

TEMA 6

FÍSICA DE SEMICONDUCTORES

1. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE SEMICONDUCTORES

- 1.1. Características generales de los materiales semiconductores
- 1.2. Configuración electrónica y red cristalina
- 1.3. Generación y recombinación
- 1.4. Dopado de semiconductores

2. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

- 2.1. Estructura de bandas
- 2.2. Concentración de portadores de carga
- 2.3. Nivel de Fermi

3. SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS

- 3.1. Semiconductor tipo-n
- 3.2. Semiconductor tipo-p
- 3.3. Concentración de portadores de carga
- 3.4. Nivel de Fermi

4. CONDUCCIÓN ELÉCTRICA EN SEMICONDUCTORES

- 4.1. Conductividad y Movilidad
- 4.2. Corriente de arrastre
- 4.3. Corriente de difusión

Características de los Semiconductores

- Formados por átomos del **grupo IV** de la tabla periódica (Básicamente, **Silicio** y **Germanio**).
- Banda prohibida, B_g , muy **estrecha**.
- La energía de Fermi se encuentra en medio de la banda prohibida.
- La conductividad depende en gran medida de la **temperatura** y aumenta rápidamente con ella.
- Aparición de dos tipos de portadores de carga: e^- en **BC** y h^+ en **BV**.
- Sus propiedades físicas dependen altamente de la concentración de **impurezas** añadidas al material.



- Versatilidad en el diseño de dispositivos electrónicos y opto-electrónicos.
- La mayoría de estos dispositivos pueden realizarse sobre la misma muestra de semiconductor.
- Integración de muchos dispositivos diferentes en un mismo *chip*.

- Microelectrónica:
Resistencias, diodos, transistores, etc.
- Comunicaciones:
Circuitos de alta y baja frecuencia en sistemas de comunicación.
- Optoelectrónica:
LED, láseres, células fotovoltaicas, etc.

Configuración electrónica de Si y Ge

SILICIO (Si, Z= 14)

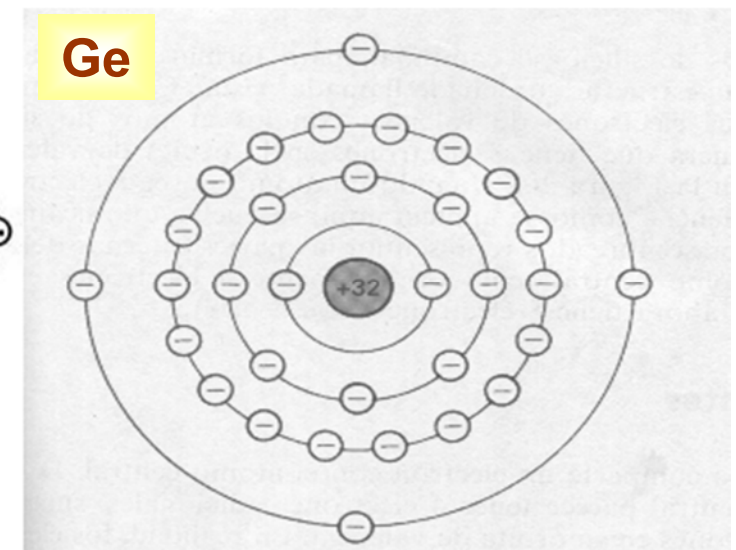
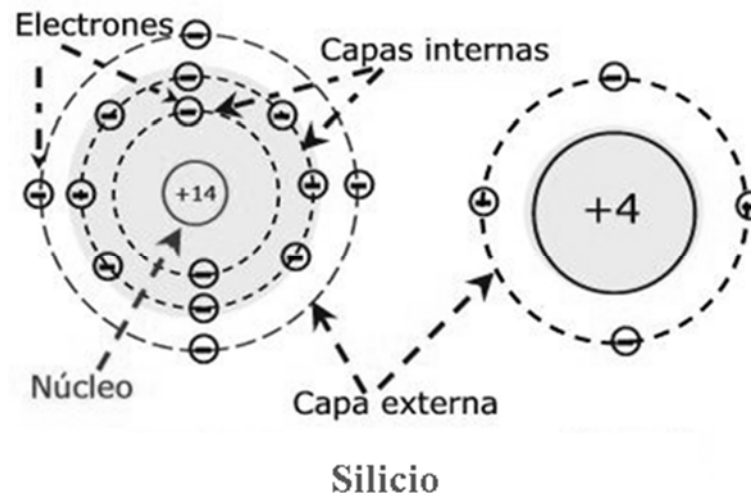
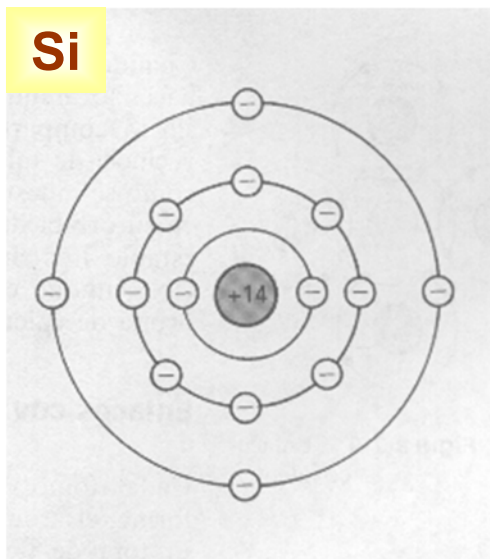
$3s^2p^2$

El átomo de Silicio: tiene 14 protones y 14 electrones. La configuración electrónica de la última capa (*capa de valencia*) es de la forma s^2p^2 .

GERMANIO (Ge, Z= 32)

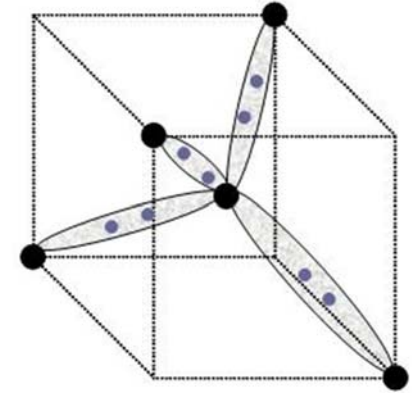
$4s^2p^2$

El átomo de Germanio: 32 electrones y 32 protones en su núcleo. Los últimos 4 electrones se localizan en la capa de valencia.

