

Índice

<i>TEMA 2: Conducción de Corriente</i>	2.1
2.1. INTRODUCCIÓN	2.1
2.2. MECANISMOS DE CONDUCCIÓN DE CORRIENTE	2.3
2.3. CONDUCCIÓN POR ARRASTRE: LEY DE OHM	2.3
2.4. CONDUCCIÓN POR DIFUSIÓN	2.10
2.5. CORRIENTES TOTALES DE e^- Y h^+ . RELACIÓN DE EINSTEIN.	2.12

Tema 2

Conducción de Corriente

2.1.- Introducción

En el tema anterior se ha modelado la situación de equilibrio termodinámico deduciendo un conjunto de ecuaciones que nos permiten calcular la concentración de electrones y de huecos en un semiconductor.

Hay que tener en cuenta que, en equilibrio termodinámico, los e^- y los h^+ están en continuo movimiento puesto que poseen energía cinética de origen térmico y realizan pequeños desplazamientos debido a sus continuos choques con los obstáculos de la red cristalina: átomos de la red cristalina y átomos de impurezas principalmente. Este movimiento térmico es aleatorio: de ahí que no exista un movimiento neto de portadores y, por lo tanto, $\overline{J_{neta}} = 0$.

En este movimiento aleatorio, entre choques, los e^- y los h^+ suelen alcanzar velocidades del orden de $v_{th} \approx 10^7 \text{ cm/s}$ a $T = 300 \text{ °K}$.

Sólo cuando el semiconductor es perturbado, tiene lugar una respuesta neta de portadores dando lugar a una corriente eléctrica.

Pues bien, la acción o respuesta de los portadores a esa causa externa es el objetivo de este tema y del siguiente capítulo.

En los semiconductores existen tres tipos primarios de respuesta: arrastre, difusión, y los procesos de generación-recombinación. En este tema vamos a describir los dos primeros poniendo especial énfasis en las constantes que los caracterizan. Aunque se estudien individualmente, se entiende que los diversos tipos de respuesta pueden darse - y de hecho se dan- simultáneamente dentro de un semiconductor dado.

2.2.- MECANISMOS DE CONDUCCIÓN DE CORRIENTE

Mecanismo de arrastre: producido por la aplicación de un campo eléctrico externo o variación de potencial. Es similar al que tiene lugar en los metales y matemáticamente se expresa por la ley de Ohm.

Mecanismo de difusión: responsable directo de muchas de las aplicaciones de los semiconductores en electrónica. Es más específico de los semiconductores y se produce por la existencia de gradientes en las concentraciones de e^- y h^+ ; es decir, por las variaciones espaciales de las concentraciones de e^- y h^+ .

2.3.- CONDUCCIÓN POR ARRASTRE

El arrastre o deriva es, por definición, el movimiento de una partícula cargada en respuesta a un campo eléctrico aplicado. En un semiconductor, este mecanismo puede explicarse, de forma cualitativa, como sigue: al aplicar a un semiconductor un \vec{E} (ver Figura 2.1a), la fuerza resultante sobre los portadores tiende a acelerar a los h^+ (de carga $+q$) en la dirección del \vec{E} y a los e^- (de carga $-q$) en sentido contrario. Ahora bien, debido a las colisiones con la red cristalina (átomos de la red agitados térmicamente y átomos de impurezas ionizadas) la aceleración de los portadores se ve interrumpida. El resultado neto (Figura 2.1b) es un movimiento de las cargas positivas en la dirección del \vec{E} (las cargas negativas se moverían en sentido contrario) pero con sucesivos períodos de aceleración y desaceleración por choque. Desde el punto de vista macroscópico el movimiento neto de cada tipo de portador puede ser descrito en términos de una velocidad de arrastre o de deriva, v , constante (Figura 2.1c). Es decir, a escala macroscópica, el movimiento de arrastre no es otra cosa que todos los portadores de un mismo tipo moviéndose a velocidad constante, en el mismo sentido (h^+) o en sentido contrario (e^-) al \vec{E} aplicado.

