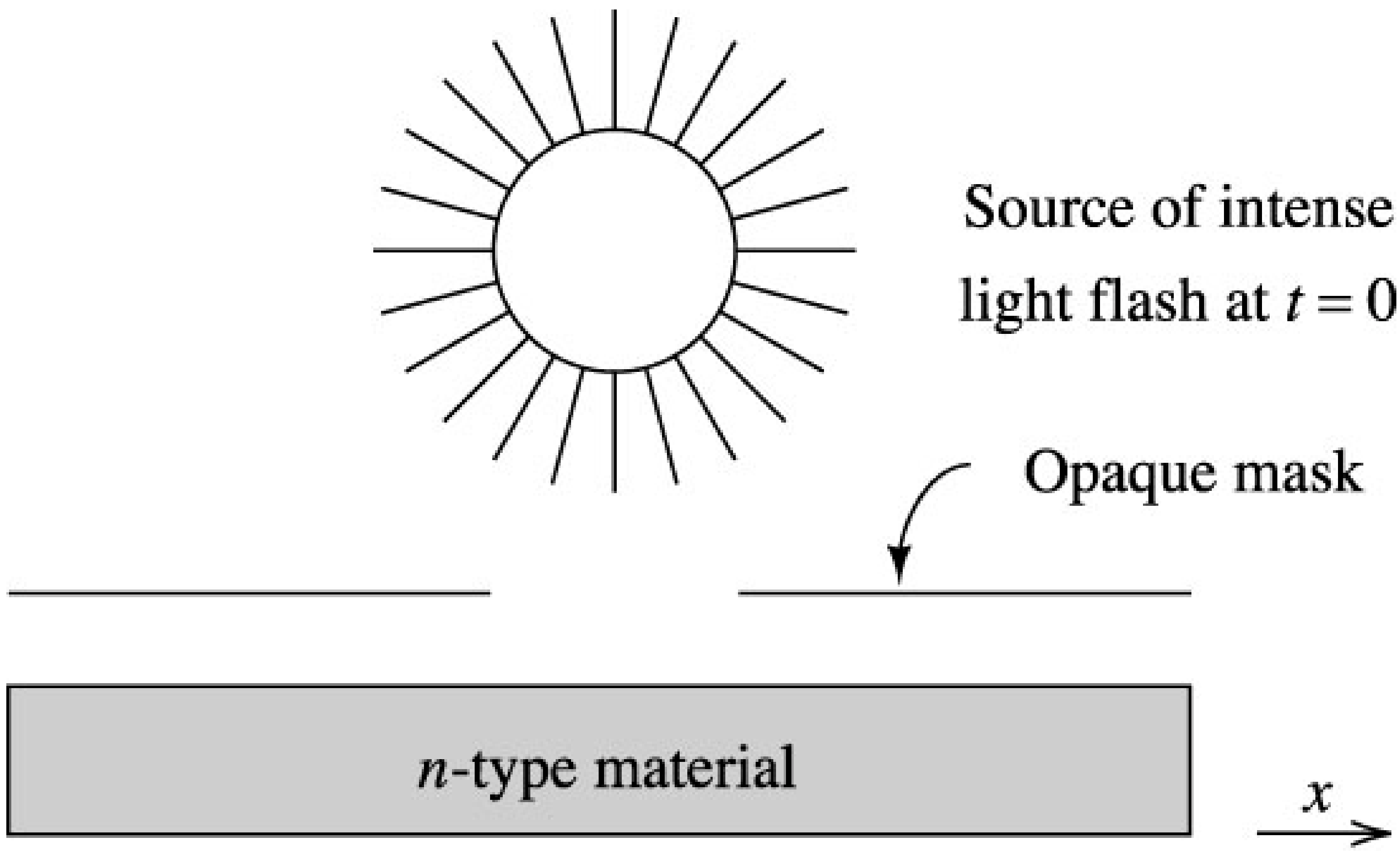




$$p(t) = p_o + (p_m - p_o)e^{-\frac{t}{\tau_p}}$$
$$t \geq 0$$

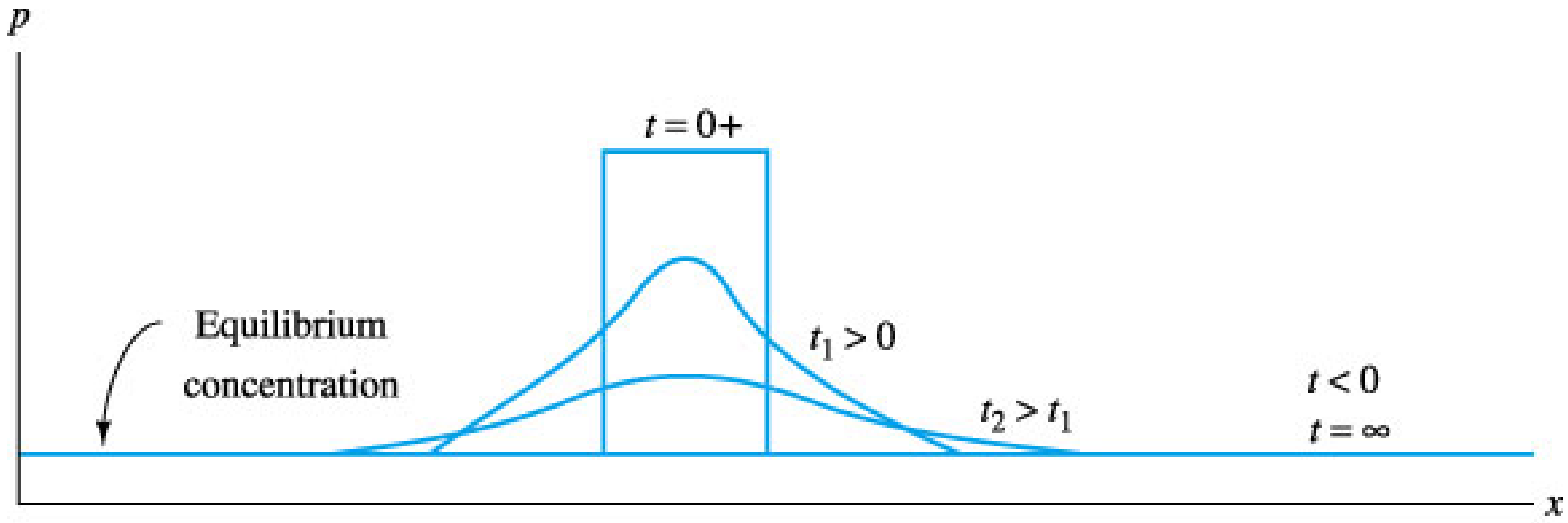
Variación en la concentración de