

TEMA 1.1

SEMICONDUCTORES

CUD

TEMA 1
SEMICONDUCTORES. DIODO.
FUNDAMENTOS DE
ELECTRÓNICA



Centro Universitario
de la Defensa Zaragoza

17 de febrero de 2015

TEMA 1.1 – SEMICONDUCTORES

- Introducción. Metales, aislantes y semiconductores
- Modelo enlace covalente
- Estadística de semiconductores
- Corriente en semiconductores



TEMA 1.1 – SEMICONDUCTORES

- Introducción. Metales, aislantes y semiconductores
- Modelo enlace covalente
- Estadística de semiconductores
- Corriente en semiconductores

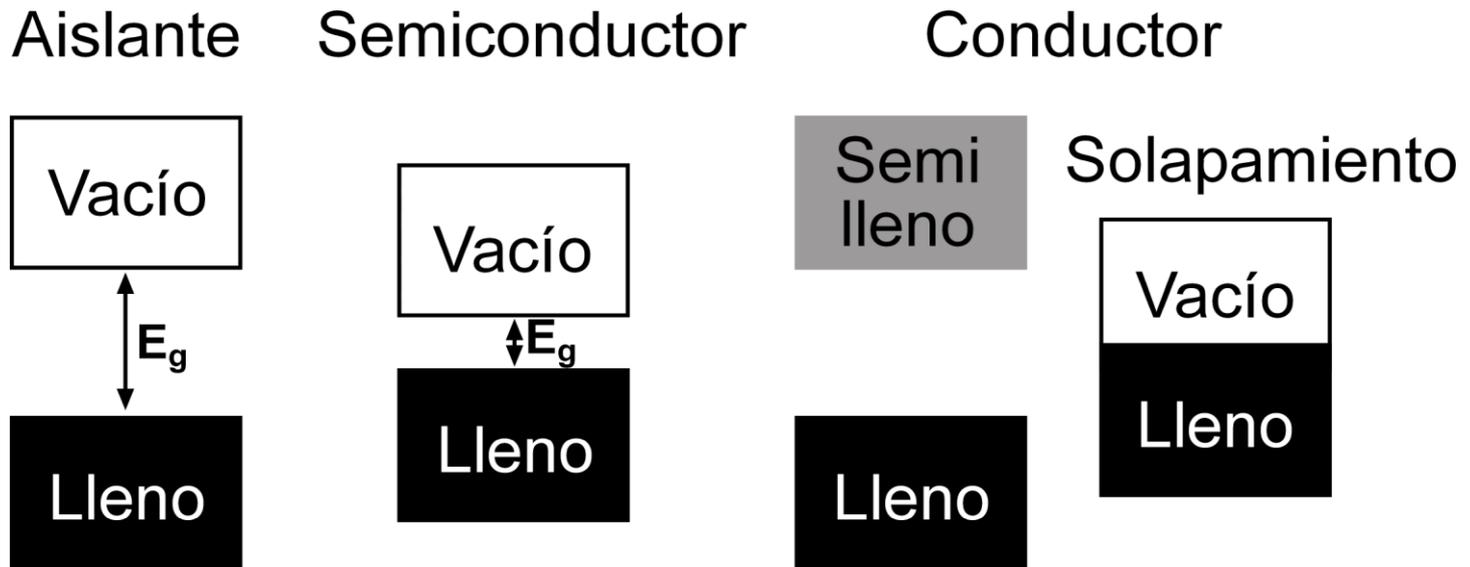


METALES, AISLANTES Y SEMICONDUCTORES

Descripción fenomenológica

- A $T = 0$ K:
 - Los metales son conductores de la electricidad
 - Los aislantes y los semiconductores no son conductores de la electricidad
- Conforme se aumenta la temperatura
 - Los metales mantienen la conductividad casi constante, con un ligero descenso
 - Los semiconductores (intrínsecos) incrementan su conductividad exponencialmente
 - Los aislantes no conducen
- La conductividad de los semiconductores puede controlarse de forma muy precisa mediante procesos tecnológicos (dopados o extrínsecos)

METALES, AISLANTES Y SEMICONDUCTORES



METALES, AISLANTES Y SEMICONDUCTORES

Descripción según el tipo de enlace entre átomos

➤ Tres tipos de enlaces

- Iónico
- Metálico
- Covalente

➤ Enlace iónico

- Los electrones están fuertemente ligados a los átomos: aislantes
- Los iones se separan cuando se encuentran disueltos: es posible la conducción

METALES, AISLANTES Y SEMICONDUCTORES

➤ Enlace metálico

- Los electrones exteriores están desligados de los átomos, formando una nube electrónica distribuida en todo el sólido y que sirve de unión entre los núcleos atómicos
- Los electrones exteriores no están ligados a ningún átomo en concreto, por lo que pueden moverse libremente bajo la acción de un campo eléctrico) conductores

➤ Enlace covalente

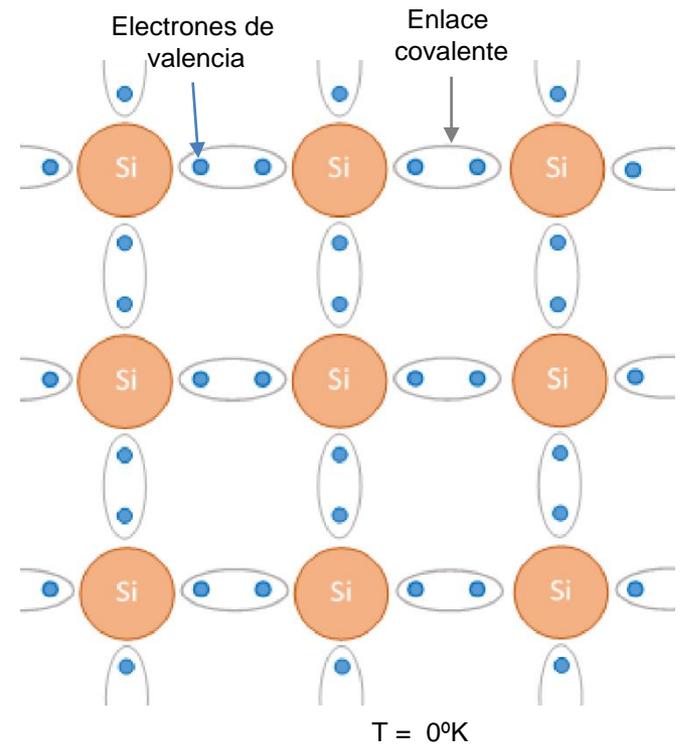
- Los electrones de la capa más externa de cada átomo se comparten con otros átomos, formando un enlace entre ellos.
- Cada par de electrones forma un enlace entre átomos

