

Física de los Semiconductores

25 de abril de 2018

Sitio web: www3.fi.mdp.edu.ar/fes/semic.html

Dinámica de los portadores de Carga

Flujo de corriente en presencia de \vec{E} y \vec{B}

- Cantidad de Portadores (electrones y huecos)
- Colisiones: Afecta la movilidad en el sólido
 - Red
 - Impurezas

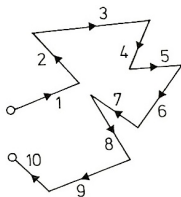
Veremos que los procesos de Colisión y Dispersión (Scattering) dependen de la temperatura, que afecta el movimiento térmico de los átomos de la red y la velocidad de los portadores.

Deriva de portadores

Conductividad y Movilidad

- Los portadores de carga en un sólido están continuamente en movimiento, aún en equilibrio térmico.
- El movimiento de un único electrón se mueve de manera aleatoria desviándose a causa de:
 - Vibraciones en la red
 - Impurezas
 - Otros electrones
 - Defectos

¡NO HAY FLUJO NETO DE ELECTRONES!!!



Deriva de portadores

Conductividad y Movilidad

- Si se aplica un campo eléctrico \mathcal{E}_x en la dirección x , cada electrón experimenta una fuerza

$$-q \cdot \mathcal{E}_x$$

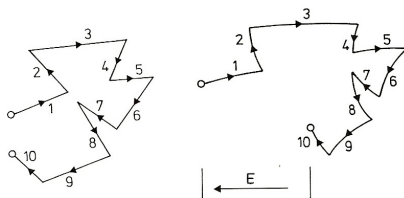


Figura: Ej: Flujo Neto del grupo de electrones cuando se aplica un campo \mathcal{E}

Deriva de portadores

Tiempo libre medio

- Si las colisiones son realmente aleatorias, la probabilidad de choque de cualquier electrón, en cualquier momento es **CONSTANTE**
- Definamos:
 - N_0 : Cantidad de electrones en $t = 0$
 - $N(t)$: Electrones que no chocaron en el tiempo t
 - La tasa de decrecimiento $dN(t)/dt$ es proporcional a $N(t)$:

$$-\frac{dN(t)}{dt} = \frac{N(t)}{\tau} \quad (1)$$

- τ^{-1} es una constante de proporcionalidad
- La solución de (1) es: $N(t) = N_0 \cdot e^{-t/\tau}$
- Donde τ es el tiempo medio entre colisiones llamado **Tiempo libre medio**

Deriva de portadores

Camino libre medio

Si v es la velocidad media de los electrones, la distancia media que recorre el electrón entre colisiones es

$$\langle l \rangle = v \cdot \tau \quad (2)$$

Conductividad y Movilidad

- Si p_x es el momento total del grupo de electrones en la dirección x , la fuerza total sobre los n electrones/ cm^3 :

$$-nq\mathcal{E}_x = \left. \frac{dp_x}{dt} \right|_{campo} \quad (3)$$

- ¿Aceleración continua? ¡**NO!!!**
- En estado estacionario, debido a las colisiones, los electrones se desaceleran compensando esa aceleración neta.

Deriva de portadores

Conductividad y Movilidad

- En estado estacionario la aceleración neta está balanceada por la desaceleración de las colisiones.
- Esto es, en estado estacionario, un campo constante \mathcal{E}_x produce un momento neto p_x . Sin embargo, la variación de p cuando se consideran las colisiones debe ser CERO para el caso de flujo de corriente constante.
- Para encontrar la tasa total de cambio del momento debido a las colisiones, debemos estudiar más de cerca las probabilidades de colisión.

Deriva de portadores

Conductividad y Movilidad: Probabilidad de Colisión

- La probabilidad de que algún electrón colisione en un tiempo dt es dt/τ . Por lo tanto, la variación de p_x debido a los choques en un tiempo dt es

$$dp_x = -p_x \cdot dt/\tau \quad (4)$$

- Así, la tasa de cambio de p_x debido a los choques es:

$$\left. \frac{dp_x}{dt} \right|_{\text{choques}} = -\frac{p_x}{\tau} \quad (5)$$

- En estado estacionario, la Suma de (3) y (5) debe ser cero.

$$-\frac{p_x}{\tau} - nq\mathcal{E}_x = 0 \quad (6)$$

- Y el ímpetu promedio por electrón queda

$$\langle p_x \rangle = -q\tau\mathcal{E}_x \quad (7)$$

Deriva de portadores

Velocidad de arrastre o deriva

En estado estacionario, como era de esperar, los electrones tienen una velocidad media neta promedio en dirección x , ver figura 2.

$$\langle v_x \rangle = \frac{\langle p_x \rangle}{m_e^*} = \frac{-q\tau\mathcal{E}_x}{m_e^*} \quad (8)$$

- Realmente, durante un periodo de tiempo dado, los electrones se mueven de manera aleatoria en cualquier dirección (agitación térmica). Sin embargo, según (8) existe una deriva neta promedio de un electrón en respuesta al campo eléctrico aplicado.