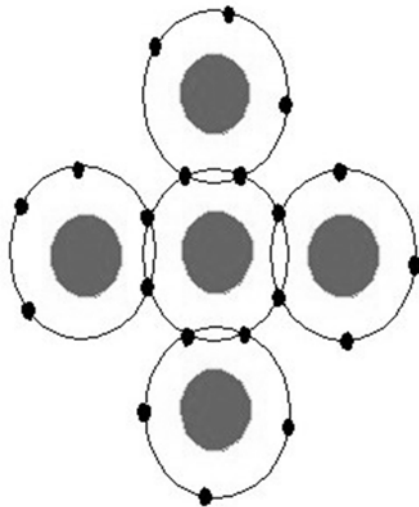


Redes cristalinas de Si y Ge

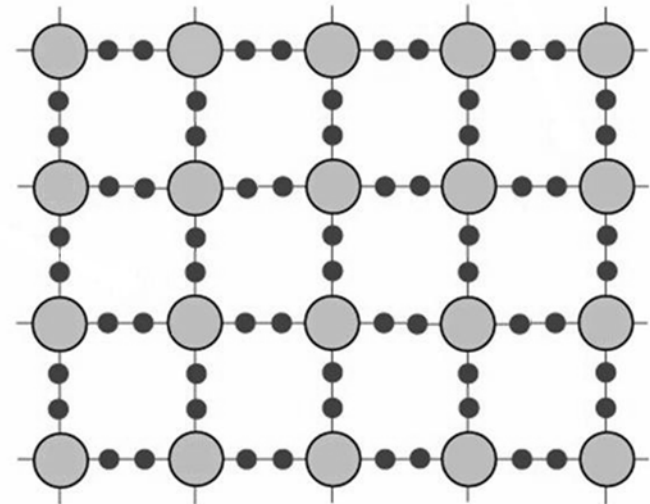
En un **crystal puro de silicio o de germanio**, los átomos están unidos entre sí formando una estructura cristalina que consiste en una repetición regular en tres dimensiones de una celdilla unidad que tiene la forma de tetraedro con un átomo en cada vértice. Al no tener los electrones libertad de movimiento, a bajas temperaturas y en estado cristalino puro, el material actúa como un aislante



Enlaces de un átomo de Si o de Ge con sus cuatro átomos vecinos

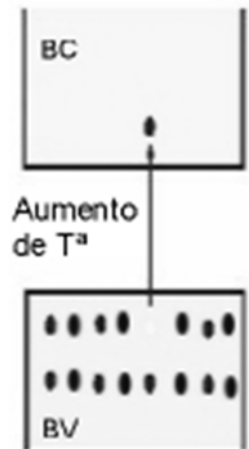


Representación bidimensional de la estructura del Si y del Ge

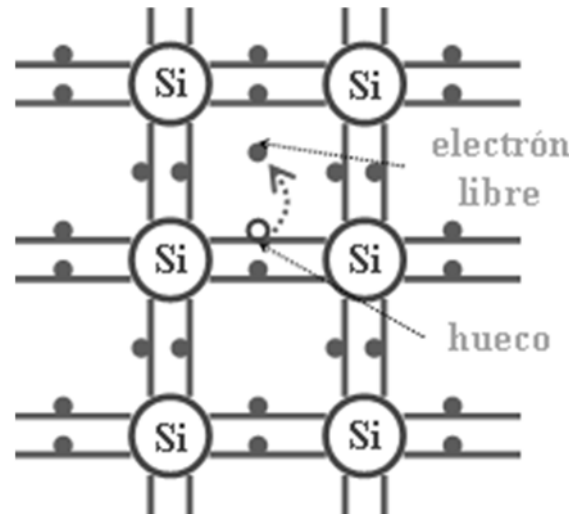


Generación y recombinación

Generación
térmica de
pares e^-/h^+



Generación
óptica de
pares e^-/h^+



Proceso inverso
al de generación

Generación por adición
de impurezas de e^- o h^+

- Se produce al añadir elementos que no están en el grupo IV en la estructura cristalina de un semiconductor.
- Se produce un aumento considerable de e^- o h^+ .
- No se generan pares e^-/h^+ .

Se produce simultáneamente una **GENERACIÓN-RECOMBINACIÓN** de pares e^-/h^+ .

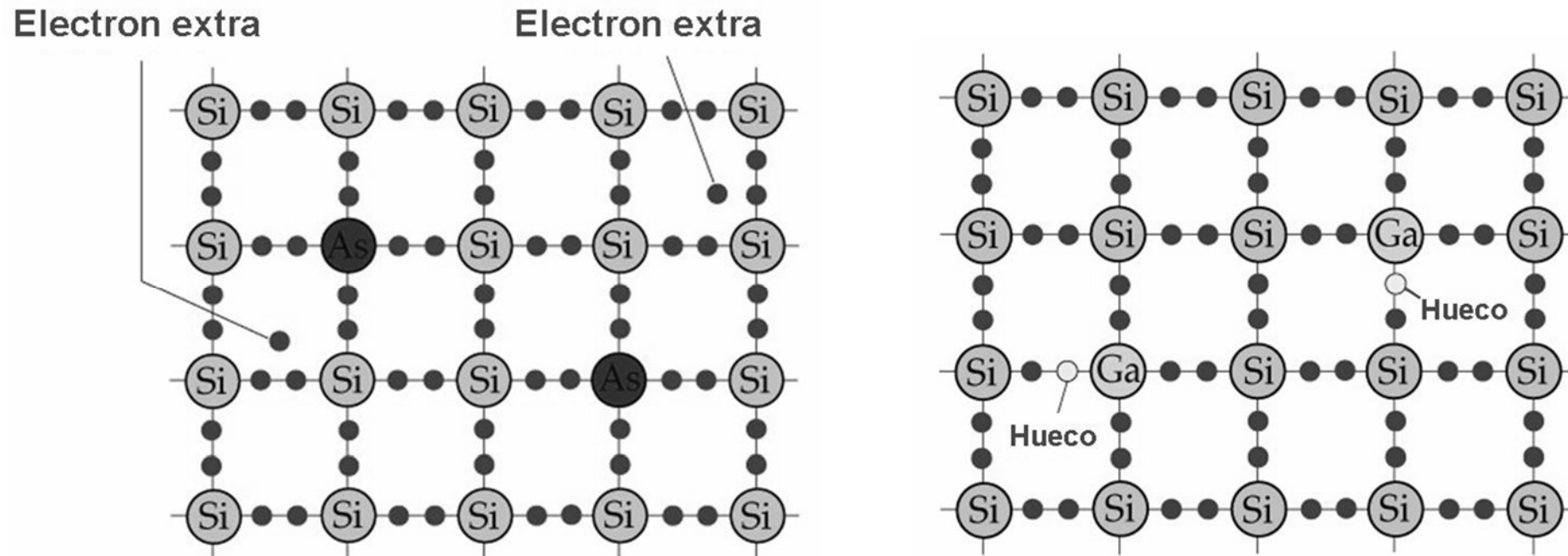
Agentes externos invariables en el tiempo

Equilibrio dinámico con concentraciones de electrones en la BC (n) y huecos en la BV (p)
constantes

- La velocidad de generación depende de la T^a y del proceso concreto que la origina.
- La velocidad de recombinación depende de n y p y de la naturaleza del material.

¿Qué sucede si además de elevar la temperatura por encima de 0 K consideramos la presencia de impurezas?

Introducción de impurezas en el Silicio

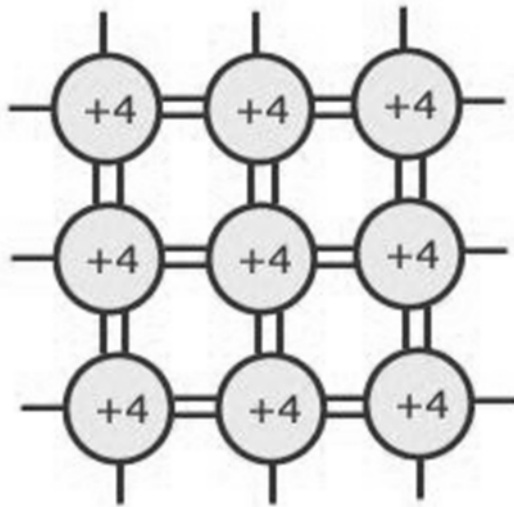


Un semiconductor puro, y por lo tanto con un número igual de huecos y electrones, se denomina **semiconductor intrínseco**. A bajas temperaturas se comporta como un aislante.