METALES, AISLANTES Y SEMICONDUCTORES

										III	IV	V			
										B					
											Si	P			
											Ge				

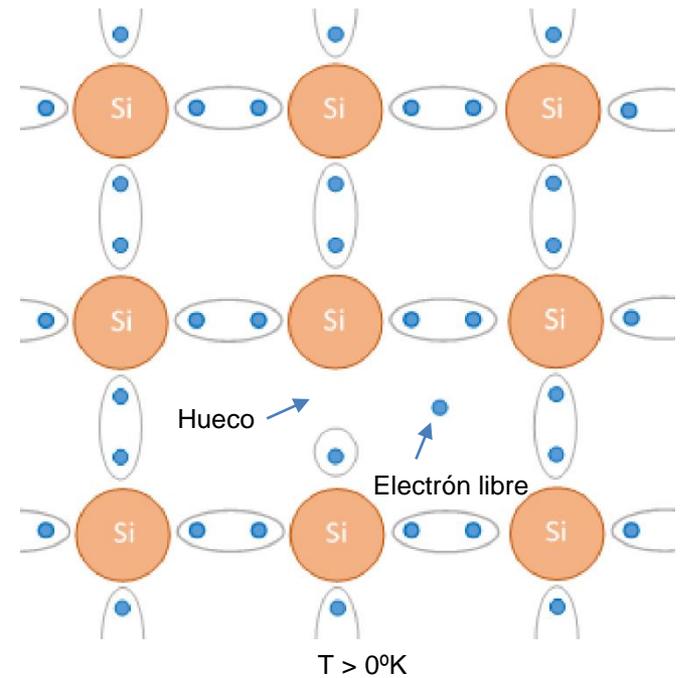
METALES, AISLANTES Y SEMICONDUCTORES

- Por ejemplo, el silicio tiene cuatro electrones en su capa más externa: forma cuatro enlaces covalentes con otros tantos átomos de silicio.
- En principio (cierto a $T = 0 \text{ K}$), los electrones que forman el enlace se comparten por dos átomos y no pueden desplazarse por el cristal bajo la acción de un campo eléctrico: aislante.



METALES, AISLANTES Y SEMICONDUCTORES

- Sin embargo, al aumentar la temperatura, la agitación térmica de los átomos de silicio puede provocar la ruptura de algunos enlaces, liberándose un electrón.
- Todos los electrones que han sido liberados pueden moverse por el cristal bajo la acción de un campo eléctrico: conductor



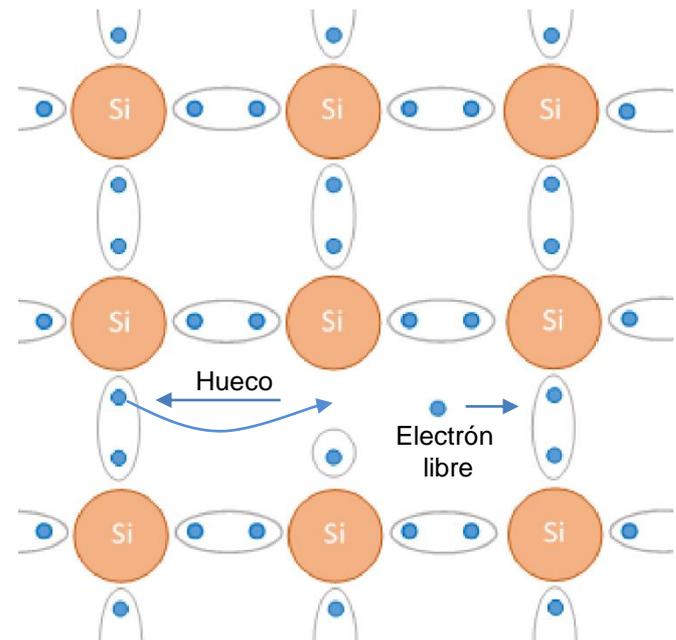
TEMA 1.1 – SEMICONDUCTORES

- Introducción. Metales, aislantes y semiconductores
- **Modelo enlace covalente**
- Estadística de semiconductores
- Corriente en semiconductores



CONCEPTO DE HUECO

- La conducción se lleva a cabo de dos formas:
 - Por los electrones libres
 - Por los electrones ligados, que van ocupando sucesivamente diferentes enlaces
- El movimiento de los electrones ligados equivale al de "una partícula" (hueco) de carga positiva y que se mueve en sentido contrario



CONDUCTIVIDAD

➤ La conductividad viene dada por:

$$\sigma = q\mu_n n + q\mu_p p$$

donde:

n: concentración de electrones

p: concentración de huecos

μ_n : movilidad de los electrones

μ_p : movilidad de los huecos

q: valor absoluto de la carga del electrón

TIPOS DE SEMICONDUCTORES

Intrínsecos:

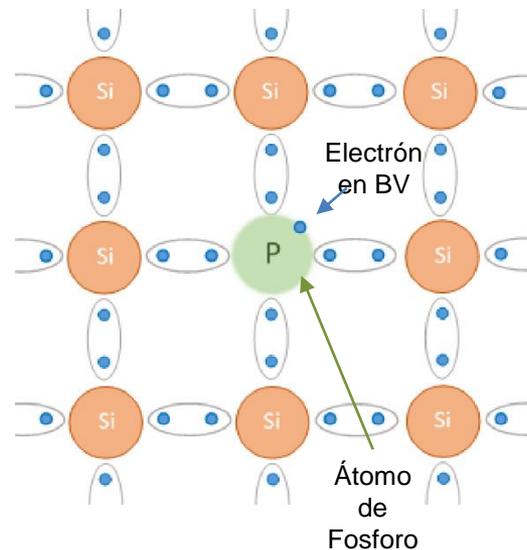
- No contienen impurezas que modifiquen la conductividad
- Los huecos y electrones libres se crean por pares mediante la ruptura de enlaces covalentes
- $n = p = n_i$ concentración intrínseca de portadores
- $\sigma = q(\mu_n + \mu_p)n_i$

Extrínsecos o dopados:

- Contienen impurezas para modificar de forma controlada la conductividad
- Los átomos de las impurezas sustituyen a los átomos del semiconductor (Si, p.e.)
- En general, $n \neq p$

