FACULTAD
DE INGENIERIA
Universidad de Buenos Aires

86.03
Dispositivos Semiconductores

Clase 3 – Transporte de portadores

Índice de temas:

1. Movimiento térmico de portadores
2. Corriente de arrastre u óhmica
3. Conductividad
4. Corriente de difusión

Lectura recomendada:

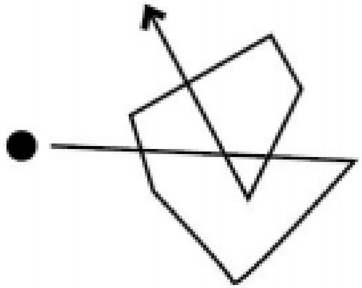
a. Capítulo 1 del libro “Electrónica de los Dispositivos para Circuitos Integrados” (Device Electronics for Integrated Circuits) de R. S. Muller y T. I. Kamins.
b. Capítulos 9 y 10 del libro “Física del estado sólido y de semiconductores” de J. P. McKelvey.
c. Volumen 1 del libro “Introducción a la física de los semiconductores” de R. Adler, A. Smith y R. Longini.
d. Capítulo 2 del libro "Introducción a los dispositivos semiconductores: principios y modelos“ de P. Julián.

Movimiento térmico de portadores

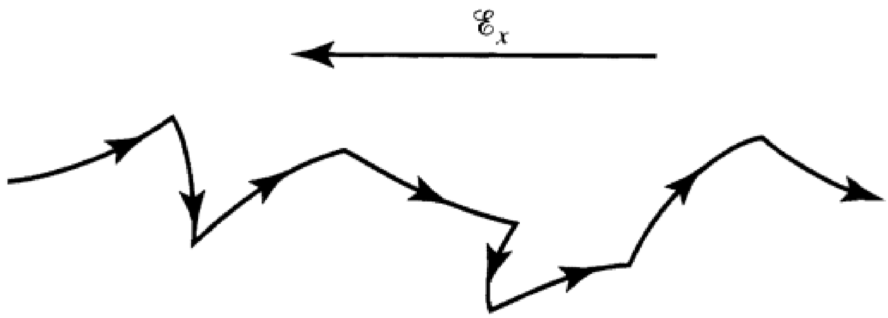
Recordar que los portadores en los SC son "casi partículas libres" en el sentido de que no están asociadas en particular con posición alguna de la red y que las influencias de las fuerzas del cristal están incorporadas en una masa efectiva (m^*) que difiere un poco de la masa del electrón libre (m_0).

Sin campo E aplicado, los portadores no son estacionarios sino que se mueven en todas direcciones con velocidades aleatorias chocando entre sí y con la red. Por lo tanto,

- la corriente eléctrica neta es cero
- existe un tiempo libre medio entre choques τ_c que depende del material y la temperatura
- teniendo en cuenta la aprox. de Boltzmann en 1-D, la velocidad térmica puede obtenerse de igualar la energía cinética a la energía térmica: $v_{th} = (kT/m^*)^{1/2}$

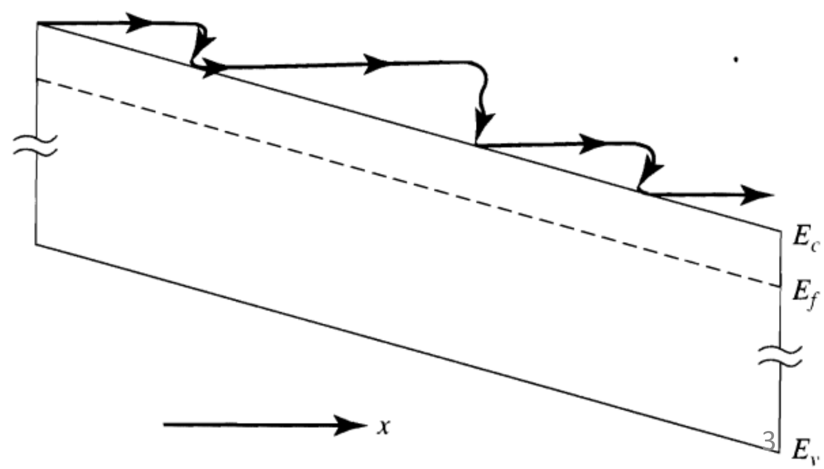


Si se aplica un campo E_x de **baja intensidad** (pequeña perturbación en la velocidad térmica aleatoria), los portadores son acelerados en la dirección del campo (con el sentido correspondiente) durante el tiempo libre medio entre colisiones. Abajo se muestra para el caso de un electrón.