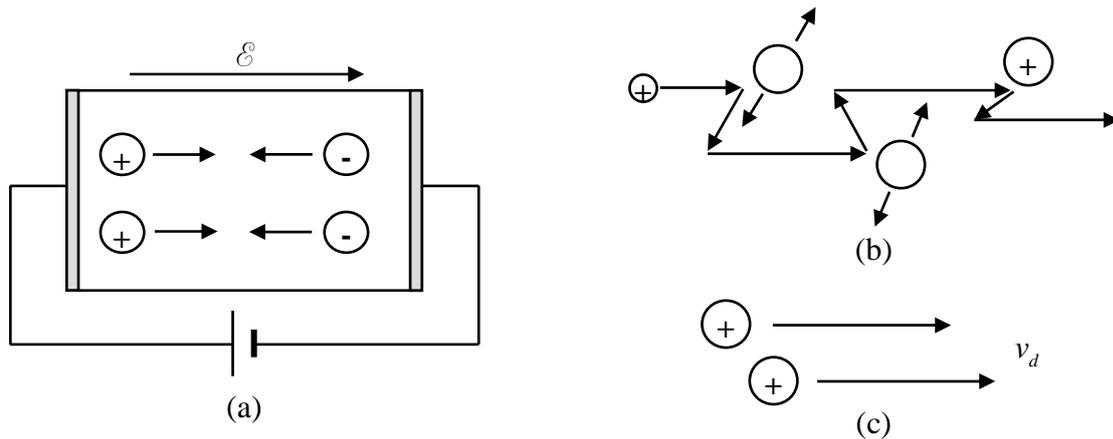


Figura 2.1.- Visualización del mecanismo de arrastre: (a) movimiento de los portadores en una barra de semiconductor polarizada; (b) desplazamiento por arrastre de un hueco a escala microscópica o atómica; (c) desplazamiento por arrastre a escala macroscópica.

Nota: Indudablemente, este movimiento de arrastre en respuesta al \vec{E} aplicado está realmente superpuesto al movimiento de agitación térmica. Sin embargo, basta recordar que este último es aleatorio, con corriente neta nula, para entender que no contribuye al transporte de corriente y conceptualmente se puede despreciar.

Deducción de la expresión de la corriente de arrastre

Para ello vamos a suponer una barra de material semiconductor, de longitud L y sección A .

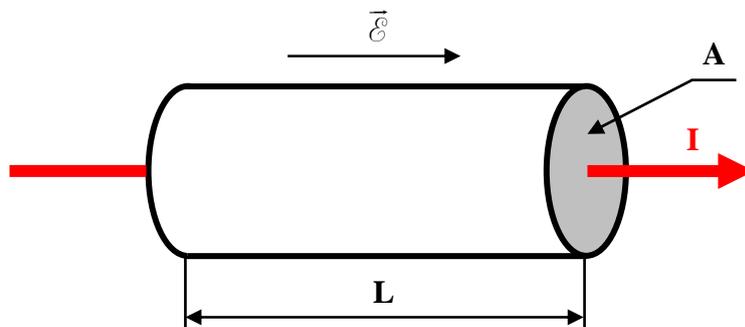


Figura 2.2.- Campo eléctrico aplicado y corriente resultante en la barra de material semiconductor objeto de estudio

$c \equiv$ concentración de portadores

$v \equiv$ velocidad de los portadores

$$L = v \cdot T$$

Nº de portadores que atraviesan A en un tiempo $T \Rightarrow c \cdot L \cdot A = c \cdot A \cdot v \cdot T$

Carga que atraviesa A en un tiempo T $\Rightarrow q \cdot c \cdot A \cdot v \cdot T$

$$J \equiv \frac{\text{carga}}{t \cdot A} = q \cdot c \cdot v$$

Trasladando este resultado al caso de los e^- y los h^+ tenemos:

$$\begin{aligned} \vec{J}_{n, \text{arrastre}} &= -q \cdot n \cdot \vec{v}_n \\ \vec{J}_{p, \text{arrastre}} &= q \cdot p \cdot \vec{v}_p \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta (ver Figura. 2.3) que para valores pequeños y moderados del \vec{E} la velocidad de arrastre de los e^- y de los h^+ es proporcional al \vec{E} , se puede escribir:

$$\begin{aligned} \vec{v}_n &= -\mu_n \vec{E} \\ \vec{v}_p &= \mu_p \vec{E} \end{aligned}$$

Siendo μ , “**movilidad**”, la constante de proporcionalidad.