Una forma de aumentar la conductividad de un semiconductor es mediante el dopado. Un semiconductor dopado se llama **semiconductor extrínseco**.

Impurificación o dopado de los semiconductores

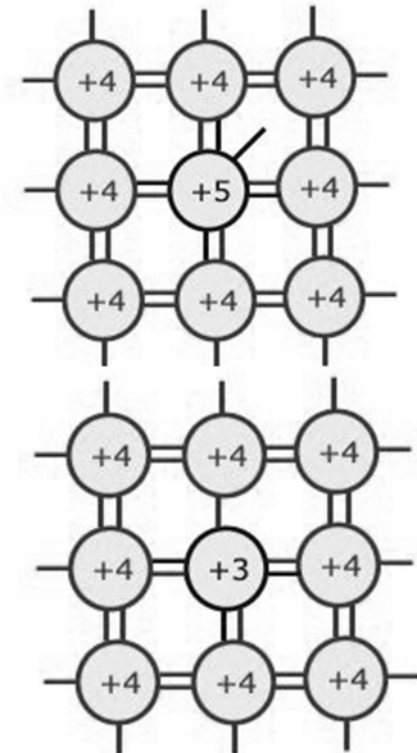
El dopado supone que deliberadamente se añadan **átomos de impurezas** a un cristal intrínseco para modificar su conductividad eléctrica. Un semiconductor dopado se llama **semiconductor extrínseco**.



El dopado no altera la neutralidad eléctrica global del material

Tipo-n

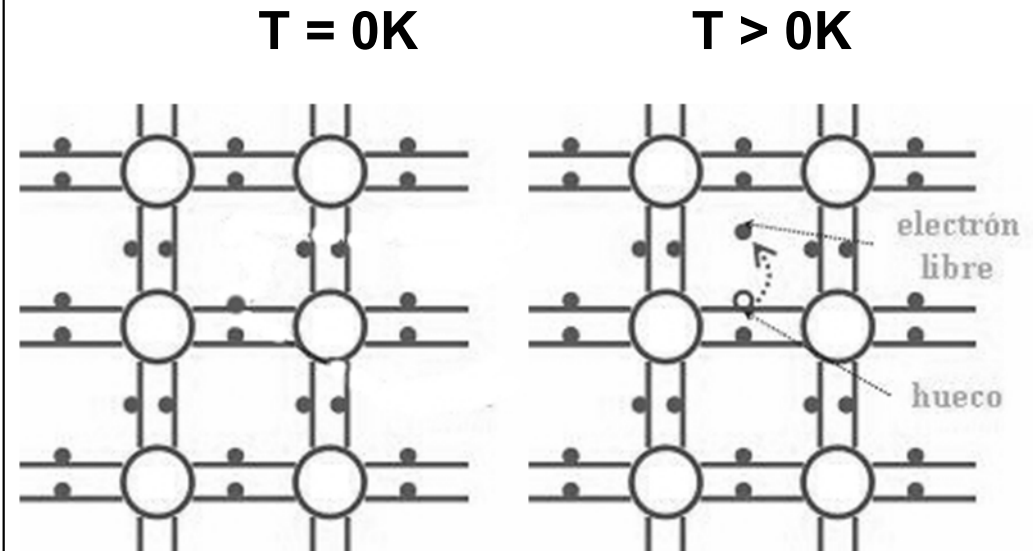
Tipo-p



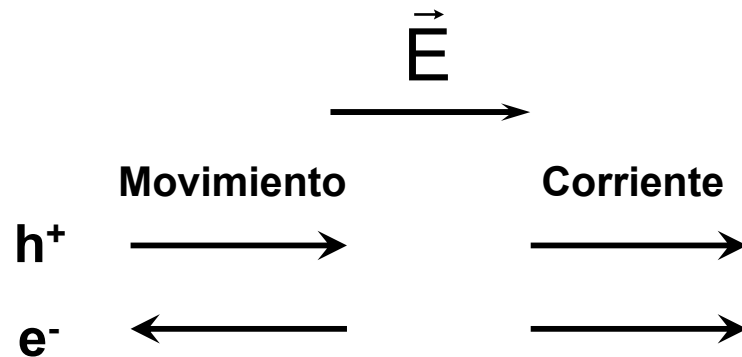
Si la introducción de impurezas se realiza de manera controlada pueden modificarse las propiedades eléctricas en zonas determinadas del material.

SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

- Estructuras cristalinas **sin átomos extraños**.
- Sus propiedades eléctrica están determinadas exclusivamente por la **estructura de bandas del cristal**.
- La **excitación térmica** produce **pares e^-/h^+** .
- Densidad de carga negativa (n) en la BC.
- Densidad de carga positiva (p) en la BV.
- En equilibrio térmico se encuentra la **densidad intrínseca (n_i)** del semiconductor.
- El nivel de Fermi (E_{Fi}) está en el **centro** de la BP.
- Cuanto mayor sea el ancho de la BP (E_g) menores serán n y p .
- Al aplicar un campo eléctrico aparecen **dos movimientos de carga opuestos: conducción bipolar**.