En el diagrama de bandas, un campo ***E*** constante conduce a una variación lineal en los niveles de energía del cristal.

- Los electrones cambian de energía cuando chocan contra la red y caen a sus posiciones de equilibrio.
- Si ***E*** es bajo, estos cambios de energía son muy pequeños y la red no se calienta de forma considerable por el paso de la corriente.



La velocidad neta de los portadores ante un campo ***E*** aplicado se llama **velocidad de deriva o arrastre**.

Considerando la masa efectiva, esta velocidad se puede obtener usando la mecánica clásica:

$$p_x = F_x \Delta t = -qE_x \tau_{cn} = m_n^* v_{dn} \Rightarrow v_{dn} = -\frac{q\tau_{cn}}{m_n^*} E_x = -\mu_n E_x \qquad (1)$$ (electrones en la BC)

$$p_x = F_x \Delta t = qE_x \tau_{cp} = m_p^* v_{dp} \Rightarrow v_{dp} = \frac{q\tau_{cp}}{m_n^*} E_x = \mu_p E_x \qquad (2)$$ (huecos en la BV)

El factor de proporcionalidad entre la velocidad de arrastre y el campo ***E*** se denomina **movilidad** [m^2/Vs] y describe con qué intensidad influye el campo aplicado sobre el movimiento del portador.

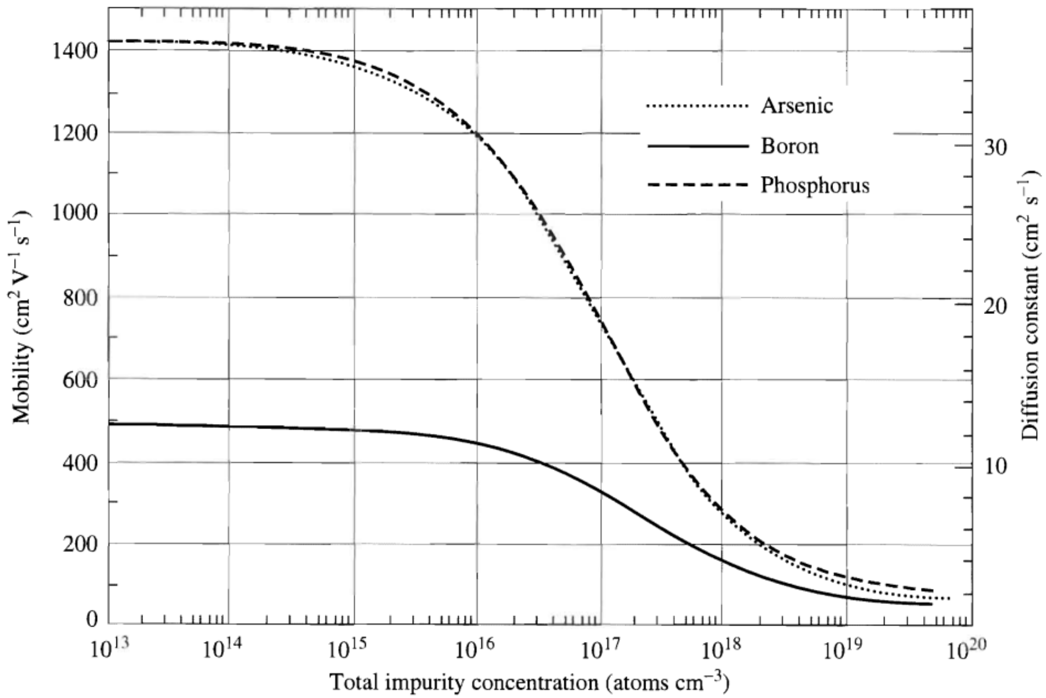
Es un parámetro muy importante que depende de las propiedades del material, la temperatura y de la concentración de impurezas.