DOPADO TIPO N

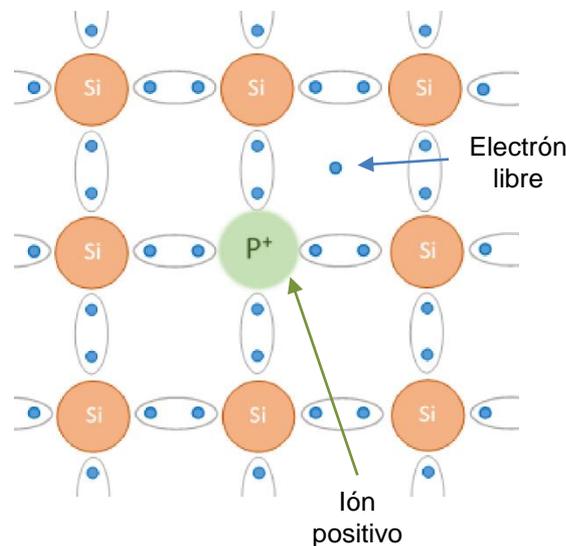
- Sustitución de un átomo de silicio por algún átomo de la columna V de la tabla periódica (impurezas donadoras)
- Se requiere poca energía para liberar uno de los electrones de la capa de valencia
- El resto forma enlace covalente con cuatro átomos de silicio vecinos



P: [Ne]3s²3p³
Impurezas donadoras
Semiconductor
Tipo n

DOPADO TIPO N

- Se queda un átomo fijo con carga positiva
- A temperatura ambiente y con una concentración de impurezas (N_D) suficientemente alta $n \approx N_D \gg p$: la conductividad depende principalmente del movimiento de los electrones, cuyo número está determinado por la concentración de impurezas donadoras



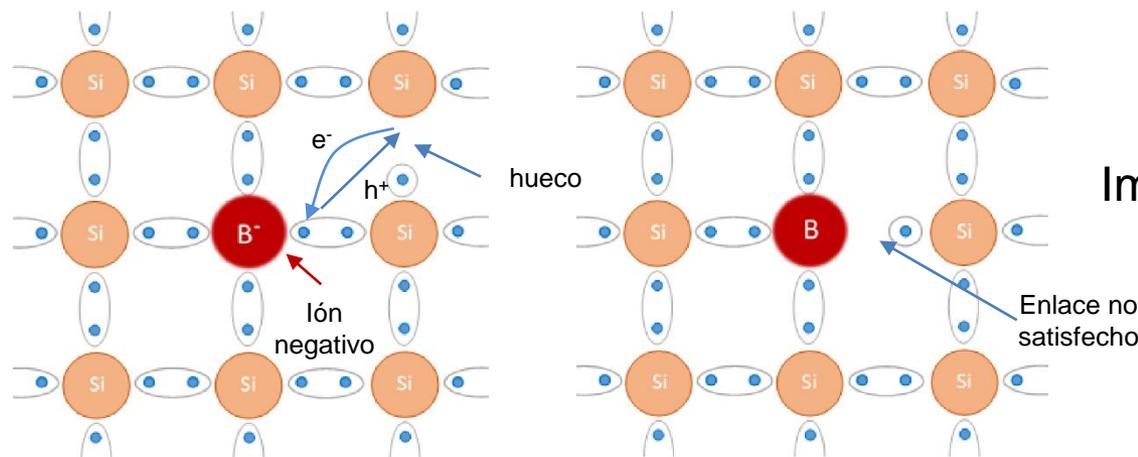
$$\sigma \approx q\mu_n n \approx q\mu_n N_D$$



Impurezas donadoras
Semiconductor
Tipo n

DOPADO TIPO P

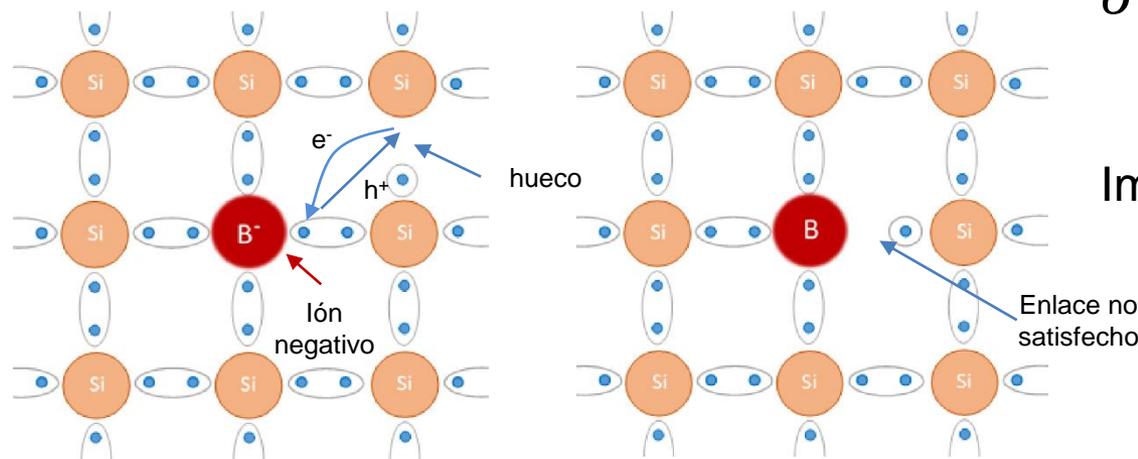
- Sustitución de un átomo de silicio por algún átomo de la columna III de la tabla periódica (impurezas aceptadoras)
- Queda un enlace covalente no satisfecho, que fácilmente atrapa electrones de enlaces covalentes vecinos: se genera un hueco
- Así el átomo de la impureza puede formar enlace covalente con cuatro átomos de silicio vecinos



Impurezas aceptadoras
Semiconductor
Tipo p

DOPADO TIPO P

- Se queda un átomo fijo con carga negativa
- A temperatura ambiente y con una concentración de impurezas (N_A) suficientemente alta $p \approx N_A \gg n$ la conductividad depende principalmente del movimiento de los huecos, cuyo número está determinado por la concentración de impurezas aceptadoras