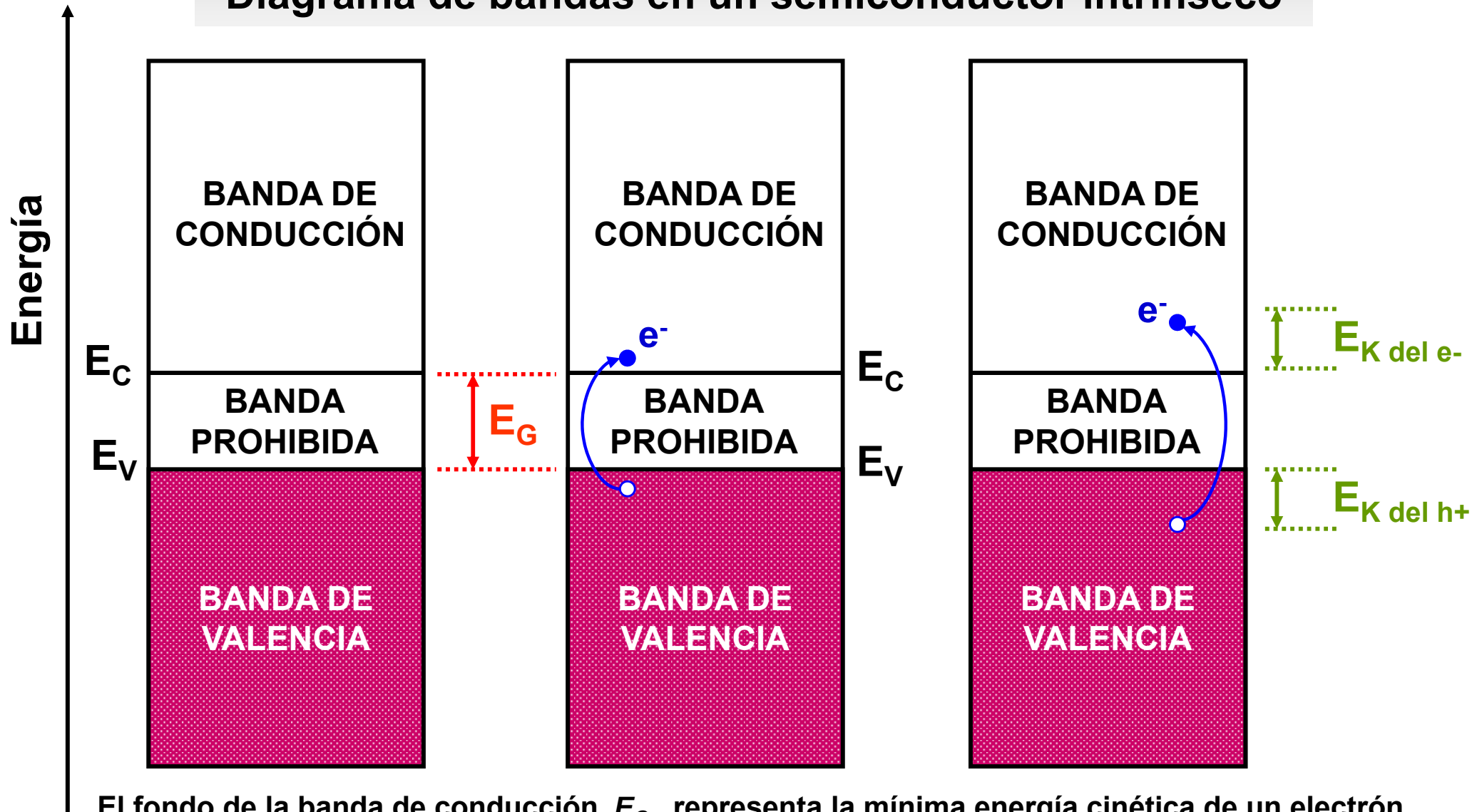


$$n = p \equiv n_i$$



Material (Tª ambiente)	Densidad intrínseca, n_i (cm ⁻³)
Silicio	$1,4 \times 10^{10}$
Germanio	$2,5 \times 10^{13}$

Diagrama de bandas en un semiconductor intrínseco



El fondo de la banda de conducción, E_C , representa la mínima energía cinética de un electrón libre, mientras que el techo de la banda de valencia, E_V , representa la mínima energía cinética de un hueco.

Concentración de portadores en un semiconductor intrínseco

$$dn = g(E) f(E) dE$$

Función de densidad de estados $\swarrow$ $\searrow$ Función de distribución de Fermi-Dirac

Se realiza este cálculo para obtener la densidad de portadores de carga en una banda:

- En la BC para los electrones (n)
- En la BV para los huecos (p)

$$\left\{ \begin{array}{l} n = \int_{E_C}^{\infty} g(E) f(E) dE \\ p = \int_0^{E_V} g(E) f(E) dE \end{array} \right.$$

$$f_n(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/k_B T} + 1} \quad f_p(E) = 1 - f_n(E) = \frac{1}{e^{(E_F-E)/k_B T} + 1}$$

Concentración (o densidad) de electrones: El número total de electrones por unidad de volumen en la banda de conducción

$$n = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT} \quad N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

Densidad efectiva de estados en la banda de conducción

Concentración (o densidad) de huecos: El número total de huecos por unidad de volumen en la banda de valencia

$$p = N_V e^{-(E_F - E_V)/kT} \quad N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

Densidad efectiva de estados en la banda de valencia

Podemos obtener el producto de las concentraciones de electrones y huecos en un semiconductor intrínseco si multiplicamos las expresiones de n y p :

$$np = N_C N_V e^{-E_G/kT}$$

El producto de las concentraciones de portadores es independiente del nivel de Fermi pero depende de la anchura de la banda prohibida

En un semiconductor intrínseco $n = p \equiv n_i$:

$$np = n_i^2$$

Ley de acción de masas
(aplicable a semiconductores intrínsecos o extrínsecos)

n_i se conoce como **concentración intrínseca** y es una función de la temperatura

La concentración intrínseca se puede obtener teniendo en cuenta las expresiones de n y p :

$$n_i^2 = np$$



$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-E_G/2kT}$$

La concentración intrínseca crece exponencialmente con la temperatura

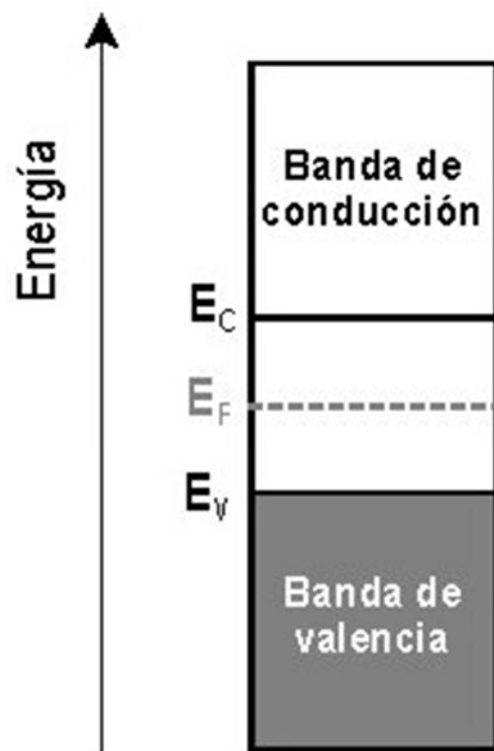
Posición del nivel de Fermi en un semiconductor intrínseco

Teniendo en cuenta:

- que en un semiconductor intrínseco la concentración de huecos es igual a la de electrones podemos obtener el nivel de Fermi

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_C}$$

- las expresiones de la densidad efectiva de estados en la banda de conducción (N_C) y la densidad efectiva de estados en la banda de valencia (N_V)