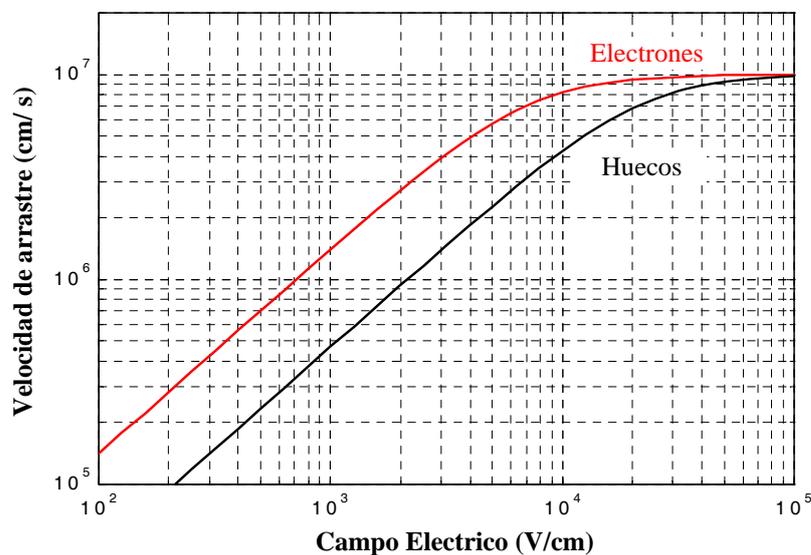


Figura 2.3.- Medida de la velocidad de arrastre de portadores en silicio ultrapuro a temperatura ambiente, en función del campo eléctrico aplicado.

Para valores elevados del \vec{E} , la velocidad de arrastre se hace comparable a la velocidad térmica y se satura al valor de $\approx 10^7 \text{ cm/s}$.

Introduciendo las expresiones de \vec{v} en las de la \vec{J} resulta:

$$\begin{aligned}\vec{J}_{n,arrastre} &= q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{\mathcal{E}} \\ \vec{J}_{p,arrastre} &= q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{\mathcal{E}}\end{aligned}\tag{2.1}$$

Es decir, la aplicación de un $\vec{\mathcal{E}}$ conduce a corrientes de arrastre de e^- y h^+ en el sentido del $\vec{\mathcal{E}}$.

Puesto que en un semiconductor existen, en general, los dos tipos de portadores, la corriente total debida al mecanismo de arrastre, $\vec{J}_{T,arrastre}$, vendrá dada por la expresión:

$$\begin{aligned}\vec{J}_{T,arrastre} &= \vec{J}_{n,arrastre} + \vec{J}_{p,arrastre} \\ \vec{J}_{T,arrastre} &= q(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \cdot \vec{\mathcal{E}}\end{aligned}$$

La expresión anterior la podemos escribir como:

$$\vec{J}_{T,arrastre} = \sigma \cdot \vec{\mathcal{E}}\tag{2.2}$$

Siendo $\sigma = \text{conductividad} = \sigma_n + \sigma_p = q \cdot n \cdot \mu_n + q \cdot p \cdot \mu_p$

La expresión (2.2) es la conocida como “**ley de Ohm**” que representa la proporcionalidad entre densidad de corriente y el $\vec{\mathcal{E}}$ aplicado.

A partir de la conductividad podemos deducir la resistividad que presenta un semiconductor

$$\begin{aligned}\rho &= 1/\sigma = 1/(\sigma_n + \sigma_p) \\ 1/\rho &= \sigma_n + \sigma_p = 1/\rho_n + 1/\rho_p\end{aligned}\tag{2.3}$$

Observando las ecuaciones (2.2) y (2.3) resulta que la σ total de un semiconductor equivale a la suma de las σ de los gases de e^- y h^+ , mientras que, la ρ total equivale a la asociación en paralelo de dichos gases.