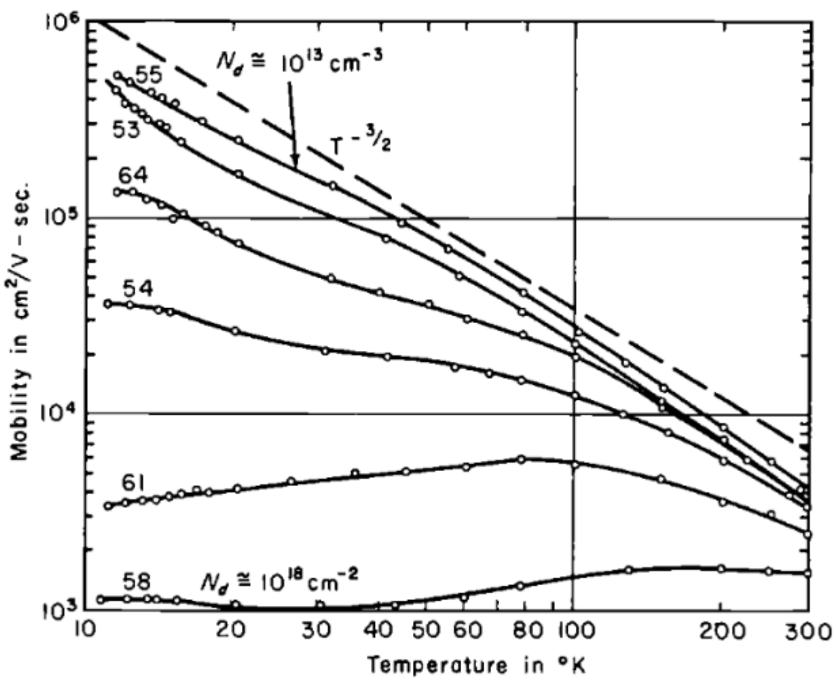
Para el caso de un SC intrínseco, la dependencia de la movilidad con la temperatura es principalmente debida a la dispersión de portadores de carga por oscilaciones acústicas de la red cristalina, la que produce una variación en el tiempo libre medio entre choques. En este caso, la ecuación que representa el fenómeno es:

$$\mu(T) = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-3/2} \qquad (3)$$

Cuando se dopa el SC, además de las vibraciones de la red, los átomos de impurezas provocan distorsiones locales en el cristal que dispersan a los portadores.

Derecha: Si dopado a 300 K





El efecto de la dispersión por impurezas es más notorio a bajas temperaturas que a altas.

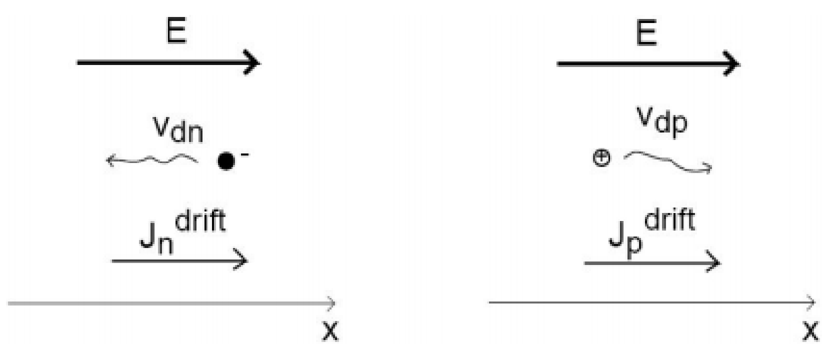
Izquierda: Germanio para distintos dopajes con impurezas donoras

Corriente de arrastre u óhmica

De Física 2 se sabe que la densidad de corriente de portadores de carga se puede expresar como:

$$\mathbf{J}_n^a = \frac{1}{V}\sum_{i=1}^{N_n} -q\mathbf{v}_i = -nq\mathbf{v}_{dn} = nq\mu_n\mathbf{E} \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_p^a = \frac{1}{V}\sum_{i=1}^{N_p} q\mathbf{v}_i = pq\mathbf{v}_{dp} = pq\mu_p\mathbf{E} \quad (5)$$



La densidad de corriente total es la suma de las corrientes de ambos tipos de portador:

$$\mathbf{J}^a = \mathbf{J}_n^a + \mathbf{J}_p^a = q\left(n\mu_n + p\mu_p\right)\mathbf{E} \quad (6)$$

