

Tema 4: Fenómenos de transporte de carga

Cap. 2: Sze, Cap. 4: K. Kano

+ Arrastre de portadores

- movilidad
- resistividad
- efecto Hall

+ Difusión de portadores

- Proceso de difusión
- Relación de Einstein

+ Inyección de portadores

+ Generación-recombinación de portadores

movimiento de las cargas

densidades de corriente

¡ desequilibrio !

estado estacionario

= ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

= descripción global

> Aplicaciones

- Inyección lateral en estado estacionario
- Experimento de Haynes-Shockley

Movilidad

En un cristal semiconductor, **sin fuerzas externas**, los portadores de carga se mueven, como partículas cuasi-libres, considerando su masa efectiva. Así:

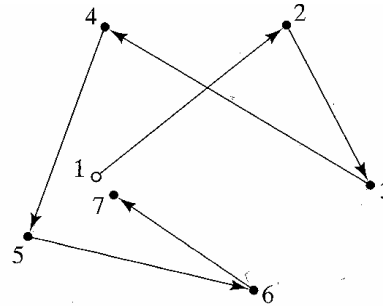
$$\frac{1}{2} m^* v_{th}^2 = 3 \cdot \frac{1}{2} kT$$

m^* : masa efectiva

v_{th} : velocidad térmica media ($\sim 10^7$ cm/s)

τ_c : tiempo libre medio ($\sim 10^{-12}$ s)

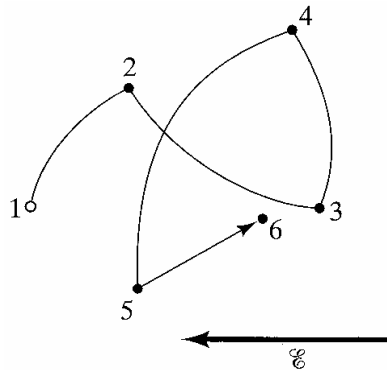
$v_{th} \tau_c$: recorrido libre medio ($\sim 10^{-5}$ s)



El movimiento aleatorio provoca que el desplazamiento neto sea nulo

Si aplicamos un **campo eléctrico** ...

$$-q E \tau_c = m_n \cdot v_n \Rightarrow v_n = -\left(\frac{q \tau_c}{m_n}\right) E$$



$$[\mu] = \text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$$

los electrones:

v_n : velocidad de arrastre de los electrones

$$v_n = -\mu_n E \quad \text{siendo} \quad \mu_n = \frac{q \tau_c}{m_n}$$

μ_n : movilidad de los electrones

los huecos:

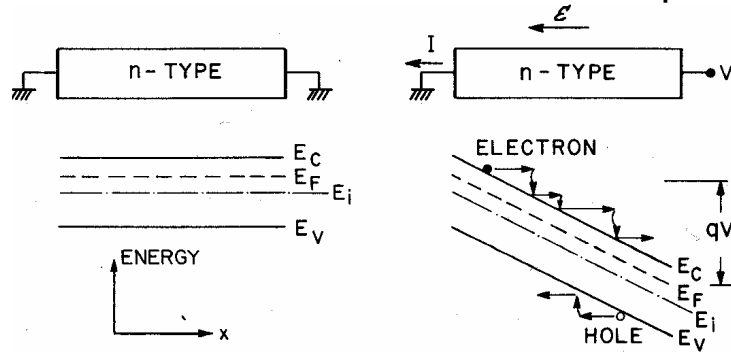
v_p : velocidad de arrastre de los huecos

$$v_p = \mu_p E \quad \text{siendo} \quad \mu_p = \frac{q \tau_c}{m_p}$$

μ_p : movilidad de los huecos

Resistividad

Consideremos un semiconductor tipo n homogéneo en el seno de un campo eléctrico $\mathcal{E}$:



$$-q\mathcal{E} = -\nabla E_p \rightarrow -q\mathcal{E} = -\frac{dE_i}{dx} \rightarrow \mathcal{E} = \frac{1}{q} \cdot \frac{dE_i}{dx}$$

El potencial electrostático se define

$$\mathcal{E} \equiv -\frac{d\psi}{dx} \rightarrow \psi = \frac{E_i}{q}$$

Corrientes de arrastre:

