

Tema 3: Semiconductores.

Contenidos

- 1.1 Estructura de la Materia
- 1.2 Semiconductor Intrínseco
- 1.3 Semiconductor Extrínseco
- 1.4 Densidades de Carga en un SC
- 1.5 Movimientos de portadores

1.1 Estructura de la Materia

Materia → Constituida por átomos de distintas configuraciones

Propiedades Electrónicas → Dependen de la configuración de los electrones en el átomo
(Carácter de **Conductor**, **Aislante**, **Semiconductor**)

Los electrones se distribuyen en capas alrededor del núcleo, mediante **orbitales**, de acuerdo con

- **Números Cuánticos**
- **Principio de Exclusión de Pauli**

Números Cuánticos:

n → N° cuántico **Principal**, indica Órbita

l → N° cuántico **Azimutal**, indica Capa (también **orbital**)

m → N° cuántico **magnético**, indica Subcapa (también **suborbital**)

s → N° cuántico **spin**, indica sentido de giro

Valores:

$n : 1, 2, 3, \dots$

$l : 0, 1, \dots, n-1$

$m : -l, -l + 1, \dots, 1, 0, 1, \dots, l - 1, l$

$s : +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$

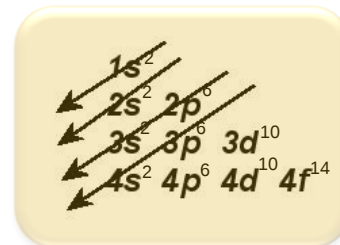
Número principal (n)	Número azinutal (l)	Número magnético (m)	Número de órbitas	Nº de electrones
1	0 (s)	0	1	2
2	0 (s)	0	1	2
	1 (p)	-1	3	6
		0		
		1		
3	0 (s)	0	1	2
	1 (p)	-1	3	6
		0		
		1		
	2 (d)	-2	5	10
		-1		
		0		
		1		
		2		

Tradicionalmente para referirse a un orbital concreto, se especifica el número principal n , seguido de una letra que representa al número azimutal l y un superíndice indicando el número de electrones que cabrían en esa órbita.

Para $l=0$, letra s
Para $l=1$, letra p
Para $l=2$, letra d
Para $l=3$, letra f

Por ejemplo: $2s^2$, $3p^6$

Para saber el orden de energía en que se rellenan los orbitales se emplea una “receta”: se construye una tabla con los orbitales, y se unen con flechas



Con esta receta, la ordenación es como sigue:

$1s$ $2s$ $2p$ $3s$ $3p$ $4s$ $3d$ $4p$ $5s$ $4d$ $5p$ $6s$ $4f$ $5d$ $6p$ $7s$ $5f$ $6d$ $7p$...

□ Al; N ° atómico = 13; $1s^2-2s^2-2p^6-3s^2-3p^1$

□ Si; N ° atómico = 14; $1s^2-2s^2-2p^6-3s^2-3p^2$

Por las propiedades del átomo un estado de mínima energía es el que tiene su última capa completa: **8** electrones (máximo)

△ Valencia:

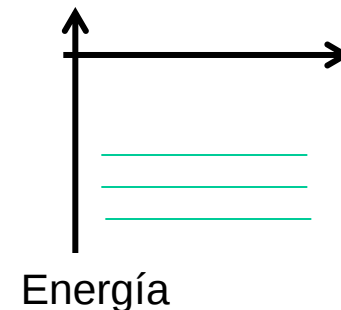
Nº de electrones que se han de ganar o perder para tener completa la última capa

Última capa → Capa de Valencia

△ Carácter de Conductor:

Depende de la facilidad con la que se pueden ganar o perder esos electrones → depende del número de electrones en la última capa