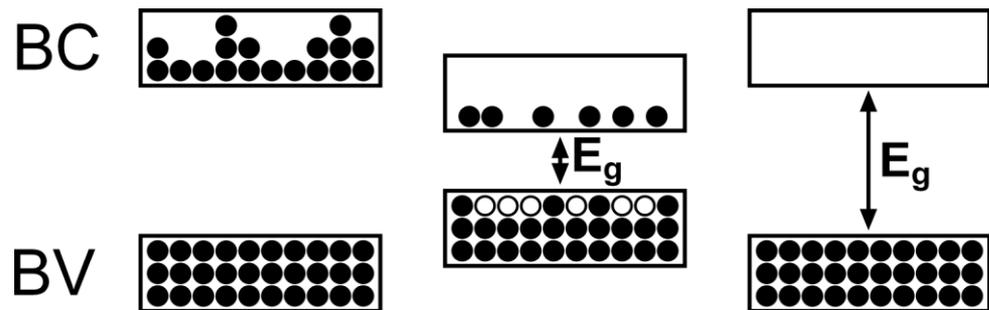
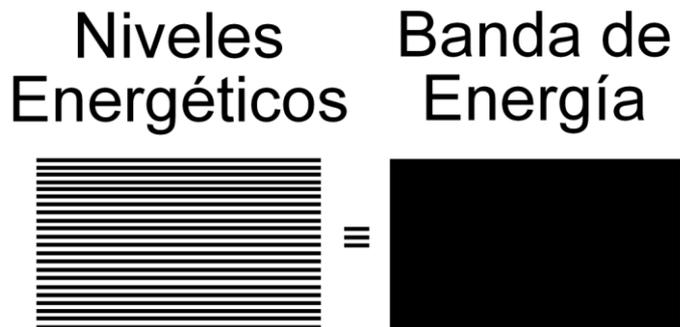
$$\sigma \approx q\mu_p p \approx q\mu_p N_A$$



Impurezas aceptadoras
Semiconductor
Tipo p

MODELO DE BANDAS DE ENERGÍA

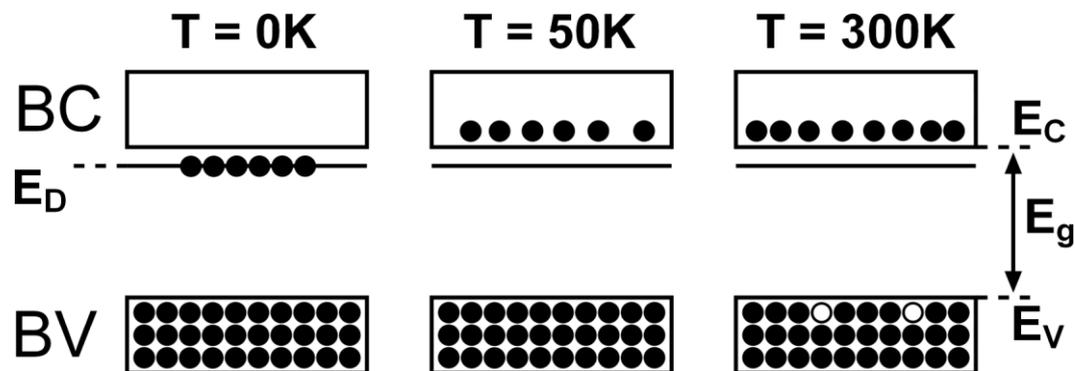
- Las bandas están formadas por "estados" discretos, pero separados por muy poca energía: se pueden tratar de forma continua.
- A 0 K, la banda de valencia de un semiconductor está completa y no puede haber conducción.
- Para que la banda de valencia contribuya a la conducción, debe generarse un hueco. Para ello, un electrón de la banda de valencia debe pasar a la de conducción



MODELO DE BANDAS DE ENERGÍA

Semiconductores tipo N

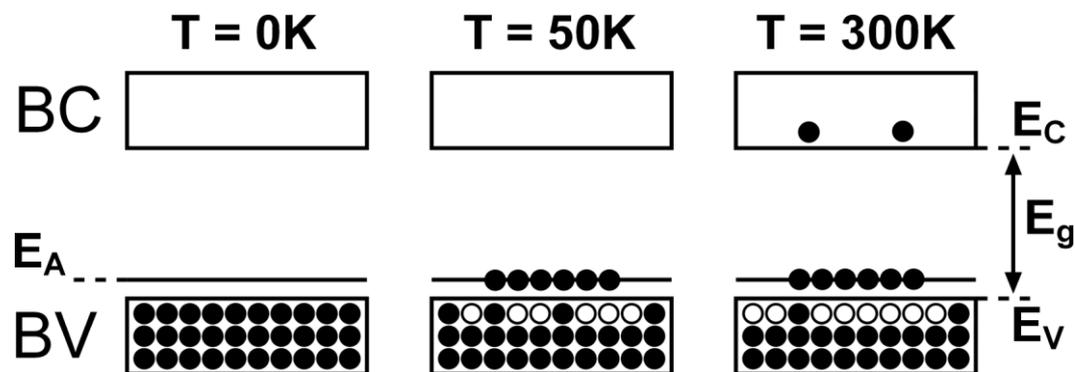
- La introducción de impurezas donadoras equivale a la presencia de un nivel energético en el interior de la banda prohibida, cercano al fondo de la banda de conducción



MODELO DE BANDAS DE ENERGÍA

Semiconductores tipo P

- La introducción de impurezas aceptadoras equivale a la presencia de un nivel energético en el interior de la banda prohibida, cercano a la banda de valencia



DEFINICIÓN DE ELECTRONVOLTIO (eV)

- Es la unidad de energía utilizada comúnmente en el estudio de semiconductores
- Se define como la energía potencial electrostática puesta en juego al llevar un electrón de una posición a otra con una diferencia de potencial de 1V.

$$1eV = 1V \cdot q = 1V \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}C = 1,6 \cdot 10^{-19}J$$

TEMA 1.1 – SEMICONDUCTORES

- Introducción. Metales, aislantes y semiconductores
- Modelo enlace covalente
- **Estadística de semiconductores**
- Corriente en semiconductores



ESTADÍSTICA DE SEMICONDUCTORES

- En este apartado daremos respuesta a las siguientes preguntas:
 - ¿Cuántos electrones hay en la banda de conducción?
 - ¿Cuántos huecos hay en la banda de valencia?
 - ¿Cuántas impurezas están ionizadas?
- Para ello:
 - Primero veremos cuántos estados pueden ocupar los electrones
 - Después aprenderemos cómo averiguar cuáles de ellos están realmente ocupados
 - Finalmente, calcularemos el número de electrones y huecos disponibles para la conducción

ESTADÍSTICA DE SEMICONDUCTORES

- No todas las energías están permitidas para electrones y huecos.
- Los electrones sólo pueden estar en ciertos estados con una energía determinada
- La diferencia de energía entre estados dentro de una banda es muy pequeña y se puede hablar de una banda continua de estados
- La densidad de estados depende de la energía (la separación entre estados disminuye para niveles alejados de la banda prohibida)