los portadores minoritarios debida a la generación y recombinación

Experimento de Shockley-Haynes



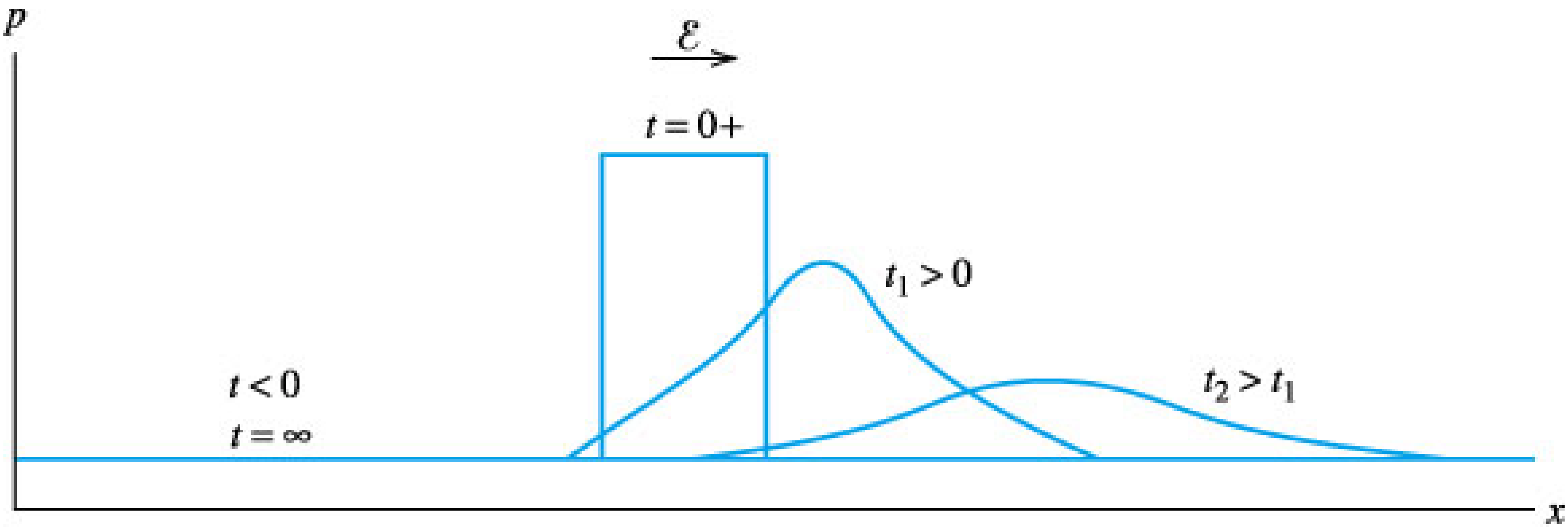
Experimento de Shockley-Haynes (cont.)