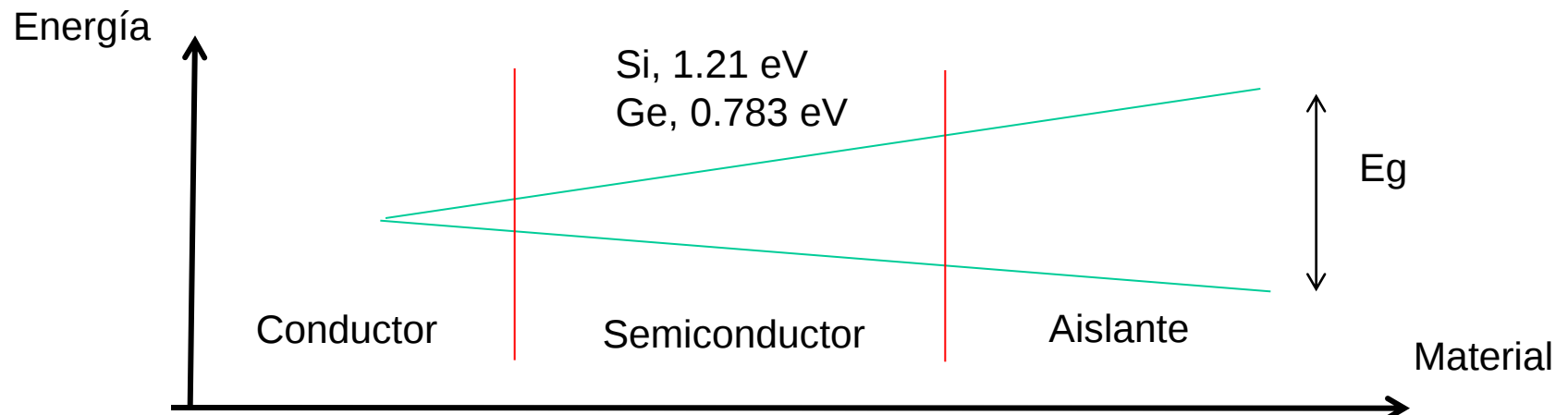
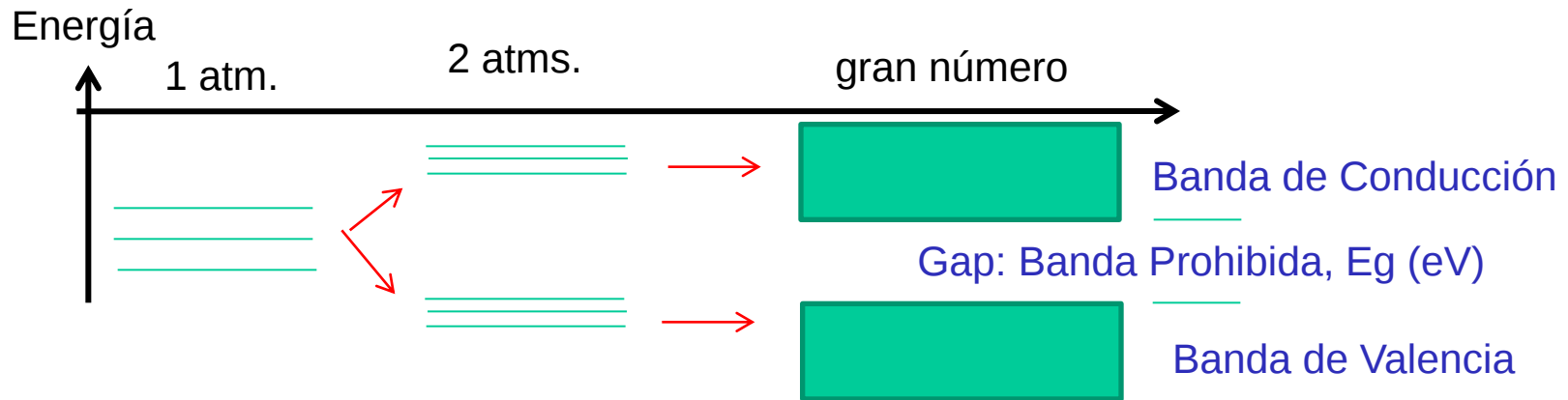
Cada electrón de la capa de Valencia necesita una energía para poder quedar libre del núcleo → Energías discretas