Es de señalar, además, que en los semiconductores extrínsecos la concentración de uno de los portadores es mucho mayor que la del otro, mientras que según la Figura 2.3, sus movilidades son comparables. De ahí que en un semiconductor extrínseco la conductividad total será:

$$\begin{aligned}\sigma_{Total} &\approx \sigma_{Mayoritarios} \\ \text{Tipo } n &: \sigma_T \approx \sigma_n \\ \text{Tipo } p &: \sigma_T \approx \sigma_p\end{aligned}$$

Por el contrario, en un semiconductor intrínseco

$$n = p = n_i$$

de ahí que deban tenerse en cuenta las contribuciones tanto de los e^- como de los h^+ . Es decir, en un semiconductor intrínseco,

$$\sigma_{Total} = q \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) = \sigma_i \quad \text{“conductividad intrínseca”}$$

Movilidad

Finalmente, para terminar este apartado, vamos a pararnos en el parámetro “ μ ”, parámetro fundamental en el mecanismo de arrastre de los e^- y de los h^+ .

- Observando la definición de μ , podemos interpretarla como la mayor o menor facilidad con que los e^- y los h^+ responden ante un $\vec{\mathcal{E}}$ aplicado.
- Unidades estándar: $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$

- No es un parámetro constante, sino que es función de la temperatura y de la concentración total de impurezas (en la Figura 2.4 se observa la dependencia de μ con el dopaje y en la Figura 2.5 se ve la dependencia de μ con la temperatura).
- En la mayoría de los semiconductores $\mu_n > \mu_p$, y esta relación para dopajes usuales suele ser de $\mu_n \approx 2\mu_p$. De ahí que, a igualdad de dopaje, sean mejores conductoras las muestras de tipo n.