DISTRIBUCIÓN DE FERMI-DIRAC

La función de distribución de Fermi-Dirac

- Los estados de las bandas de conducción y valencia no están uniformemente ocupados
- Las funciones de distribución en Física Estadística proporcionan la probabilidad de que un estado esté ocupado
- Los electrones están controlados por la estadística de Fermi-Dirac:

$$f(E, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_f}{kT}}}$$

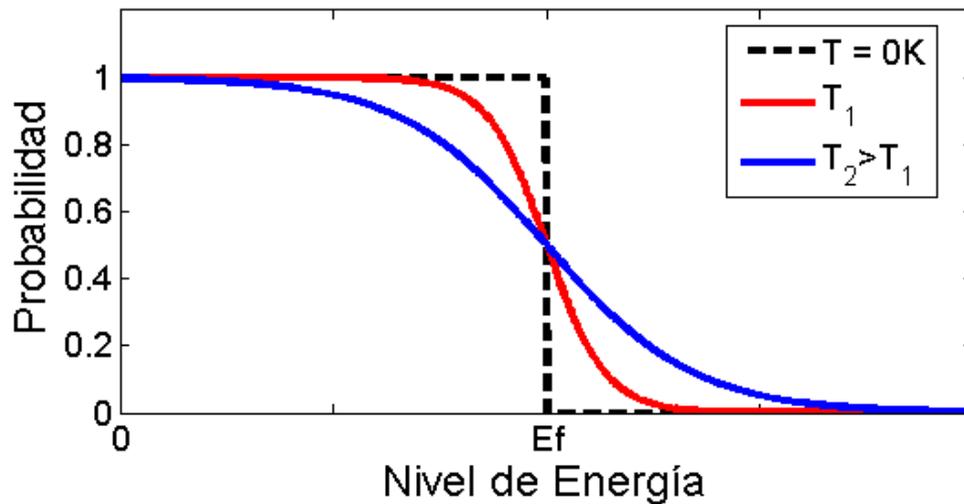
- $f(E, T)$: función de distribución de Fermi-Dirac. Es la probabilidad de que un estado de energía E esté ocupado por un electrón. Toma valores entre 0 y 1
- E_f : nivel de Fermi o potencial electroquímico
- k : constante de Boltzmann

DISTRIBUCIÓN DE FERMI-DIRAC

- Con $T = 0$ K, función de distribución abrupta

$$\begin{cases} \text{si } E < E_f, f(E, 0K) = 1 \\ \text{si } E > E_f, f(E, 0K) = 0 \end{cases}$$

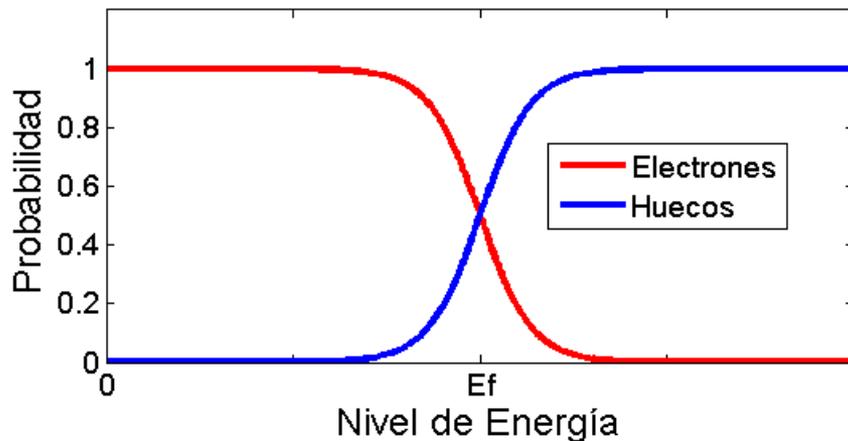
- Con $T > 0$ K, se ensancha la distribución (tanto más cuanto mayor sea T) y se cumple $f(E = E_f, T) = \frac{1}{2} \forall T$
- $f(E, T)$ es antisimétrica respecto a E_f .



DISTRIBUCIÓN DE FERMI-DIRAC

- $f(E, T)$ es la probabilidad de que un estado de energía E esté ocupado por un electrón y $(1 - f(E, T))$ la probabilidad de que esté vacío. Por tanto, $(1 - f(E, T))$ proporciona la probabilidad de que un estado de la banda de valencia esté ocupado por un hueco.

$$f_H(E, T) = 1 - f(E, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_f - E}{kT}}}$$



El nivel de Fermi: es un potencial termodinámico, como la presión y la temperatura: el nivel de Fermi es constante en un sistema en equilibrio termodinámico

APROXIMACIÓN DE MAXWELL-BOLTZMANN

- Cuando la energía para la que se quiere evaluar la función de Fermi-Dirac está alejada del nivel de Fermi, se usan las siguientes expresiones aproximadas (conocidas como funciones de distribución de Maxwell-Boltzmann):

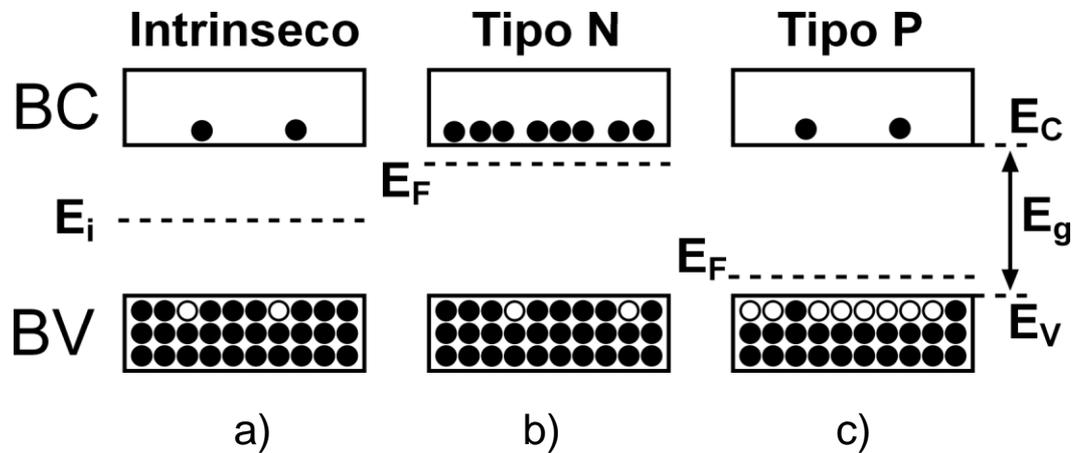
$$f(E, T) \approx e^{-\frac{E-E_f}{kT}}$$

$$f_H(E, T) \approx e^{-\frac{E_f-E}{kT}} = e^{\frac{E-E_f}{kT}}$$

- ¿Qué valor toma $f(E)$ en las bandas de conducción y valencia?
- ¿Cuál es la posición del nivel de Fermi?