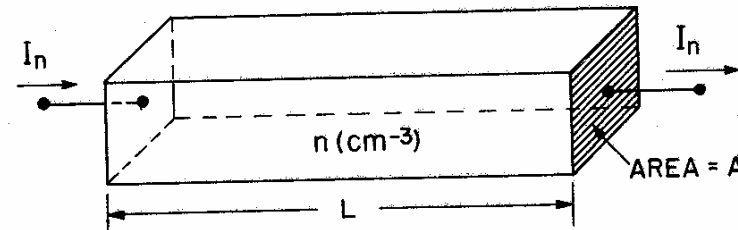
para los electrones:

$$J_n = \frac{I_n}{A} = \sum_{i=0}^n (-qv_i) = -qn v_n = qn \mu_n E$$

para los huecos:

$$J_p = qp v_p = qp \mu_p E$$

¡mismo sentido!



$$J = J_n + J_p = (qn \mu_n + qp \mu_p) E$$

Conductividad:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = qn \mu_n + qp \mu_p$$

Resistividad:

$$\rho \equiv \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{qn \mu_n + qp \mu_p} \rightarrow \begin{matrix} \text{tipo n} \\ \rho = \frac{1}{qp \mu_p} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{tipo p} \\ \rho = \frac{1}{qn \mu_n} \end{matrix}$$

Resistencia

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Ejemplo

Una muestra de silicio a 300K con $L=2.5\text{cm}$ y $A=2\text{mm}^2$ se dopa con 10^{17}cm^{-3} de fósforo y $9 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ de boro. Calcule:

a) Las conductividades de la muestra debidas a huecos y electrones

b) La resistencia de la muestra

a) Las conductividades son: $\sigma_n = q n \mu_n$ y $\sigma_p = q p \mu_p$

Para calcular n y p:

$$p + N_D = n + N_A \quad \text{y} \quad p \cdot n = n_i^2$$

Si resolvemos ambas ecuaciones:

$$n = 10^{16}\text{cm}^{-3} \quad \text{y} \quad p = 10^4\text{cm}^{-3}$$

La densidad total de dopantes será: $N = N_A + N_D = 1.9 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$. Si leemos en la gráfica:

$$\mu_n \cong 700\text{cm}^2/\text{Vs} \quad \text{y} \quad \mu_p \cong 200\text{cm}^2/\text{Vs}$$

Con lo cual:

$$\sigma_n = (1.6 \times 10^{-19})(700)(10^{16}) = 1.12(\text{Ohm} \cdot \text{cm})^{-1}$$

$$\sigma_p = (1.6 \times 10^{-19})(200)(10^4) = 3.12 \times 10^{-13}(\text{Ohm} \cdot \text{cm})^{-1}$$

b) La resistividad y la resistencia de la muestra serán:

$$\rho \equiv \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\sigma_n + \sigma_p} \cong \frac{1}{(1.12)} = 0.893(\text{Ohm} \cdot \text{cm}) \Rightarrow R = \rho \frac{L}{A} = (0.893) \frac{(2.5)}{(0.02)} = 134\text{Ohm}$$

El efecto Hall

Sea un semiconductor tipo p : $\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ $qE_y = qv_x B_z \rightarrow E_y = v_x B_z$

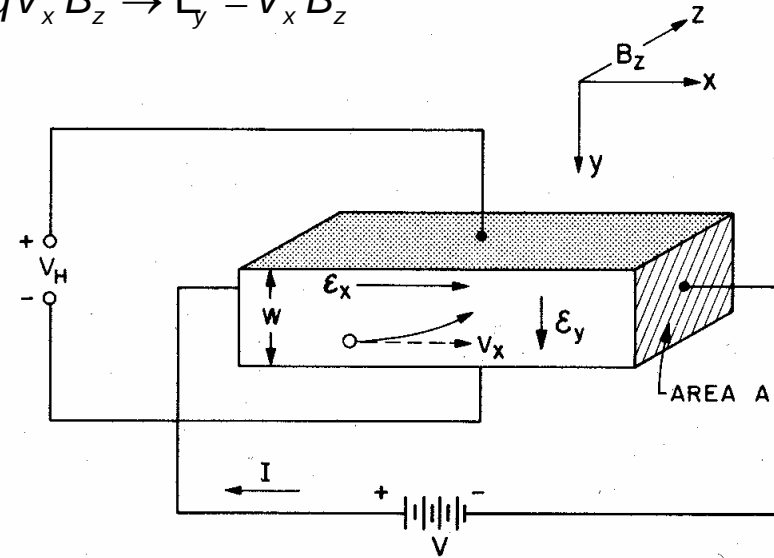
$$E_y = \left(\frac{J_p}{qp} \right) B_z = R_H J_p B_z ; \quad \text{con } R_H \equiv \frac{1}{qp}$$