Si agrupamos varios átomos sigue vigente el principio de Exclusión de Pauli



Degeneración de Niveles

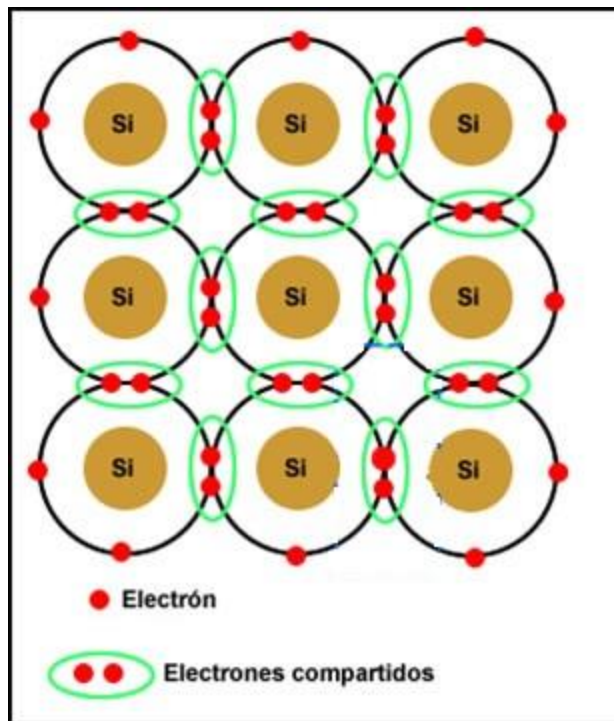


1.2 Semiconductores Intrínsecos

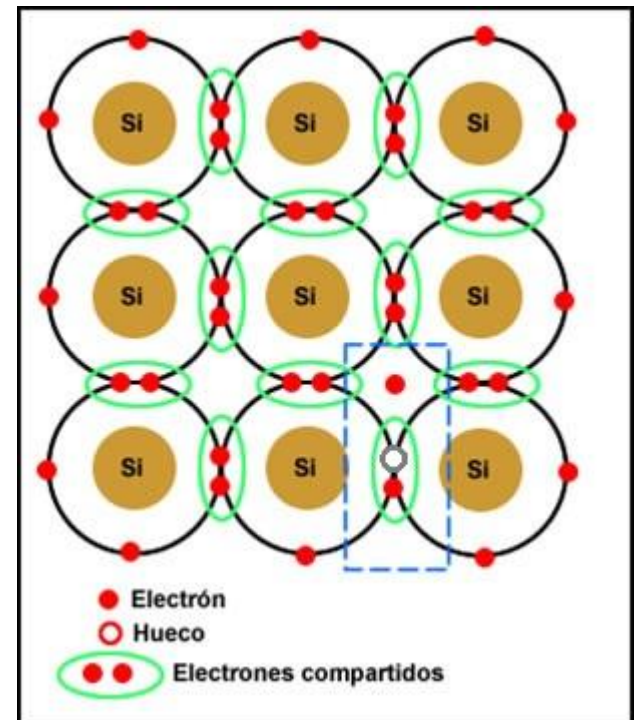
△ SC Intrínseco:

Compuestos únicamente por un material puro

Si, Ge $\rightarrow$ 4 e⁻ en la última capa $\rightarrow$ **Enlaces covalentes**



Cualquier
excitación
energética



❑ Existen 2 tipos de portadores: **electrones, huecos**
(concentraciones **n, p**)

❑ Los huecos tienen masa (Física del Estado Sólido)

❑ La circulación de corriente eléctrica puede ser debida al movimiento de cualquiera de ellos

△ **Concentración intrínseca de portadores:**

$n = p = n_i = p_i$ (portadores/u. volumen)

❑ $n_i = n_i(T)$

❑ Característica de cada material, Si $\rightarrow n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ e-/cm}^{-3}$

Ley de Acción de Masas:

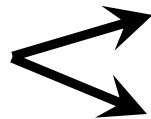
$$n \cdot p = n_i^2$$

1.3 Semiconductores Extrínsecos

En los SC intrínsecos el número de portadores es pequeño

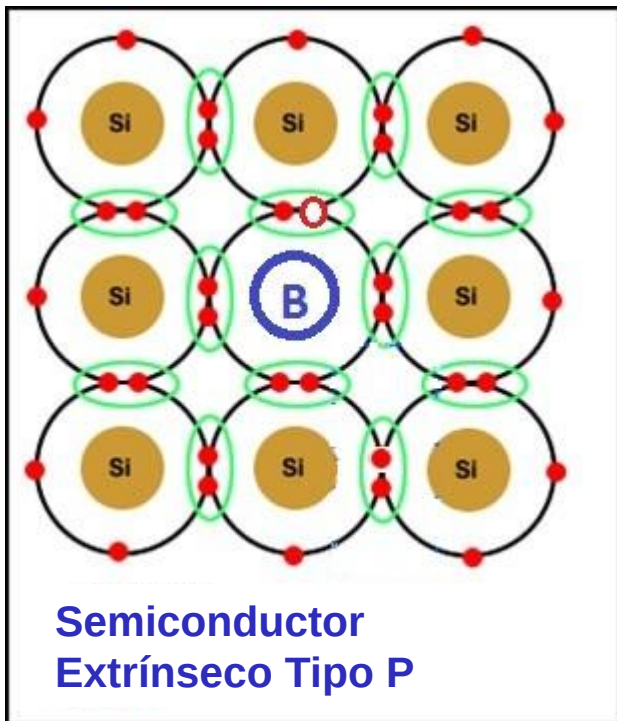
⬡ **Semiconductor Extrínseco:**
SC con dopantes