Sin aplicar E ...



Experimento de Shockley-Haynes (cont.)

Con un *E* aplicado ...

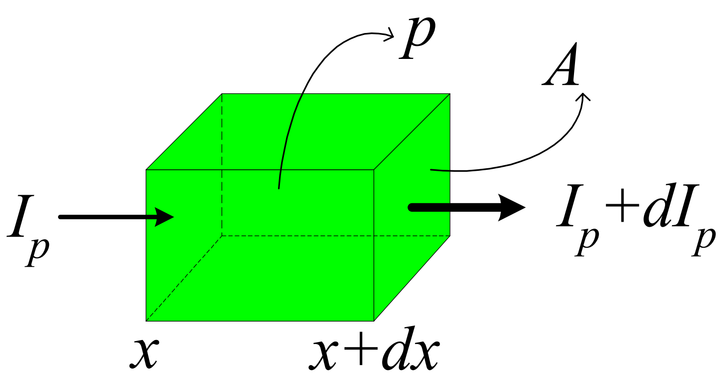


Ecuación de Continuidad – Caso General

$$\frac{dp}{dt} = \frac{p_o - p}{\tau_p}$$

Incremento en p por segundo debido a la agitación térmica menos la disminución en p por segundo debido a la recombinación

En general, la concentración de los portadores minoritarios es función del tiempo y de la distancia



dI_p Disminución del número de Coulombs por segundo en el volumen dV debido a la corriente I_p

dI_p/q Disminución de huecos por segundo en el volumen dV debido a la corriente I_p

Ecuación de Continuidad – Caso General

dI_p Disminución del número de Coulombs por segundo en el volumen dV debido a la corriente I_p

dI_p/q Disminución de huecos por segundo en el volumen dV debido a la corriente I_p

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

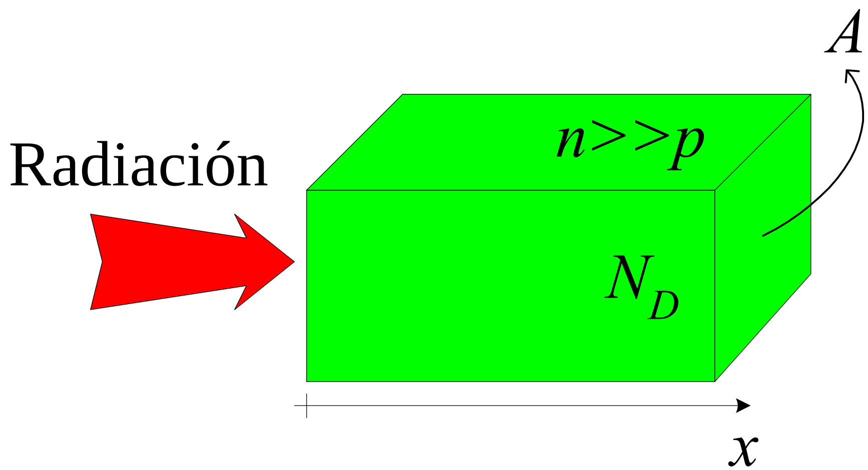
Disminución de p por segundo en el volumen dV debido a la corriente I_p