Conductividad

Recordando de Física 2 la Ley de Ohm microscópica, se puede obtener la conductividad del SC:

$$\mathbf{J}^a = q(n\mu_n + p\mu_p)\mathbf{E} = \sigma \mathbf{E} \quad \Rightarrow \quad \sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (7)$$

Para el caso de un SC intrínseco en equilibrio térmico:

$$\sigma_0 = q(n_0\mu_n + p_0\mu_p) = q(\mu_n + \mu_p)n_i = 2q(\mu_n + \mu_p)\left(\frac{2\pi\sqrt{m_n^* m_p^*}kT}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (8)$$

Usando la ecuación de la movilidad en función de *T*:

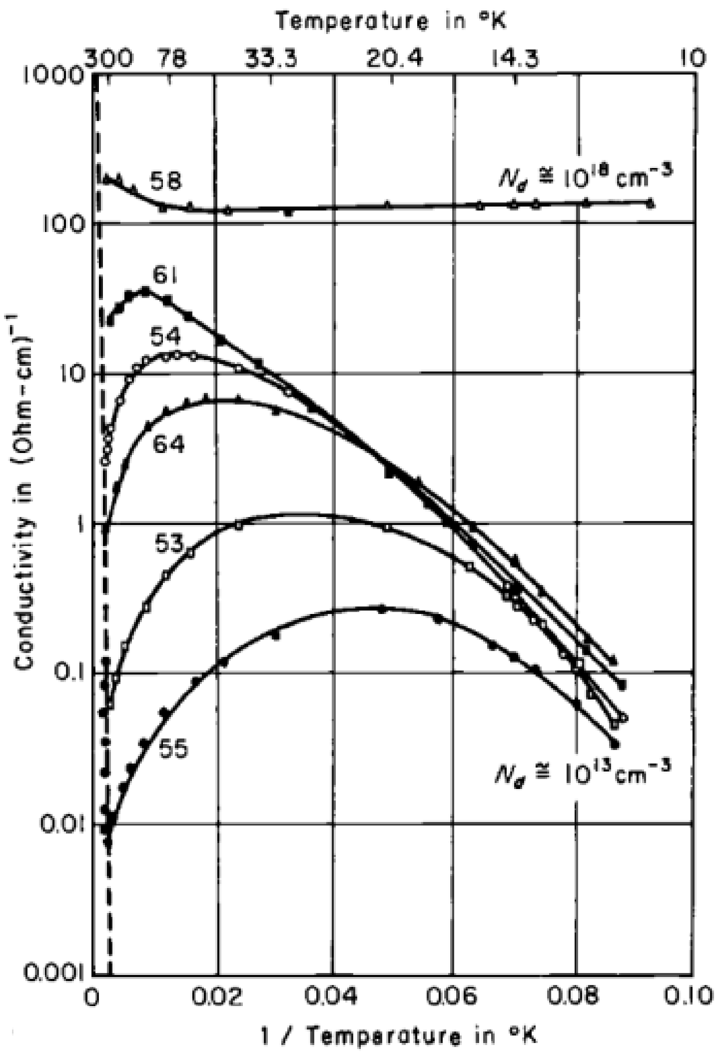
$$\sigma_0(T) = 2qT_0^{3/2}(\mu_{0n} + \mu_{op})\left(\frac{2\pi\sqrt{m_n^* m_p^*}k}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] = C\exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (9)$$