Deriva de portadores

Densidad de corriente de arrastre o deriva

La densidad de corriente resultante de la deriva neta de electrones está dada por el número de electrones que cruzan la unidad de área en la unidad de tiempo ($n \cdot \langle v_x \rangle$) multiplicado por la carga de los electrones $-q$.

$$J_x = -q \cdot n \cdot \langle v_x \rangle \quad (9)$$

- Reemplazando (8) en (9)

$$J_x = \frac{n \cdot q^2 \tau \mathcal{E}_x}{m_e^*} \quad (10)$$

- La densidad de corriente de arrastre es proporcional al campo eléctrico

Deriva de portadores: Conductividad y Movilidad

Conductividad

Ley de Ohm: $J_x = \sigma \cdot \mathcal{E}_x$

$$\sigma = \frac{n \cdot q^2 \tau}{m_e^*} \quad (11)$$

Movilidad

- Otra forma de expresar la conductividad $\sigma(\Omega^{-1} \text{m})^{-1}$ es:

$$\sigma = qn\mu_n \quad \text{donde} \quad \mu_n \equiv \frac{q\tau}{m_n^*} \quad (12)$$

La movilidad del electrón μ_n describe la "facilidad" con que los electrones se desplazan en el material.

- También podemos expresar la movilidad

$$\mu_n = -\frac{\langle v_x \rangle}{\mathcal{E}_x} \quad (13)$$

Deriva de portadores: Conductividad y Movilidad

Densidad de corriente J

Finalmente la densidad de corriente se puede expresar en función de la movilidad.

$$J_x = qn\mu_n\mathcal{E}_x \quad (14)$$

Hasta acá hemos considerado que la corriente está gobernada principalmente por electrones.

Conducción de huecos

Para considerar la conducción de huecos debemos cambiar:

- $n \longrightarrow p$
- $-q \longrightarrow +q$
- $\mu_n \longrightarrow \mu_p$
- Entonces $+\langle v_x \rangle / \mathcal{E}_x$

Deriva de portadores: Conductividad y Movilidad

Corriente de arrastre de huecos y electrones

$$J_x = (qn\mu_n + qp\mu_p)\mathcal{E}_x = \sigma \cdot \mathcal{E}_x \quad (15)$$

Deriva de portadores: Conductividad y Movilidad

Efectos de la temperatura y el dopado sobre la movilidad

- Cuando varios procesos de colisión compiten:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{vib}} + \frac{1}{\tau_{imp}} \quad (16)$$

- Y por lo tanto, movilidad resultante es

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{vib}} + \frac{1}{\mu_{imp}} \quad (17)$$

Deriva de portadores: Conductividad y Movilidad

Resistencia

- En un *cristal perfecto* a $0K$, $R = 0$.
- En *metales puros*, R depende de las **oscilaciones de la red**.
- En *aleaciones*, R depende de **impurezas** principalmente.
- En *semiconductores*, ambos fenómenos contribuyen.

Dependencia de μ con la temperatura

$$\mu_{imp} = C \cdot T^{3/2} \quad (18)$$

La constante C depende del metal y de la cantidad de impurezas.

$$\mu_{vib} = D \cdot T^{-3/2} \quad (19)$$

Cuando la temperatura aumenta, aumentan la frecuencia y la amplitud de las vibraciones.

Deriva de portadores: Conductividad y Movilidad

Resistencia

La movilidad general, sumando ambos efectos:

$$\mu^{-1} = C^{-1} \cdot T^{-3/2} + D^{-1} \cdot T^{3/2} \quad (20)$$

Metal:

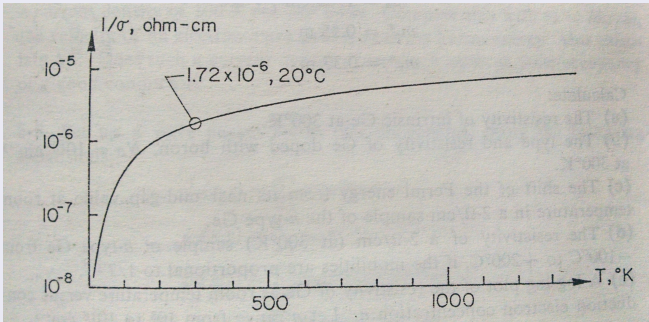
$$\mu \approx D \cdot T^{-3/2} \quad (21)$$

$$\sigma = en\mu = enDT^{-3/2} \quad (22)$$

$$\rho = \frac{T^{3/2}}{enD} \quad (23)$$

Deriva de portadores: Conductividad y Movilidad

Resistividad vs Temperatura en un muestra de Cu



Deriva de portadores: Conductividad y Movilidad

Resistividad en un Semiconductor extrínseco

La resistividad de un semiconductor, como medida del dopado:

Ej: TIPO P: $J \approx J_h$

$$\rho = \frac{1}{ep\mu_p} \cong \frac{1}{eN_a\mu_p}$$

Resistividad en un Semiconductor extrínseco

La resistividad de un semiconductor a $T < T_{amb}$:

- Banda de Conducción posee $n \approx cte$
- Banda de Valencia posee $p \approx cte$
- n y p dadas principalmente por las impurezas

La resistividad de un semiconductor a $T \sim T_{amb}$:

- predomina μ_{vib} como en el metal.

Deriva de portadores: Conductividad y Movilidad

Resistividad en un Semiconductor extrínseco

La resistividad de un semiconductor a $T > T_{amb}$:

- Al aumentar la temperatura, los pares e-h aumentan exponencialmente.
- La dependencia de T en μ queda enmascarada por el aumento de portadores
- Baja ρ

Resistividad en un Semiconductor intrínseco

- p y n son proporcionales a $T^{3/2}$
- $\sigma = \frac{1}{\rho} = e(p\mu_p + n\mu_n)$
- La resistividad decae exponencialmente

Deriva de portadores: Conductividad y Movilidad

Resistividad vs Temperatura en un Semiconductor