R_H : coeficiente de Hall

Para un semiconductor tipo n: $R_H \equiv -\frac{1}{qn}$

Conocidos I , B , W , V_H y A :

$$\rho = \frac{1}{qR_H} = \frac{J_p B_z}{qE_y} = \frac{(I/A)B_z}{q(V_H/W)} = \frac{IB_z W}{qV_H A}$$



Ejemplo

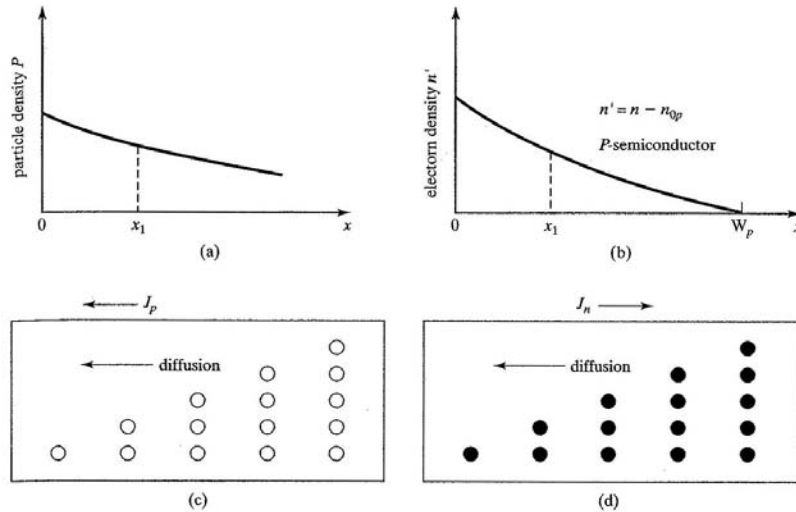
Una muestra de silicio es dopada con 10^{16}cm^{-3} átomos de P. Encuentre la tensión de Hall en una muestra con $W=500 \mu\text{m}$, $A=2.5 \times 10^{-3} \text{cm}^2$, $I=1 \text{mA}$, $B_z=10^{-4} \text{Wb/cm}^2$.

El coeficiente de Hall será: $R_H = -\frac{1}{qn} = \frac{1}{(1.6 \times 10^{-19})(10^{16})} = -625 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$

con lo que la tensión de Hall será:

$$V_H = E_y W = \left[R_H \frac{I}{A} B_z \right] W = \left[(-625) \cdot \frac{(10^{-3})}{(2.5 \times 10^{-3})} \cdot 10^{-4} \right] (500 \times 10^{-4}) = -1.25 \text{mV}$$

Difusión



Difusión: proceso que consiste en el movimiento de portadores desde regiones de alta concentración a regiones con baja concentración
Su descripción matemática es:

$$F = -D \left. \frac{dP}{dx} \right|_{x=x_1}$$

F : flujo
 P : concentración
 D : **constante de difusión, difusividad**

La corriente de difusión de huecos tendrá el mismo sentido que el flujo de huecos. La corriente de difusión de electrones, sentido contrario ($J=q \cdot F$).

Corriente de difusión de electrones Corriente de difusión de huecos

$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

Relación de Einstein

$$D = \frac{kT}{q} \cdot \mu$$

Corriente total (suma de corrientes de arrastre y difusión)