NIVEL DE FERMI vs DOPAJE

- a) En un semiconductor intrínseco (por simetría de $f(E)$): $E_f \equiv E_i \approx \frac{E_c + E_v}{2}$ (el nivel de Fermi está aproximadamente en la mitad de la banda prohibida)
- b) Tipo N, E_f está más cerca de la banda de conducción que de la de valencia
- c) Tipo P, E_f está más próximo a la banda de valencia que a la de conducción



CONCENTRACIÓN DE PORTADORES

En base a lo anterior, se puede demostrar que....

Concentración de electrones
en la banda de conducción:

$$n_0 = N_c e^{-\frac{E_c - E_f}{kT}} \quad (1)$$

Concentración de huecos
en la banda de valencia:

$$p_0 = N_v e^{-\frac{E_v - E_f}{kT}}$$

$$\left. \begin{array}{l} n_0 = N_c e^{-\frac{E_c - E_f}{kT}} \\ p_0 = N_v e^{-\frac{E_v - E_f}{kT}} \end{array} \right\} n_0 p_0 = N_c N_v e^{-\frac{E_v - E_c}{kT}} = N_c N_v e^{-\frac{-E_g}{kT}}$$

N_c : densidad efectiva de estados en la banda de conducción

N_v : densidad efectiva de estados en la banda de valencia

Dependen del tipo de semiconductor y de la temperatura

$$N_c = A_c T^{\frac{3}{2}}$$
$$N_v = A_v T^{\frac{3}{2}}$$

CONCENTRACIÓN INTRÍNSECA

- En un semiconductor intrínseco, $n_i = p_i$ y $n_i p_i = n_i^2$. Por tanto:

$$n_i = p_i = \sqrt{N_c N_v} e^{\frac{-E_g}{2kT}}$$

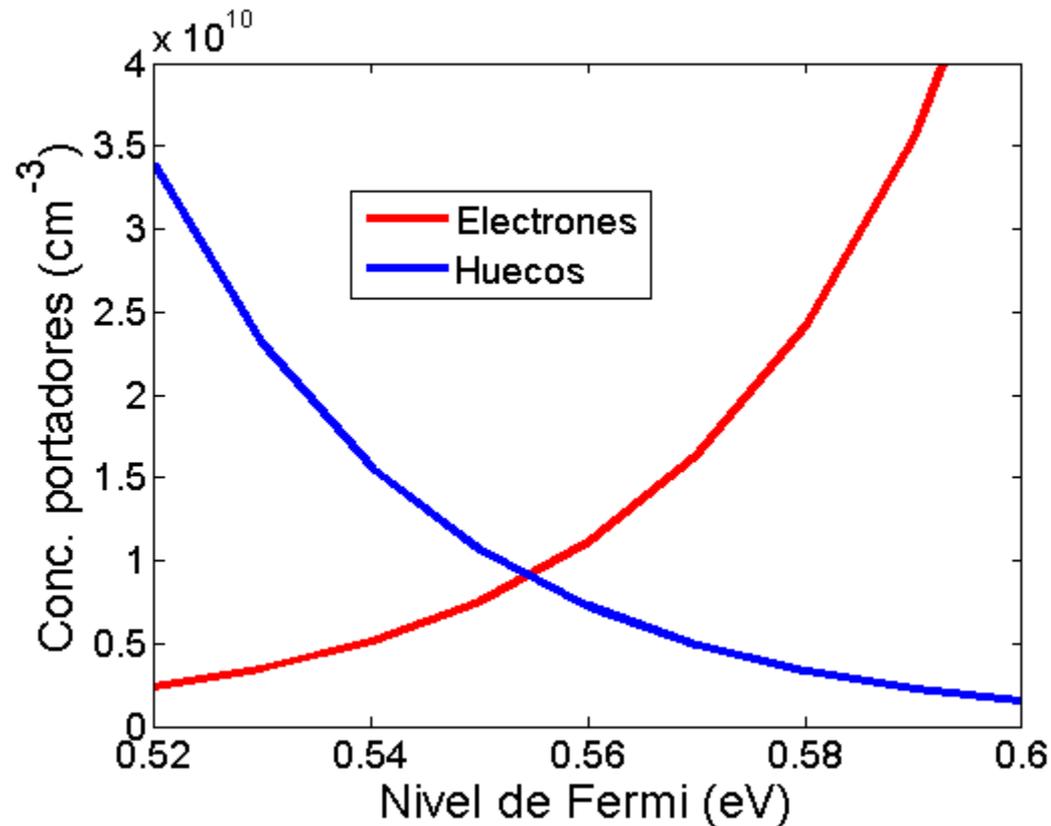
La concentración intrínseca de portadores en un semiconductor viene determinada por la anchura de la banda prohibida.

Nivel de Fermi intrínseco (E_i):

- Igualando n_i y p_i (ecuación 1) y despejando:

$$N_c e^{-\frac{E_c - E_i}{kT}} = N_v e^{\frac{E_v - E_i}{kT}} \quad E_i = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}$$

NIVEL DE FERMI INTRÍNSECO



Para el caso del Si

Origen de energías en banda de valencia

$$E_V = 0 \text{ eV}$$

$$E_C = 1.12 \text{ eV}$$

Aproximación:

$$E_i \approx 0.56 \text{ eV}$$

Corrección:

$$N_c(300\text{K}) = 2.82 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_v(300\text{K}) = 1.83 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$E_i = 0.5544 \text{ eV}$$

LEY DE ACCIÓN DE MASAS

- En general, para semiconductores extrínsecos (dopados):

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

- Cuanto mayor sea la concentración de un tipo de portadores, menor es la concentración del otro tipo ($n_0 = n_i^2 / p_0$). Ésta es una condición válida en equilibrio.
- Se habla entonces de portadores mayoritarios y minoritarios.

CONCENTRACIÓN EXTRÍNSECA

- Una forma conveniente de expresar las concentraciones de portadores es referirlas a las concentraciones intrínsecas:

$$\begin{aligned}n_0 &= n_i e^{\frac{E_f - E_i}{kT}} \\ p_0 &= n_i e^{\frac{E_i - E_f}{kT}}\end{aligned} \quad (2)$$

- Para calcular las concentraciones de portadores en semiconductores extrínsecos con estas expresiones hay que conocer la posición del nivel de Fermi. No obstante, usualmente se realizan algunas aproximaciones que lo evitan.