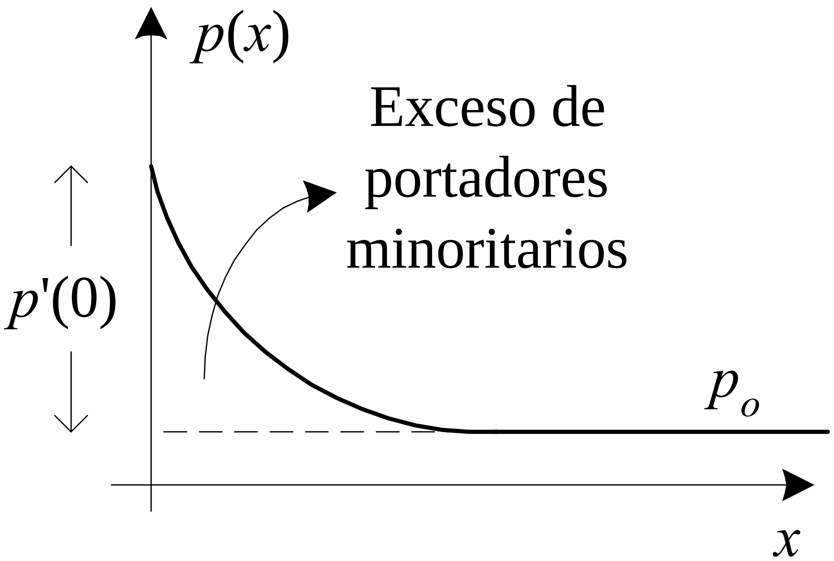
Luego

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

Ecuación de Continuidad

Inyección de Portadores Minoritarios





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

En estado estable...

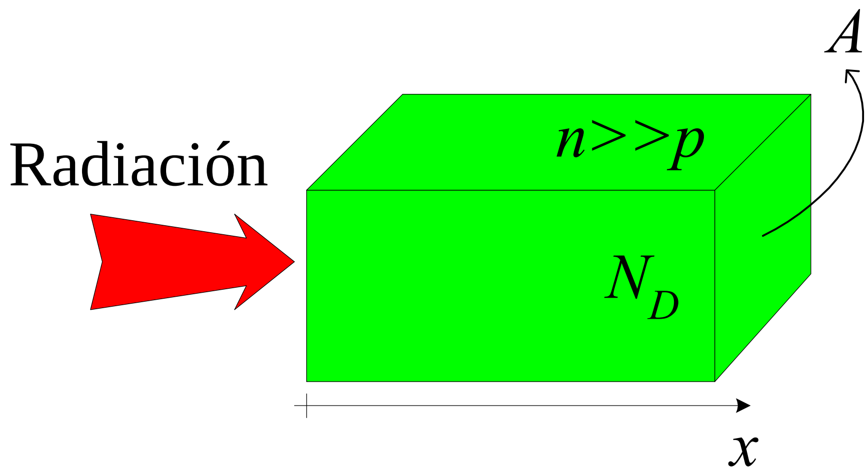
$$\frac{1}{q}\frac{\partial J_p}{\partial x} = \frac{p_o - p}{\tau_p}$$

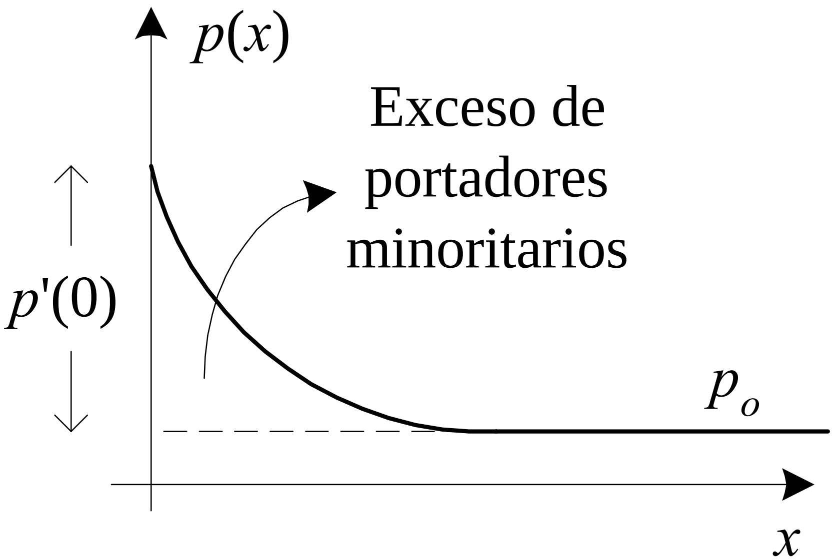
Y como $$J_{p_{DIF}} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

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

$$L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_p}$$ Longitud de difusión de los huecos

Inyección de Portadores Minoritarios





$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{p - p_o}{L_p^2}$$

$$p(x) = K_1 e^{-x/L_p} + K_2 e^{x/L_p} + p_0$$

$$K_2 = 0$$

$$K_1 = p'(0)$$

$$p(x) = p'(0) e^{-x/L_p} + p_0$$

$$L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_p}$$