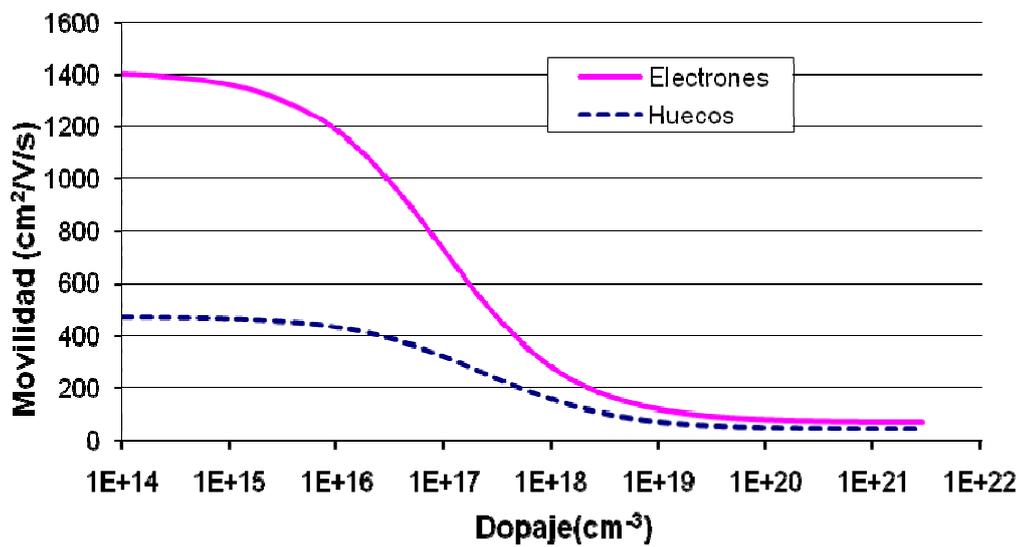
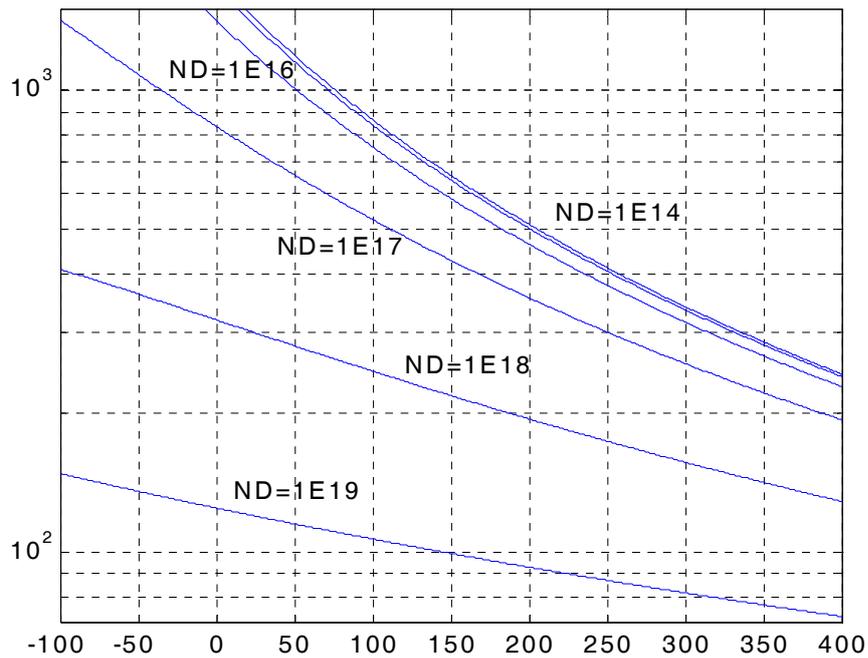
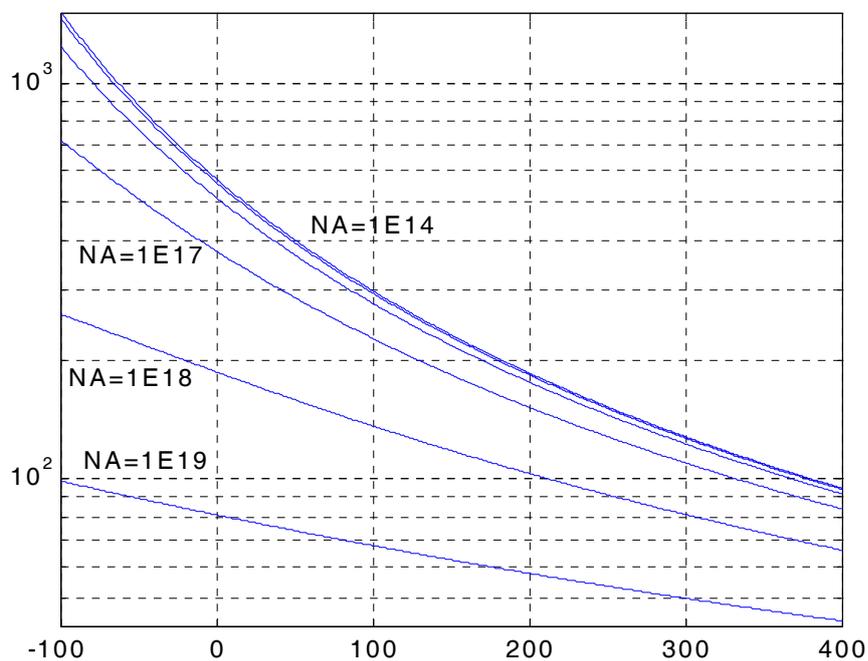


Figura 2.4.- Movilidades de portadores en función de la concentración de impurezas para el Si a temperatura ambiente. μ_n es la movilidad de los electrones; μ_p es la movilidad de huecos.



(a)



(b)

Figura 2.5.- Dependencia con la temperatura de las movilidades de (a) electrones y (b) huecos para muestras de silicio con dopados que van desde $10^{14}/\text{cm}^3$ hasta $10^{19}/\text{cm}^3$. En la muestra de menor dopado, $\mu \propto T(K)^{-n}$. Este resultado es evidente en las gráficas $\log \mu$ en función de $\log T(K)$.

2.4.- CONDUCCIÓN POR DIFUSIÓN

La difusión es un conocido fenómeno de la cinética de los gases de partículas clásicas que tiene su origen en el movimiento aleatorio de agitación térmica que las hace recorrer todo el recinto que las encierra. Después de un choque cada partícula tiene la misma probabilidad de dirigirse en cualquier dirección, lo que hace que exista un flujo neto de partículas de las regiones más pobladas a las menos pobladas que tiende a homogeneizar su concentración. Es decir, la difusión se produce siempre que existan variaciones espaciales (gradientes) de la concentración de partículas libres y no tiene nada que ver con el hecho de que estas partículas estén cargadas o no.