SEMICONDUCTORES TIPO N

➤ Ecuación de Neutralidad

$$n_0 = p_0 + N_D^+$$

➤ Normalmente se realizan las siguientes aproximaciones:

- A las temperaturas de interés => Ionización total: $N_D^+ \approx N_D$
- En casos prácticos $N_D \gg n_i \Rightarrow n_0 \gg p_0$

$$n_0 \cong N_D \quad p_0 \cong \frac{n_i^2}{N_D} \quad E_c - E_f = kT \ln \frac{N_c}{N_D}$$

SEMICONDUCTORES TIPO P

➤ Ecuación de Neutralidad

$$p_0 = n_0 + N_A^-$$

➤ Normalmente se realizan las siguientes aproximaciones:

- A las temperaturas de interés => Ionización total: $N_A^- \approx N_A$
- En casos prácticos $N_A \gg n_i \Rightarrow p_0 \gg n_0$

$$p_0 \cong N_A \quad n_0 \cong \frac{n_i^2}{N_A} \quad E_f - E_v = kT \ln \frac{N_v}{N_A}$$

SEMICONDUCTORES COMPENSADOS

- Dopados con los dos tipos de impurezas:

$$p_0 + N_D^+ = n_0 + N_A^-$$

- Normalmente se realizan las siguientes aproximaciones:
 - Todas las impurezas están ionizadas.
 - Si $N_D > N_A$: tipo N, $n_0 \approx N_D - N_A$
 - Si $N_A > N_D$: tipo P, $p_0 \approx N_A - N_D$

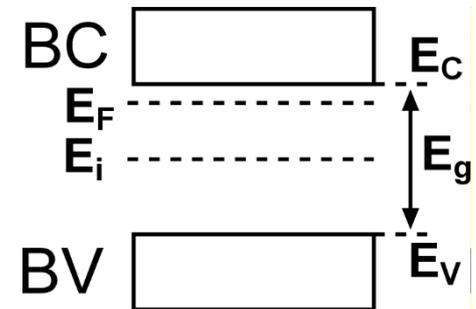
CALCULO DE CONCENTRACIONES

Ejemplo. Semiconductor intrínseco. Sea una muestra de silicio a 300K.

$$N_c = 2,82 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3} \quad N_v = 1,83 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$$
$$k = 86,2 \cdot 10^{-6} \text{eV/K} \quad E_g = 1,12 \text{eV}$$

a) Calcule la densidad de portadores intrínsecos.

$$n_i = p_i = \sqrt{N_c N_v} e^{\frac{-E_g}{2kT}} \cong 10^{10} \text{cm}^{-3}$$



b) Calcule la posición del nivel de Fermi intrínseco

El nivel de Fermi intrínseco se localizará en el centro de la banda prohibida. Tomando el origen de energías en la banda de valencia ($E_V = 0$):

$$E_i \cong \frac{E_g}{2} = 0,56 \text{ eV}$$

CALCULO DE CONCENTRACIONES

Ejemplo. Semiconductor extrínseco. Sea una muestra de silicio a 300K.

a) Calcule la densidad de portadores intrínsecos.

$$n_i = p_i = \sqrt{N_c N_v} e^{\frac{-E_g}{2kT}} \cong 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

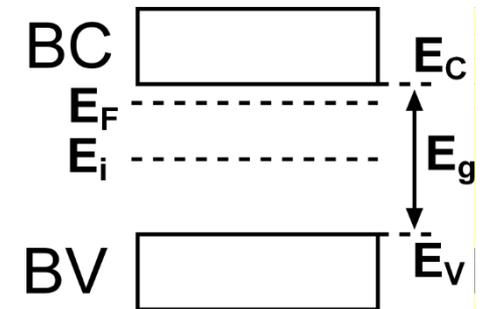
b) Calcule la densidad de electrones y huecos si se dopa con fósforo en una concentración de 10^{17} cm^{-3} .

El P dopa el Si tipo N ($n_0 > p_0$). A 300 K, habrá ionización completa

Se cumple: $N_D \gg n_i$ ($10^{17} \gg 10^{10}$).

$$n_0 \cong N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$p_0 \cong \frac{n_i^2}{N_D} = 10^3 \text{ cm}^{-3}$$



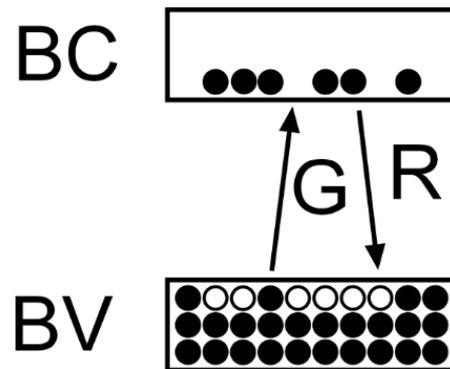
c) Calcule la posición del nivel de Fermi extrínseco.

El nivel de Fermi se desplaza hacia la banda de conducción:

$$n_0 = n_i e^{\frac{E_f - E_i}{kT}} \rightarrow E_f = E_i + kT \ln \left(\frac{n_0}{n_i} \right) = 0,96 \text{ eV}$$

DESEQUILIBRIO TERMODINÁMICO

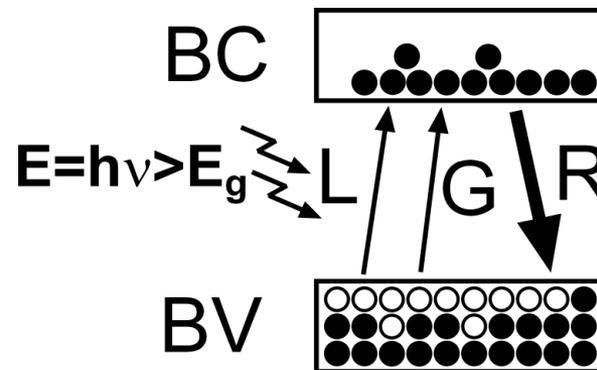
- El equilibrio térmico es un equilibrio **dinámico**, donde los procesos de generación y recombinación de pares electrón-hueco están compensados.



- La concentración de portadores correspondiente al equilibrio térmico (n_0, p_0) se puede alterar mediante la acción de un agente exterior (campo eléctrico, inyección de portadores, iluminación,...). Estudiemos el ejemplo de un semiconductor iluminado.