$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_p^*}{m_n^*}$$

$m_p^* \approx m_n^*$ y
 T^a ordinarias

$$E_F \approx \frac{E_C + E_V}{2}$$

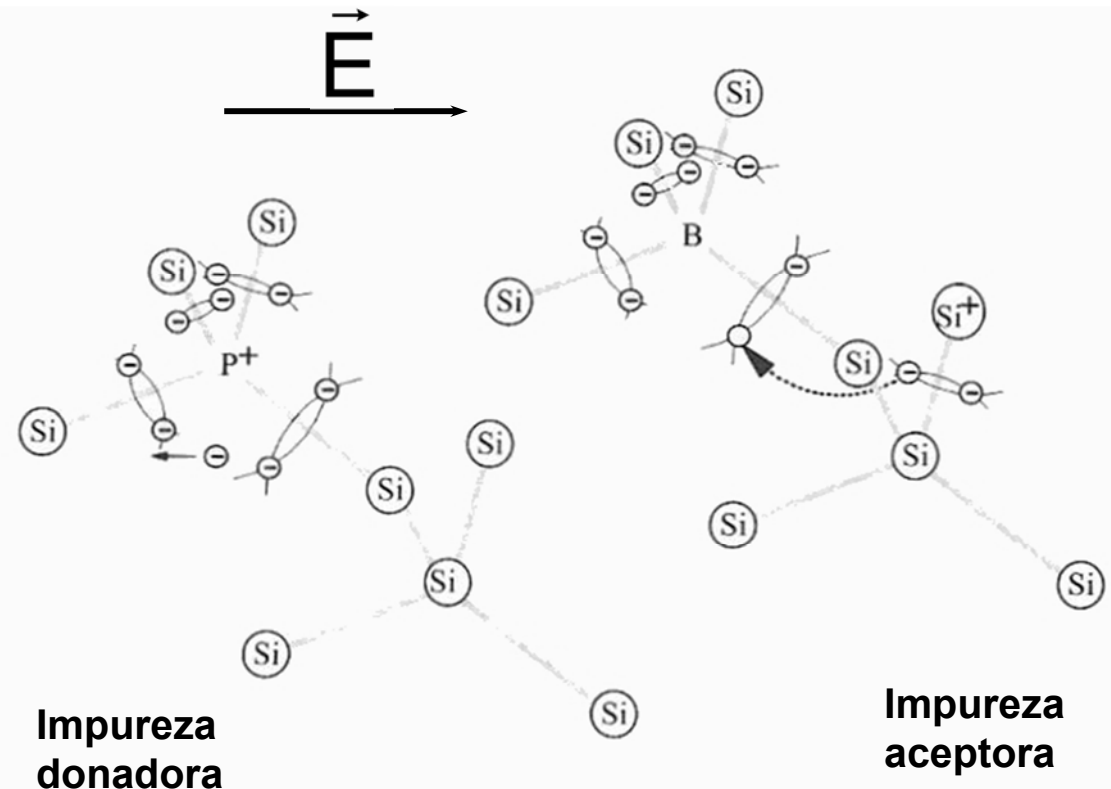
A la temperatura del cero absoluto, en un semiconductor intrínseco el nivel de Fermi se encuentra en el centro de la banda prohibida.

SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS

- Estructuras cristalinas **con átomos extraños**.
- El proceso de **adición de impurezas** al cristal semiconductor se denomina **DOPADO**.
- Es una técnica muy común para variar la conductividad de semiconductores.
- Se produce la **sustitución en la red cristalina** de algunos átomos originales por átomos extraños.
- La adición de una **fracción pequeña** de átomos extraños **no cambia la estructura reticular** del cristal, es decir, no varía apreciablemente la **estructura de bandas** del semiconductor.
- Los átomos de la impureza tienen una **configuración electrónica diferente** y pueden aportar mayoritariamente electrones o huecos.
- Se pueden obtener **dos tipos** de semiconductores extrínsecos:

Tipo n (densidad mayoritaria de e^-)

Tipo p (densidad mayoritaria de h^+)



a) Semiconductor tipo n

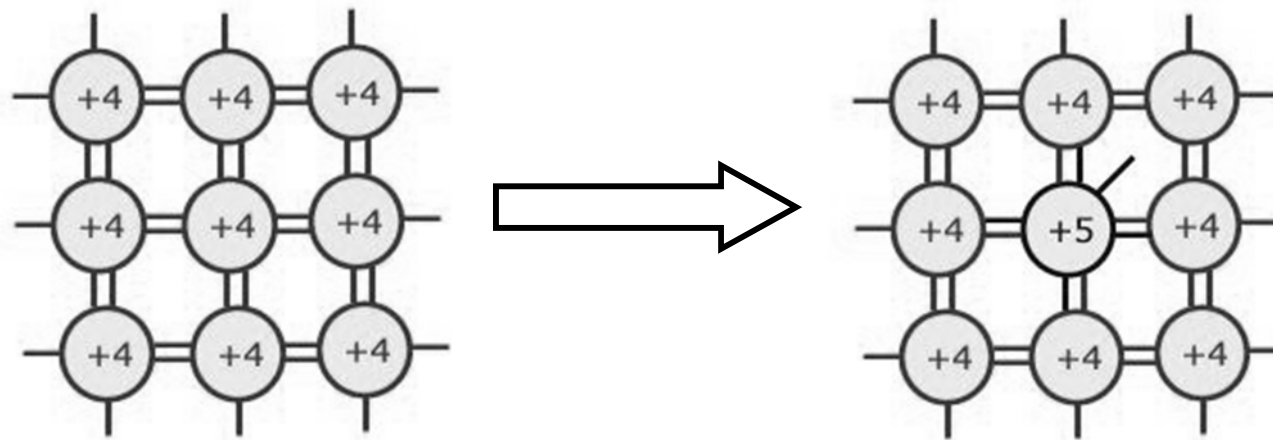
El átomo de fósforo (**P**, valencia 5) acaba ionizándose donando un electrón libre a la red.

b) Semiconductor tipo p

El átomo de Boro (**B**, valencia 3) aporta una deficiencia de un electrón. Este hueco es ocupado por un electrón de valencia de un átomo de Silicio (se transforma en Si^+).

Semiconductor extrínseco tipo-n

- Impurezas pertenecientes al **grupo V** (N, P, As, Sb).
- Algunas posiciones de la red cristalina están ocupadas por los N_D átomos de **impurezas donadoras** añadidas.
- Para cada átomo extraño, **uno de sus cinco e^-** no está ubicado en uno de los enlaces covalentes.
- Este **átomo se ioniza** fácilmente (Si y P: energía de ionización = 0,05 eV).
- El electrón liberado alcanza la BC y contribuye a la **corriente eléctrica** en el cristal.

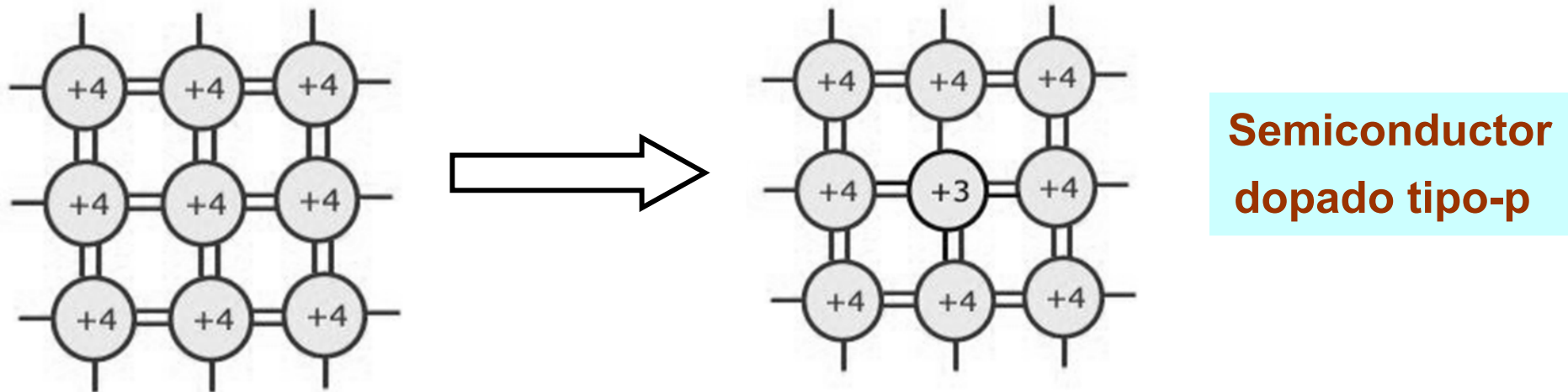


**Semiconductor
dopado tipo-n**

En esta situación hay mayor número de electrones que de huecos. Por ello a estos últimos se les denomina "portadores minoritarios" y "portadores mayoritarios" a los electrones.