Ahora bien, si las partículas tienen carga, entonces los flujos por difusión transportan carga eléctrica y constituyen, por tanto, corrientes eléctricas.

Deducción de la expresión de la corriente de difusión

Supongamos que en un semiconductor existe una concentración de portadores, c , que es función de la posición (Figura. 2.6). El flujo neto de partículas que atraviesa una determinada superficie perpendicular a x será proporcional al $\vec{\nabla}c$ pero cambiado de signo, es decir,

$$\vec{F} \propto -\vec{\nabla}c \Rightarrow \vec{F} = -D\vec{\nabla}c \quad \text{Ley de Fick}$$

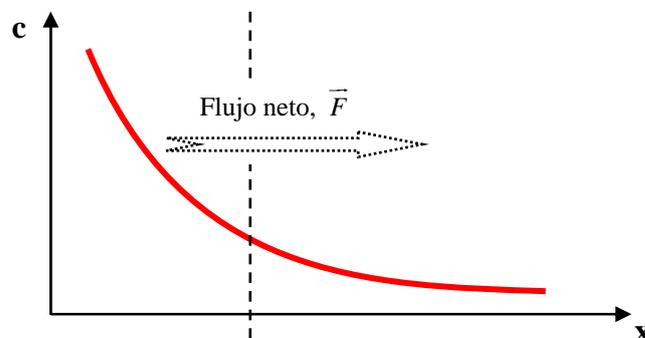


Figura 2.6.- Concentración de portadores en función de x . Flujo o movimiento de partículas desde las zonas más pobladas a las zonas menos pobladas.

Si las partículas poseen carga eléctrica, el flujo trae consigo una corriente:

$$\vec{J} = q_{particula} \vec{F} = -q_{particula} D \vec{\nabla} c$$

Si trasladamos dicha ecuación al caso de los electrones y los huecos:

$$\begin{aligned} \vec{J}_{n,difusión} &= q D_n \vec{\nabla} n \\ \vec{J}_{p,difusión} &= -q D_p \vec{\nabla} p \end{aligned} \quad (2.4)$$

Teniendo en cuenta que en un semiconductor existen en general e^- y h^+ , resulta:

$$\vec{J}_{difusión} = \vec{J}_{n,difusión} + \vec{J}_{p,difusión} = q \left(D_n \vec{\nabla} n - D_p \vec{\nabla} p \right) \quad (2.5)$$

La constante de proporcionalidad, D, parámetro fundamental en el mecanismo de difusión recibe el nombre de “**Coefficiente de Difusión**”.

En un tema posterior se demostrará que los mecanismos de arrastre y de difusión no son totalmente independientes, de ahí que exista una relación entre los parámetros que los caracterizan. Esta relación, conocida como “**Relación de Einstein**” se verá posteriormente y nos dice que:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \quad (2.6)$$

El coeficiente de difusión, D es, por lo tanto, una característica del semiconductor, del portador y de la temperatura. Y, al igual que μ depende también de la concentración total de impurezas. Sus unidades habituales son cm^2/s .

2.5.- CORRIENTES TOTALES DE ELECTRONES Y HUECOS

Resumiendo todo lo dicho anteriormente, y teniendo en cuenta que en un semiconductor, en el caso más general, pueden darse ambos mecanismos, resulta que:

$$\vec{J}_{Total} = \vec{J}_n + \vec{J}_p = \vec{J}_{a,n} + \vec{J}_{d,n} + \vec{J}_{a,p} + \vec{J}_{d,p}$$

$$\vec{J}_{Total} = \sigma \vec{E} + q(D_n \vec{\nabla} n - D_p \vec{\nabla} p) \quad (2.7)$$

De la ecuación (2.7) se infiere que, aunque tengamos los mismos gradientes en las concentraciones de e^- y h^+ , el término correspondiente a la difusión no es generalmente nulo ya que $D_n > D_p$ por la relación de Einstein. Además, es de señalar que la ley de Ohm sólo se cumple en semiconductores dopados de forma homogénea en los cuales $\vec{\nabla} n = \vec{\nabla} p = 0$.