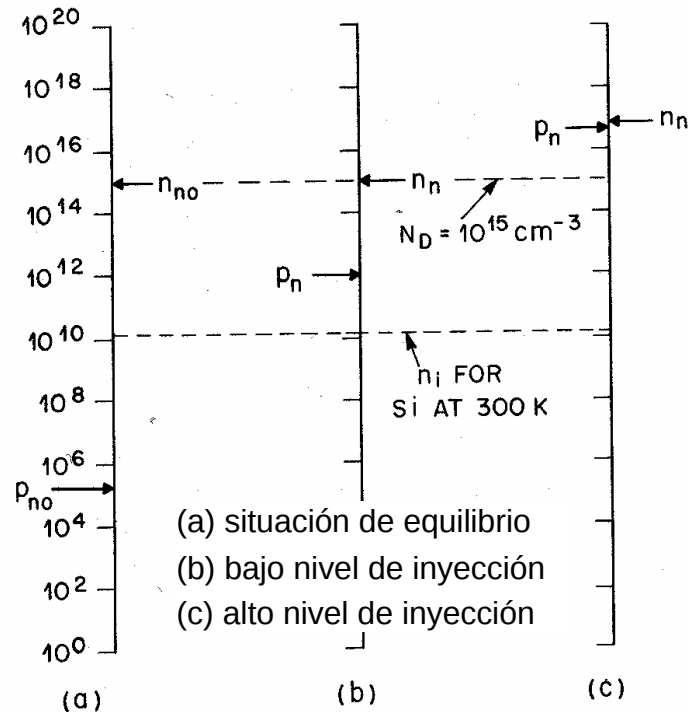
Corriente total de electrones

Corriente total de huecos

$$J_n = q \mu_n n \mathcal{E} + q D_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = q \mu_p p \mathcal{E} - q D_p \frac{dp}{dx}$$

Generación-Recombinación. Inyección de portadores



Expresiones analíticas:

Variación neta de portadores minoritarios:

Tipo n	Tipo p
$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$	$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}$

Exceso de portadores

$$n \cdot p > n_i^2 \Rightarrow n \cdot p \neq n_i^2$$

Generación (G) es el proceso por el que se crean nuevos portadores, electrones y huecos

Recombinación (R) es el proceso inverso, por el cual un electrón y un hueco desaparecen simultáneamente

Mecanismos de inyección de portadores:

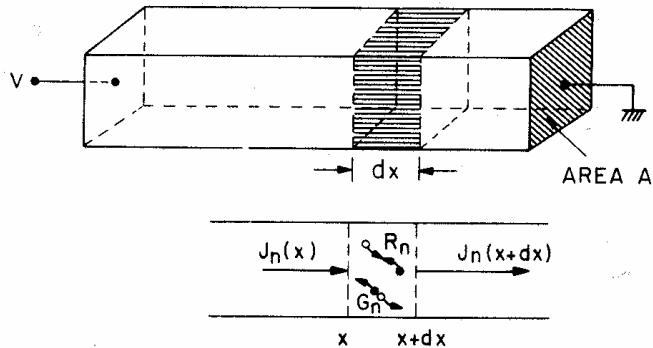
- Inyección directa (unión polarizada)
- Excitación óptica

Nivel de inyección:

Es la magnitud relativa de la concentración de portadores en exceso respecto de la concentración de portadores mayoritarios

Se considerarán siempre bajos niveles de inyección

Ecuación de continuidad



Consideremos los electrones:

$$\frac{\partial n}{\partial t} A dx = \left[\frac{J_n(x) A}{(-)q} - \frac{J_n(x+dx) A}{(-)q} \right] + (G_n - R_n) A dx$$

tomando el desarrollo en serie

$$J_n(x+dx) = J_n(x) + dx \cdot \frac{\partial J_n}{\partial x} + \dots$$

Se obtiene:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial J_n(x)}{\partial x} + (G_n - R_n)$$