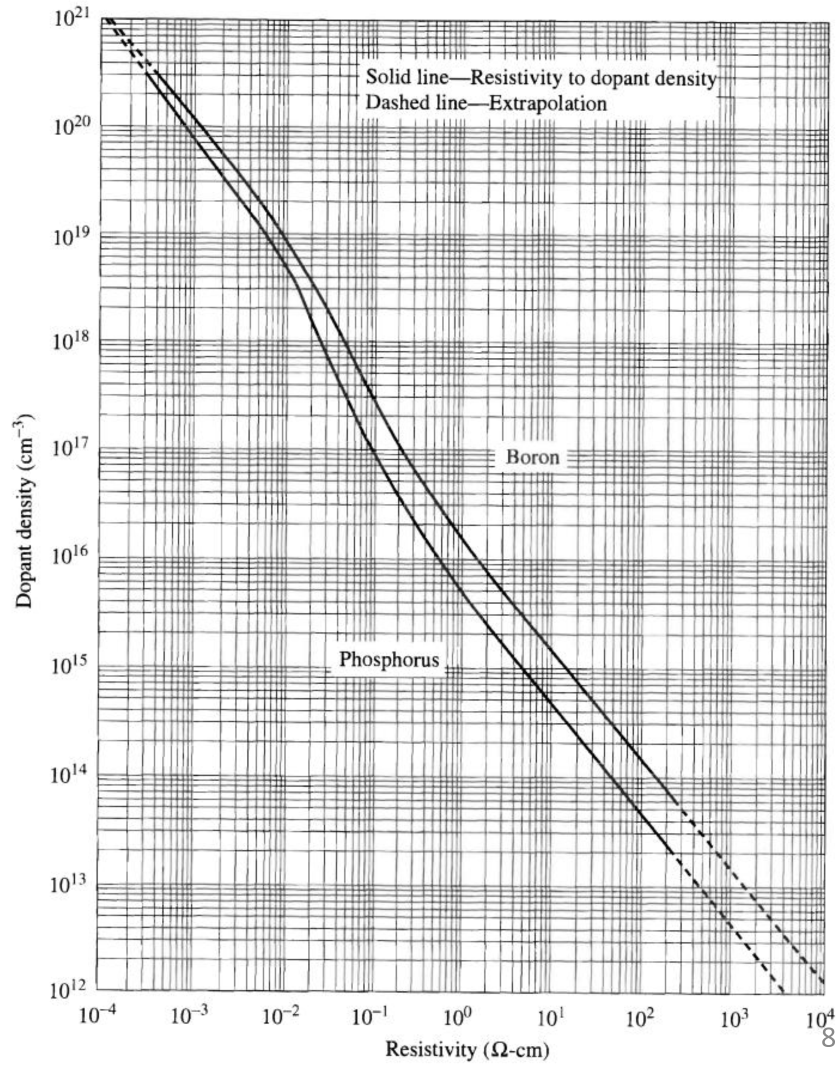
La conductividad intrínseca en equilibrio depende exponencialmente con *T*

Muchos sensores de temperatura usan este fenómeno (Termistores)

Para SC extrínsecos en equilibrio: $\sigma_0 = qN_D\mu_n(T, N_D)$ (tipo n) $\sigma_0 = qN_A\mu_A(T, N_A)$ (tipo p)

La conductividad aumenta con cuando se incrementa $N_{D,A}$ y T



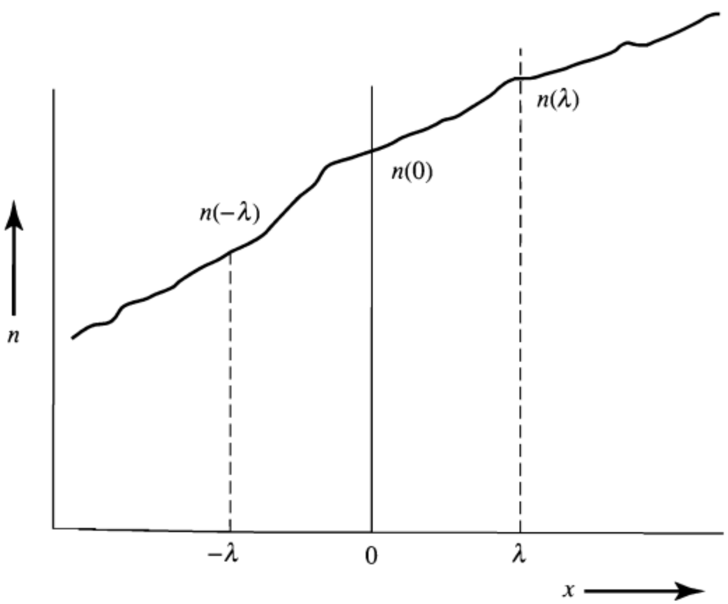


Corriente de difusión

En los SC, si se tiene una variación espacial de las energías o densidades de portadores, puede existir otra corriente muy importante que se llama corriente de difusión.