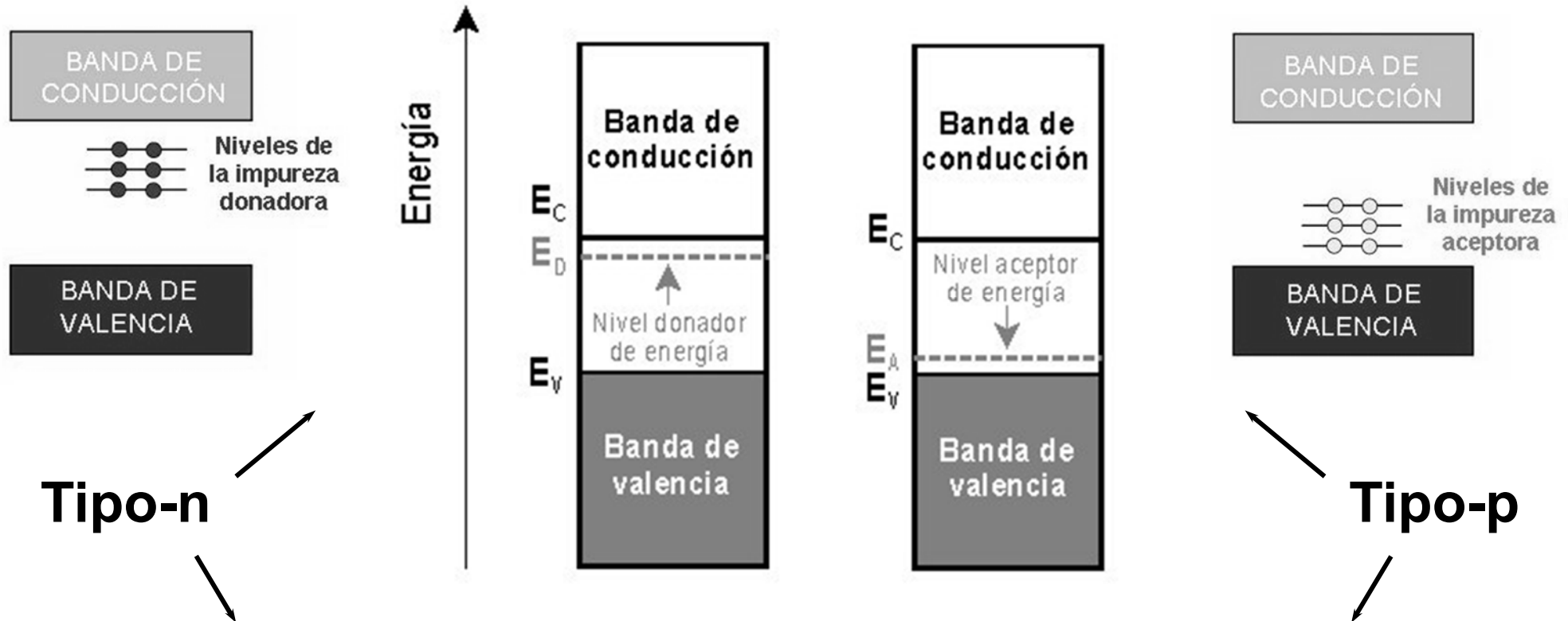
Semiconductor extrínseco tipo-p

- Impurezas pertenecientes al **grupo III** (B, Al, Ga, In).
- Algunas posiciones de la red cristalina están ocupadas por los N_A átomos de **impurezas aceptoras** añadidas.
- Para cada átomo extraño, uno de los enlaces covalentes queda incompleto. Este hueco es ocupado por un e^- de valencia de un átomo de **Si que se ioniza pasando a Si^+** .
- Esta situación es equivalente a la **aparición de un h^+** que puede “vagar” por el cristal y contribuir a la corriente eléctrica en el mismo.



En este caso los portadores mayoritarios son los huecos y los portadores minoritarios son los electrones.

Diagrama de bandas en un semiconductor extrínseco



- Aparece un **nuevo nivel de energía**, E_D , (con $2N_D$ estados permitidos) en la **BP**, ocupados por los e^- deslocalizados de los átomos donadores.
- Energéticamente la **transición** desde este nivel a la BC es muy fácil.

- Aparece un **nuevo nivel de energía**, E_A , (con $2N_A$ estados permitidos) en la BP, correspondiente a los e^- que pueden ser aceptados por los átomos aceptores.
- Energéticamente la **transición** desde la BV a este nivel es muy fácil.

Concentración de portadores en un semiconductor extrínseco

De acuerdo con la **ley de neutralidad eléctrica**, la suma total de cargas positivas debe ser igual a la suma total de las cargas negativas :