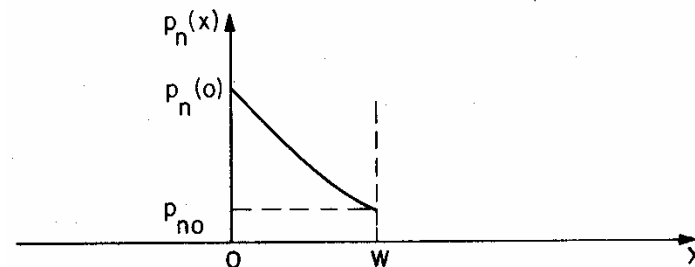
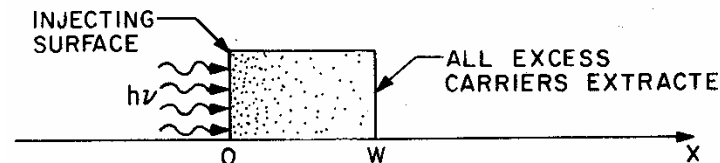
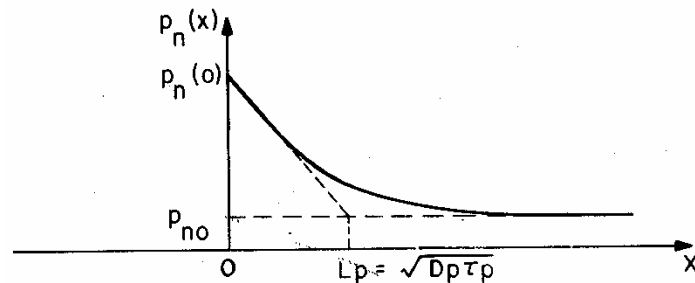
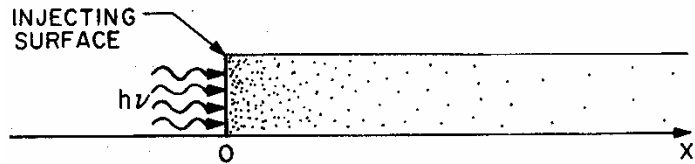
Si sustituimos las expresiones de las corrientes:

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = n_p \cdot \mu_n \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \mu_n \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial n_p}{\partial x} + D_n \cdot \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + G_n - \frac{n_p - n_{po}}{\tau_n}$$

Para un semiconductor tipo n:

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = (-)p_n \cdot \mu_p \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} - \mu_p \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p \cdot \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + G_p - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p}$$

Ejemplo: inyección lateral en estado estacionario



Sea un semiconductor de tipo n

En estado estacionario:

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = 0 = D_p \cdot \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p}$$

Las condiciones de contorno serán:

$$p_n(x=0) = p_n(0) \quad p_n(x \rightarrow \infty) = p_{no}$$

La solución de la ecuación diferencial será:

$$p_n(x) = p_{no} + [p_n(0) - p_{no}] \cdot e^{-x/L_p} \quad \text{con } L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}$$

Si la región semiconductor es finita:

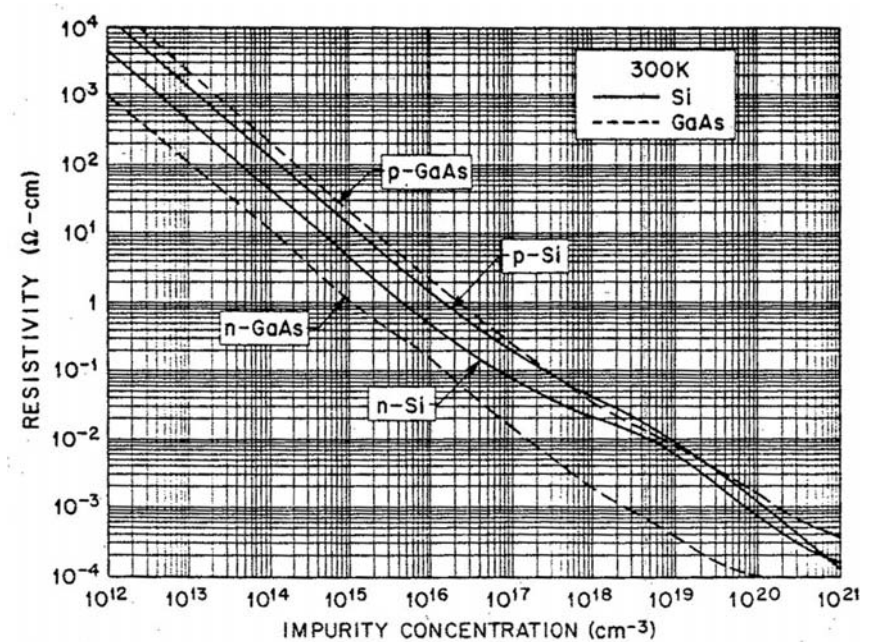
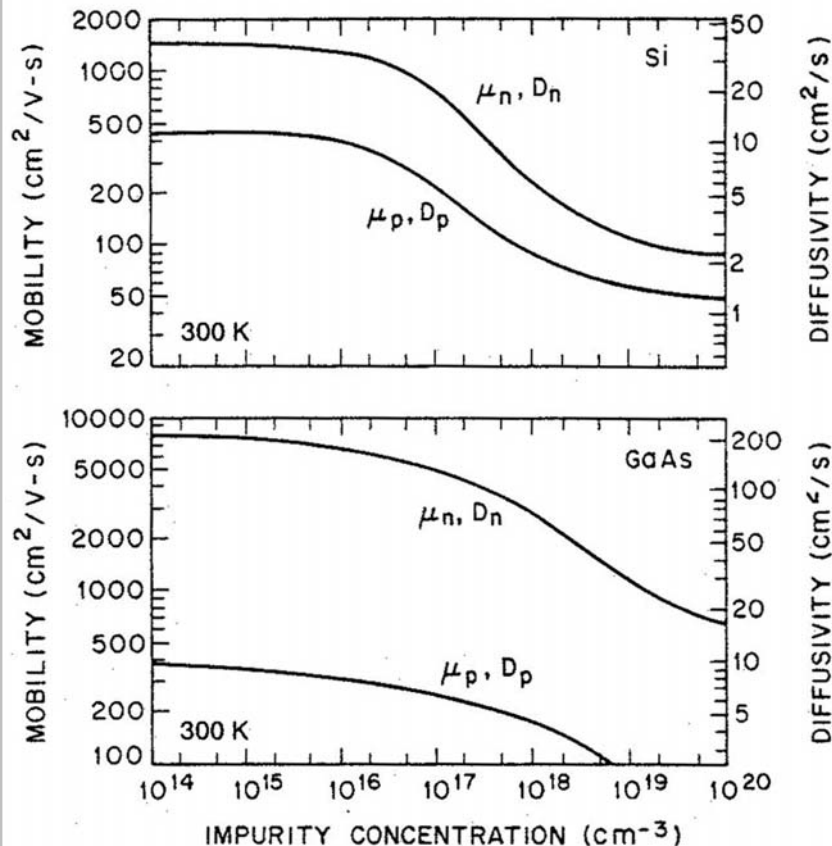
$$p_n(x) = p_{no} + [p_n(0) - p_{no}] \cdot \left[\frac{\sinh([W - x]/L_p)}{\sinh(W/L_p)} \right]$$