En los metales esta corriente es depreciable respecto de la corriente de arrastre debido a las altas conductividades (por eso no se estudia en Física 2)

En los SC la difusión es un proceso muy importante que afecta al flujo de corriente y que está dado por tener una conductividad más baja y la posibilidad de densidades no uniformes de los portadores (esto último será objeto de estudio de la próxima clase)



Consideremos el caso hipotético de un SC tipo n con una densidad de electrones que varía en un dimensión sin **E** aplicado. Se supone que el SC está **a temperatura uniforme**, de manera que la energía promedio de los electrones no varía con x, **solo la densidad $n(x)$ es variable**.

Aunque no hay **E**, los electrones tienen un movimiento térmico aleatorio.

En primer lugar, determinaremos el número de electrones por unidad de tiempo y área que cruzan el plano en $x = 0$, en el entorno del camino libre medio $\lambda = v_{th}\tau_c$

Desde la izquierda, el flujo de electrones depende de la densidad de electrones en $x = -\lambda$

$$\frac{1}{2} n(-\lambda) v_{th} \quad (10)$$

El factor ½ responde a que, después de una colisión, la mitad de la densidad de electrones viaja a la izquierda y la otra viaja hacia la derecha (movimiento aleatorio). De igual forma sucede en $x = \lambda$. Por lo tanto, la tasa neta de partículas que fluyen **desde la izquierda** es

$$F_n = \frac{1}{2} v_{th} \left[n(-\lambda) - n(\lambda) \right] \quad (11)$$

Aproximando las densidades en $x = \pm\lambda$ por los dos primeros términos de un desarrollo en serie de Taylor:

$$F_n = \frac{1}{2} v_{th} \left\{ \left[n(0) - \lambda \frac{dn}{dx} \right] - \left[n(0) + \lambda \frac{dn}{dx} \right] \right\} = -v_{th} \lambda \frac{dn}{dx} \quad (12)$$

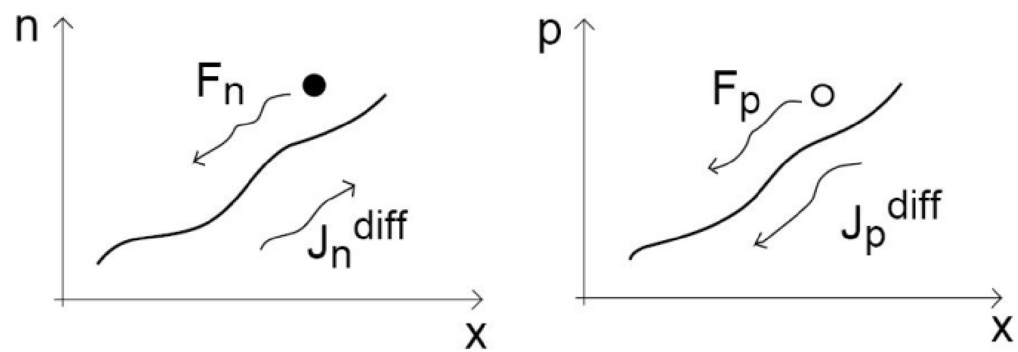
Al multiplicar el flujo F por la carga del portador se obtiene la densidad de corriente:

$$J_n^d = -qF_n = q v_{th} \lambda \frac{dn}{dx} = q v_{th}^2 \tau_{cn} \frac{dn}{dx} = q \frac{kT}{m_n^*} \tau_{cn} \frac{dn}{dx} = q \left(\frac{kT}{q} \mu_n \right) \frac{dn}{dx} = q D_n \frac{dn}{dx} \quad (13)$$

donde D_n es el coeficiente de difusión de electrones [m^2/s].
Es posible encontrar una expresión similar para el caso de los huecos

En la diapositiva anterior se obtuvo lo que se conoce como **relación de Einstein**: $$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} \quad (14)$$

Relaciona dos constantes importantes que caracterizan el transporte de portadores libres, por arrastre y por difusión, en un sólido.



Para el caso de que también estuviera presente una campo **E**:

$$J_n = J_n^a + J_n^d = q\mu_n nE_x + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (15)$$

$$J_p = J_p^a + J_p^d = q\mu_n pE_x - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (16)$$

La corriente total en el SC es la suma de las densidades de corriente anteriores.