$$N_D + p = N_A + n$$

N_D = concentración de impurezas donadoras

N_A = concentración de impurezas aceptoras

En un semiconductor dopado tipo-n

$$N_A = 0$$

La concentración de portadores mayoritarios

$$n_n \approx N_D$$

La concentración de portadores minoritarios

$$p_n \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

En un semiconductor dopado tipo-p

$$N_D = 0$$

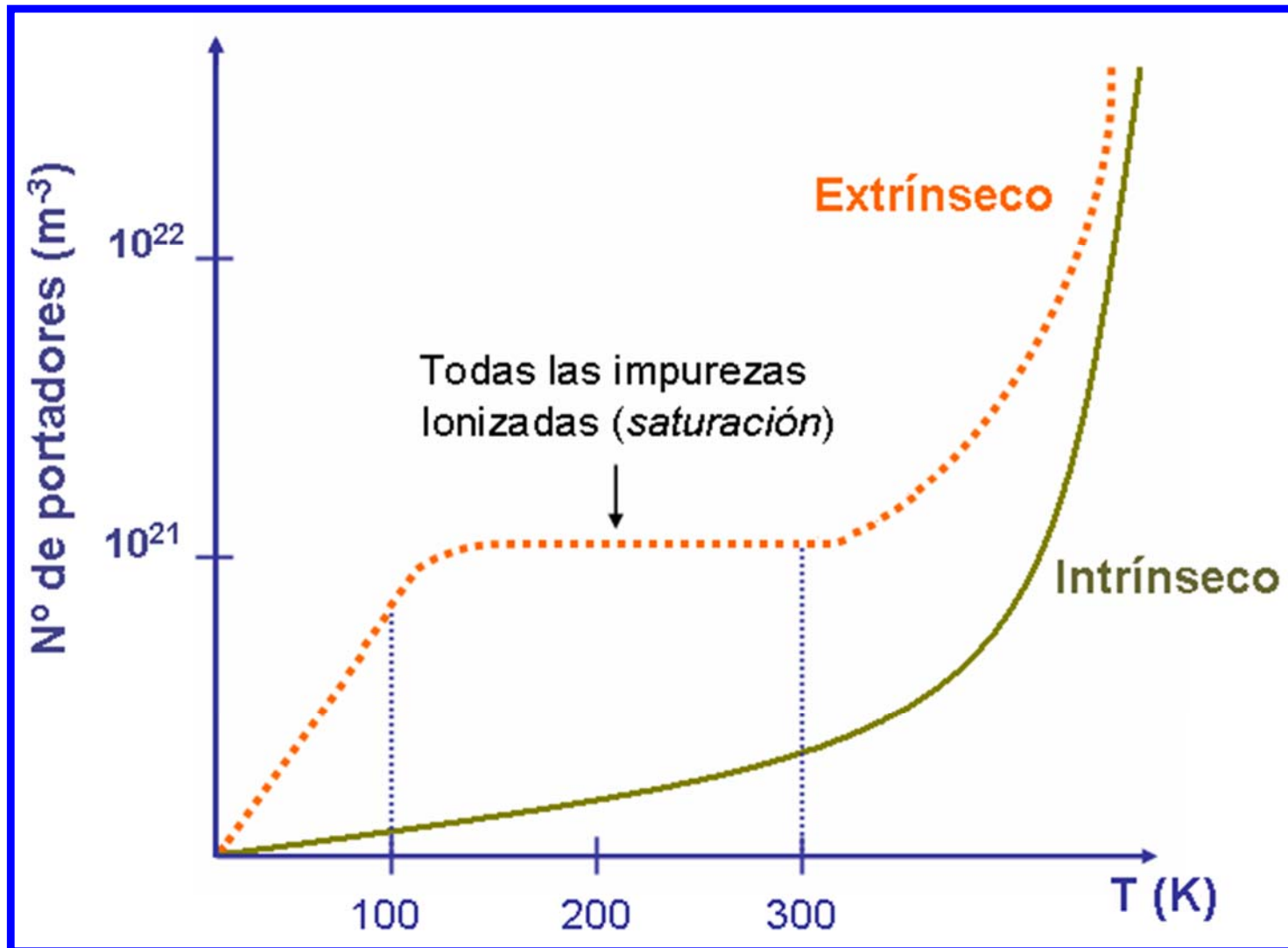
La concentración de portadores mayoritarios

$$p_p \approx N_A$$

La concentración de portadores minoritarios

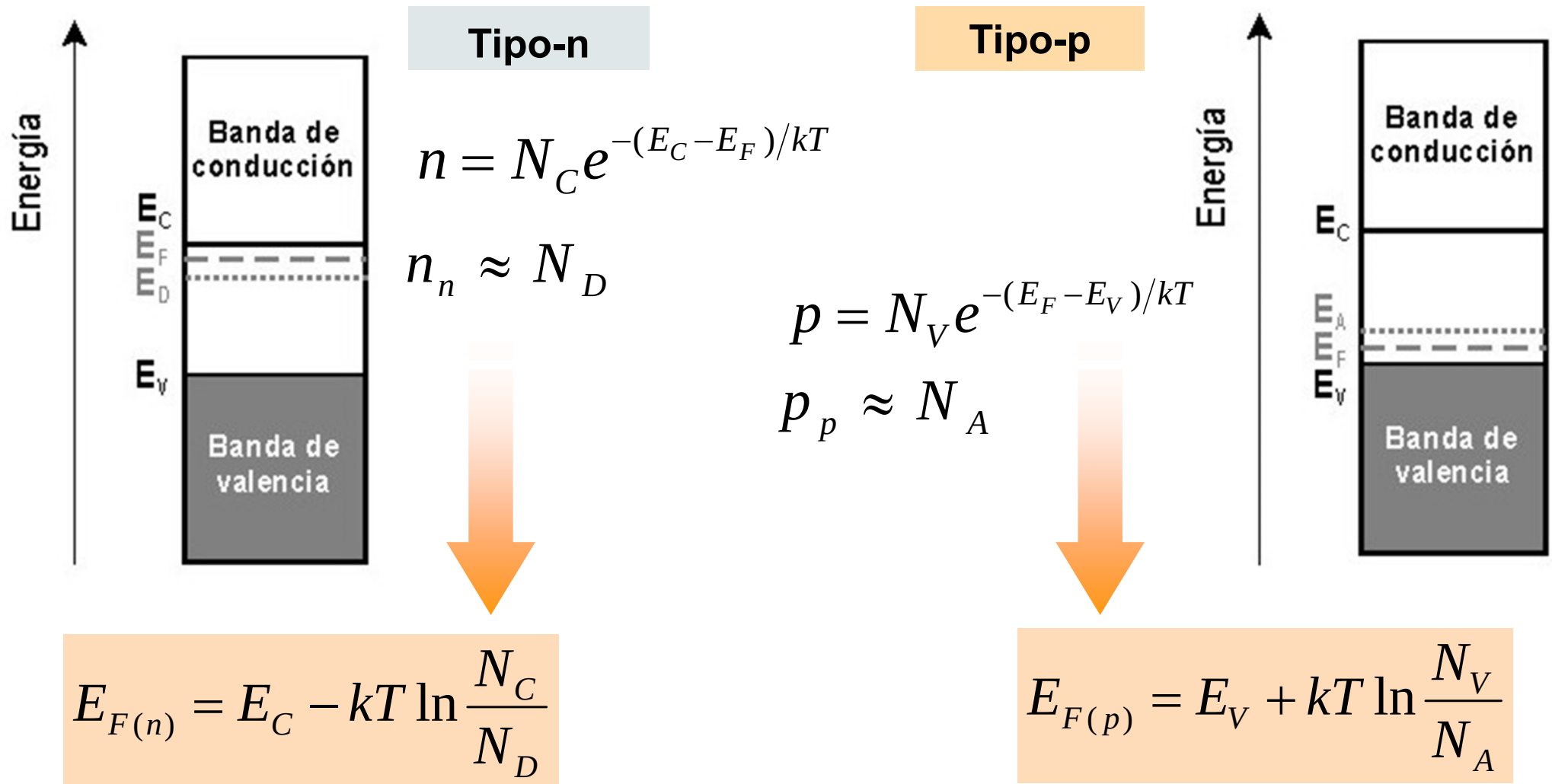
$$n_p \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

Variación del número de portadores con la temperatura de un semiconductor dopado comparativamente con el caso de que el conductor fuese intrínseco.