La corriente a la salida será:

$$J_p = -q \cdot D_p \cdot \left. \frac{\partial p_n}{\partial x} \right|_{x=W} = q \cdot [p_n(0) - p_{no}] \cdot \frac{D_p}{L_p} \cdot \frac{1}{\sinh \frac{W}{L_p}}$$

Experimento de Haynes-Shockley $\Rightarrow$ <http://jas2.eng.buffalo.edu/applets/education/semicon/diffusion/diffusion.html>

Hoja de datos 3.1



Corriente de electrones

Corriente huecos

$$J_n = q \mu_n n \mathcal{E} + q D_n \frac{dn}{dx} \quad J_p = q \mu_p p \mathcal{E} - q D_p \frac{dp}{dx}$$

Relación de Einstein

$$D = \frac{kT}{q} \cdot \mu$$

Efecto Hall

$$p = \frac{1}{q R_H} = \frac{I B_z W}{q V_H A}$$

$$n = -\frac{1}{q R_H} = -\frac{I B_z W}{q V_H A}$$

Ecuación de continuidad (huecos)

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = (-) p_n \cdot \mu_p \cdot \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} - \mu_p \cdot \mathcal{E} \cdot \frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p \cdot \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + G_p - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p}$$

Ecuación de continuidad (electrones)

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = n_p \cdot \mu_n \cdot \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} + \mu_n \cdot \mathcal{E} \cdot \frac{\partial n_p}{\partial x} + D_n \cdot \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + G_n - \frac{n_p - n_{po}}{\tau_n}$$

Tema 5: La unión p-n

K. Kano (§ 5.1 y 5.2), Sze (§ 3.1 y 3.2), Streetman (§ 5.2)

- Formación de la región espacial de carga
- Barrera de potencial y bandas de energía
- Corrientes de arrastre y difusión
- Electrostática de la región espacial de carga
- Constancia del nivel de Fermi
- Potencial de contacto en términos del nivel de Fermi
- Potencial de contacto en términos de las densidades de dopado
- Campo eléctrico y potencial en la región espacial de carga
- Anchura de la región espacial de carga