DESEQUILIBRIO TERMODINÁMICO

- Si la acción exterior (en este caso la iluminación L) es constante en el tiempo se llega a una situación estacionaria, con unas concentraciones de portadores (n , p) diferentes de las del equilibrio pero independientes del tiempo:



$$\left. \begin{array}{l} n = n_0 + \delta n \\ p = p_0 + \delta p \end{array} \right\} np > n_0 p_0 = n_i^2$$

Las concentraciones de portadores ya no vienen descritas por la estadística de Fermi-Dirac

CALCULO DE CONCENTRACIONES

Ejemplo. Semiconductor intrínseco iluminado. Sea una muestra de silicio a 300K.

- a) Calcule la densidad de portadores si la iluminación provoca que el número de electrones se duplique respecto del caso no iluminado:**

Sin iluminación:

$$n_i = p_i = \sqrt{N_c N_v} e^{\frac{-E_g}{2kT}} \cong 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

Con iluminación:

$$n = 2n_i$$

Como la ecuación de neutralidad se sigue cumpliendo y no hay impurezas:

$$p = n = 2n_i$$

CALCULO DE CONCENTRACIONES

Ejemplo. Semiconductor extrínseco iluminado. Sea una muestra de silicio a 300K.

- a) Calcule la densidad de electrones y huecos si la iluminación provoca que el número de electrones se duplique respecto del caso no iluminado con un dopado con fósforo en una concentración de 10^{17} cm^{-3} :**

Sin iluminación:

$$\begin{aligned}n_0 &\cong N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \\p_0 &\cong \frac{n_i^2}{N_D} = 10^3 \text{ cm}^{-3}\end{aligned}$$

Con iluminación:

$$n = 2n_0 = 2N_D$$

Como la ecuación de neutralidad se sigue cumpliendo:

$$p = n - N_D \cong N_D$$

TEMA 1.1 – SEMICONDUCTORES

- Introducción. Metales, aislantes y semiconductores
- Modelo enlace covalente
- Estadística de semiconductores
- **Corriente en semiconductores**



DENSIDAD DE CORRIENTE

- Se define la densidad de corriente en una dirección x , como la carga que atraviesa una superficie perpendicular a dicha dirección por unidad de tiempo y superficie:

$$J_x = \frac{Q}{t \cdot A}$$

- Suponiendo un sólo tipo de portadores (huecos) desplazándose en dirección x a una velocidad media v_{px} se tiene que

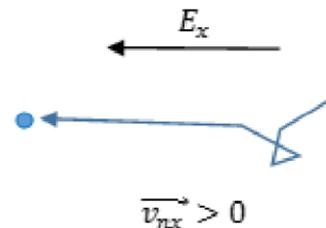
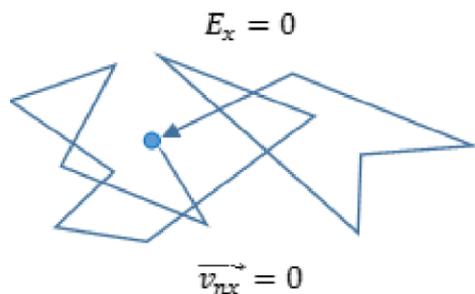
$$J_{px} = \frac{Q}{t \cdot A} = \frac{qp v_{px} t A}{t \cdot A} = qp v_{px}$$

- En general:

$$\vec{J}_p = qp \vec{v}_p \qquad \vec{J}_n = -qn \vec{v}_n$$

CORRIENTE DE ARRASTRE

- Es debida a la presencia de un campo eléctrico que acelera a los electrones y huecos. Se denomina también corriente de deriva (drift).
- En ausencia de campo eléctrico, los portadores se mueven aleatoriamente y no hay un transporte neto de carga.
- Con la presencia de un campo eléctrico, al movimiento aleatorio se superpone una componente que provoca un movimiento neto en la dirección del campo eléctrico.
- El resultado es una velocidad media en la dirección del campo eléctrico que es proporcional al campo eléctrico aplicado:



$$\vec{v}_p \propto \vec{E}$$

$$\vec{v}_n \propto -\vec{E}$$

CORRIENTE DE ARRASTRE

➤ El coeficiente de proporcionalidad se denomina movilidad (μ) y:

- Depende de la temperatura
- Es diferente para electrones y huecos ($\mu_n > \mu_p$)
- Existe una velocidad de saturación (v_{sat})

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \frac{\mu_0 E}{v_{sat}}}$$

➤ Densidad de corriente debida al arrastre de dos tipos de portadores:

$$\left. \begin{aligned} \vec{J}_n &= -qn\vec{v}_n = qn\mu_n\vec{E} \\ \vec{J}_p &= qp\vec{v}_p = qp\mu_p\vec{E} \end{aligned} \right\} \vec{J} = q(n\mu_n + p\mu_p)\vec{E} = \sigma\vec{E} \quad (\text{Ley de Ohm})$$

donde $\sigma \equiv \text{Conductividad. Unidades: } (\Omega\text{cm})^{-1}$

CORRIENTE DE DIFUSIÓN

- La diferente concentración de portadores provoca un flujo de éstos a las zonas de menor concentración
- Es consecuencia del movimiento térmico aleatorio de los portadores
- Se demuestra que:

$$\text{En dirección } x: \quad J_{n,x} = qD_n \frac{\partial n(x)}{\partial x} \quad J_{p,x} = -qD_p \frac{\partial p(x)}{\partial x}$$

$$\text{En general:} \quad \vec{J}_n = qD_n \vec{\nabla} n \quad \vec{J}_p = -qD_p \vec{\nabla} p$$

Donde D_n y D_p se denominan coeficiente de difusión para electrones y huecos respectivamente. (Dimensiones cm^2/s)

CORRIENTE TOTAL

- Sumando las dos contribuciones anteriores a la corriente, la densidad de corriente de electrones y huecos es:

$$\left. \begin{aligned} \vec{J}_n &= qn\mu_n\vec{E} + qD_n\vec{\nabla}n \\ \vec{J}_p &= qp\mu_p\vec{E} - qD_p\vec{\nabla}p \end{aligned} \right\} \vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p$$

- Corriente arrastre \propto concentración: la contribución de los minoritarios es muy pequeña
- Corriente difusión \propto gradiente de la concentración: la contribución de los minoritarios a la corriente puede ser considerable si hay un importante gradiente de concentración

RELACIÓN DE EINSTEIN

- En un semiconductor en equilibrio, las corrientes de difusión y arrastre (para cada tipo de portador) se deben igualar. Para electrones:

$$q\mu_n n \vec{E} = -qD_n \vec{\nabla} n$$

- De esta condición se deriva la Relación de Einstein entre la movilidad y el coeficiente de difusión tanto para electrones como para huecos:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} \qquad \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}$$

- De la relación de Einstein se deduce que un semiconductor con buena movilidad tendrá también un alto cociente de difusión.