Posición del nivel de Fermi en un semiconductor extrínseco

Podemos calcular la posición exacta del nivel de Fermi en un semiconductor extrínseco



CONDUCCIÓN ELÉCTRICA EN SEMICONDUCTORES

Conductividad en un semiconductor intrínseco

La conductividad de un semiconductor es:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = e n \mu_n + e p \mu_p = e (n \mu_n + p \mu_p)$$

$$qE = m \frac{\bar{v}}{\tau} \Rightarrow \bar{v} = \frac{q\tau}{m} E$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu = \frac{q\tau}{m} \\ \bar{v} = \mu E \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Movilidad (cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)} \\ \text{Facilidad de} \\ \text{movimiento de los} \\ \text{portadores de carga} \end{array}$$

$$\boxed{\sigma = qn\mu}$$

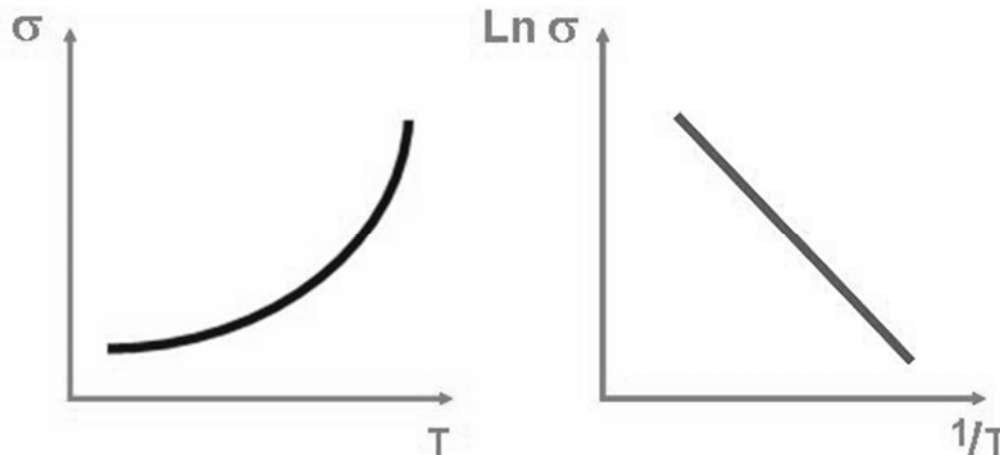
Donde n y p son las concentraciones de electrones libres y huecos; μ_n y μ_p sus movilidades; e es la carga del electrón

En un semiconductor intrínseco, la concentración de electrones libres es igual a la de huecos

Conductividad de un semiconductor intrínseco

$$n = p = n_i$$

$$\sigma = n_i e (\mu_n + \mu_p)$$



El apreciable cambio de la conductividad con la temperatura limita el empleo de los dispositivos semiconductores en algunos circuitos.

Conductividad en un semiconductor extrínseco

La conductividad de un semiconductor es: $\sigma = (n\mu_n + p\mu_p) e$

En un semiconductor extrínseco la concentración de portadores mayoritarios es muy superior a la de portadores minoritarios.

En un semiconductor tipo-n

$$n \gg p$$

$$n_n \approx N_D$$

$$\sigma_n \approx n_n \mu_n e$$

En un semiconductor tipo-p

$$p \gg n$$

$$p_p \approx N_A$$

$$\sigma_p \approx p_p \mu_p e$$

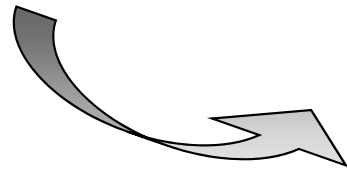
En los semiconductores extrínsecos, la magnitud de la conductividad, por electrones o por huecos, depende de la concentración de impurezas, que son las que proporcionan al cristal una u otra clase de portadores

En el rango de trabajo de la mayor parte de las aplicaciones de los semiconductores (temperaturas $< 100^\circ\text{C}$), la conductividad de los extrínsecos es mucho mayor que la de los intrínsecos y prácticamente constante.

Dada la especial estructura de los semiconductores, en su interior pueden darse dos tipos de corrientes:

- **Corriente por arrastre de campo:** originada por la acción de un campo eléctrico externo

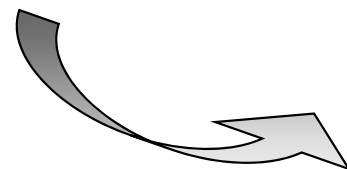
Cuando se aplica al semiconductor un campo eléctrico externo, los huecos se mueven en la dirección del campo y los electrones libres en sentido opuesto, originando estos dos movimientos una corriente eléctrica del mismo sentido.



Densidad de corriente de arrastre

- **Corriente por difusión de portadores:** producida por la existencia de un gradiente de concentraciones de portadores

La difusión se debe exclusivamente a la inhomogeneidad del material, por diferencias de concentración de portadores



Densidad de corriente de difusión

Corriente de arrastre

Cuando se aplica un campo eléctrico, al movimiento desordenado de los electrones y los huecos se superpone otro: en sentido contrario al campo para los electrones y en el sentido del campo para los huecos.

La densidad de corriente total debida al movimiento de electrones y huecos cuando se aplica un campo eléctrico, se denomina **densidad de corriente de arrastre**.

$$\vec{J}_{arrastre} = (n\mu_n + p\mu_p) e \vec{E} = \sigma \vec{E}$$

Donde n y p son las concentraciones de electrones libres y de huecos; μ_n y μ_p sus movilidades; e es la carga del electrón y σ la conductividad del semiconductor.

► En un semiconductor intrínseco

$$\vec{J}_{arrastre} = (n\mu_n + p\mu_p) e \vec{E} = (\mu_n + \mu_p) n_i e \vec{E} = \sigma \vec{E}$$

► En un semiconductor extrínseco

Tipo-n

$$\vec{J}_{arrastre} = \sigma_n \vec{E} \approx n_n \mu_n e \vec{E}$$

Tipo-p

$$\vec{J}_{arrastre} = \sigma_p \vec{E} \approx p_p \mu_p e \vec{E}$$

Corriente de difusión

- ▶ Si en una muestra semiconductor la concentración de portadores no es uniforme, existirá en el interior de la misma un gradiente de concentraciones de portadores.
- ▶ El gradiente de concentraciones provocará un movimiento de los portadores: habrá un transporte de portadores de las zonas de más alta concentración hacia las de más baja concentración.

Densidad de corriente de difusión

Formalmente sigue la *ley de Fick* $\longrightarrow \vec{J} = -D \vec{\nabla} C$ $D = \text{Coef. de difusión o difusividad}$

$$\vec{J}_n = (-e) \left[-D_n \vec{\nabla} n \right]$$

$$\vec{J}_p = (+e) \left[-D_p \vec{\nabla} p \right]$$

En un semiconductor, los componentes de la densidad de corriente de difusión pueden expresarse de forma unidimensional mediante la ecuación:

$$J_{n, \text{difusión}} = e D_n \frac{dn}{dx}$$

$D_n = \text{Difusividad de los electrones}$
 $n = \text{concentración de electrones}$

$$J_{p, \text{difusión}} = -e D_p \frac{dp}{dx}$$

$D_p = \text{Difusividad de los huecos}$
 $p = \text{concentración de huecos}$

Relación de Einstein

Existe una importante relación entre los coeficientes de difusión y movilidad, que se conoce como *relación de Einstein*

$$\frac{D_{n,p}}{\mu_{n,p}} = \frac{k}{q} T = V_T$$

La densidad de corriente total en un semiconductor es igual a la suma de la densidad de corriente de arrastre y la densidad de corriente de difusión.

► Según un modelo unidimensional:

$$J_n = J_{n, \text{arr}} + J_{n, \text{dif}} = e n \mu_n E + e D_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = J_{p, \text{arr}} + J_{p, \text{dif}} = e p \mu_p E - e D_p \frac{dp}{dx}$$

$$J = J_n + J_p = (n \mu_n + p \mu_p) e E + e \left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right)$$

► En el caso general:

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p = (n \mu_n + p \mu_p) e \vec{E} + e (D_n \vec{\nabla} n - D_p \vec{\nabla} p)$$