dopantes

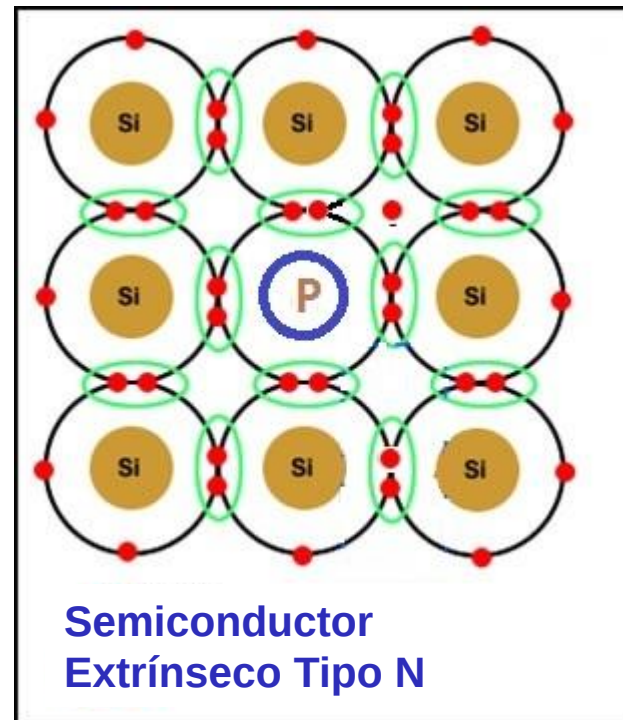


Columna III-B : B, Ga, In → **Aceptores**

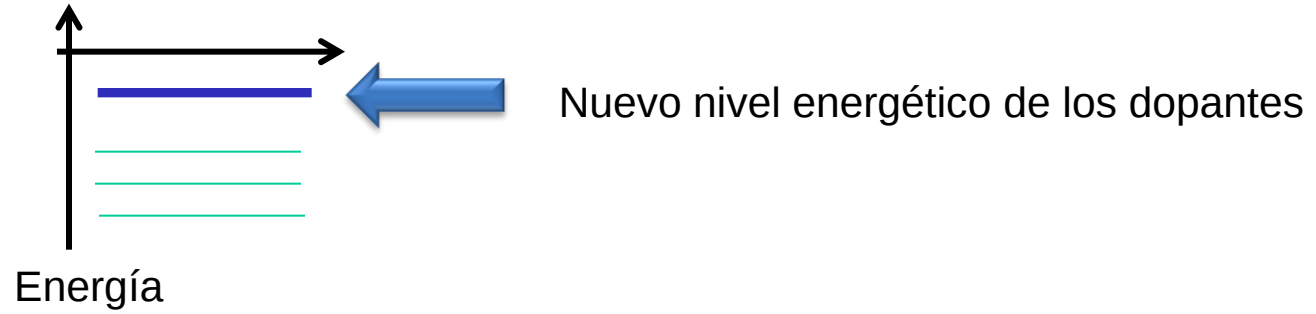
Columna V-B : P, As, Sb → **Dadores**



**Semiconductor
Extrínseco Tipo P**



**Semiconductor
Extrínseco Tipo N**



❑ Mayor Concentración de portadores

N_D : Concentración de átomos dadores (at/cm^3)

N_A : Concentración de átomos aceptores (at/cm^3)

1.4 Densidades de Carga en un SC

- Ley de Acción de Masas: $n \cdot p = n_i^2$

- Ley de neutralidad eléctrica:

$$n + N_A = p + N_D$$

△ Semiconductor Intrínseco: $N_D = 0 \quad N_A = 0 \rightarrow n = p = n_i$

△ Semiconductor Extrínseco: $N_D \neq 0 \quad N_A \neq 0 \rightarrow n \neq p \neq n_i$

$$\left\{ \begin{array}{l} n \cdot p = n_i^2 \\ n + N_A = p + N_D \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} n^2 - (N_D - N_A) \cdot n - n_i^2 = 0 \\ p = \frac{n_i^2}{n} \end{array} \quad \begin{array}{l} p^2 - (N_A - N_D) \cdot p - n_i^2 = 0 \\ n = \frac{n_i^2}{p} \end{array}$$

△ Semiconductor Extrínseco Tipo N:

$$N_D \gg N_A$$

$$N_D \gg n_i$$



$$n \approx N_D$$

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

△ Semiconductor Extrínseco Tipo P:

$$N_A \gg N_D$$

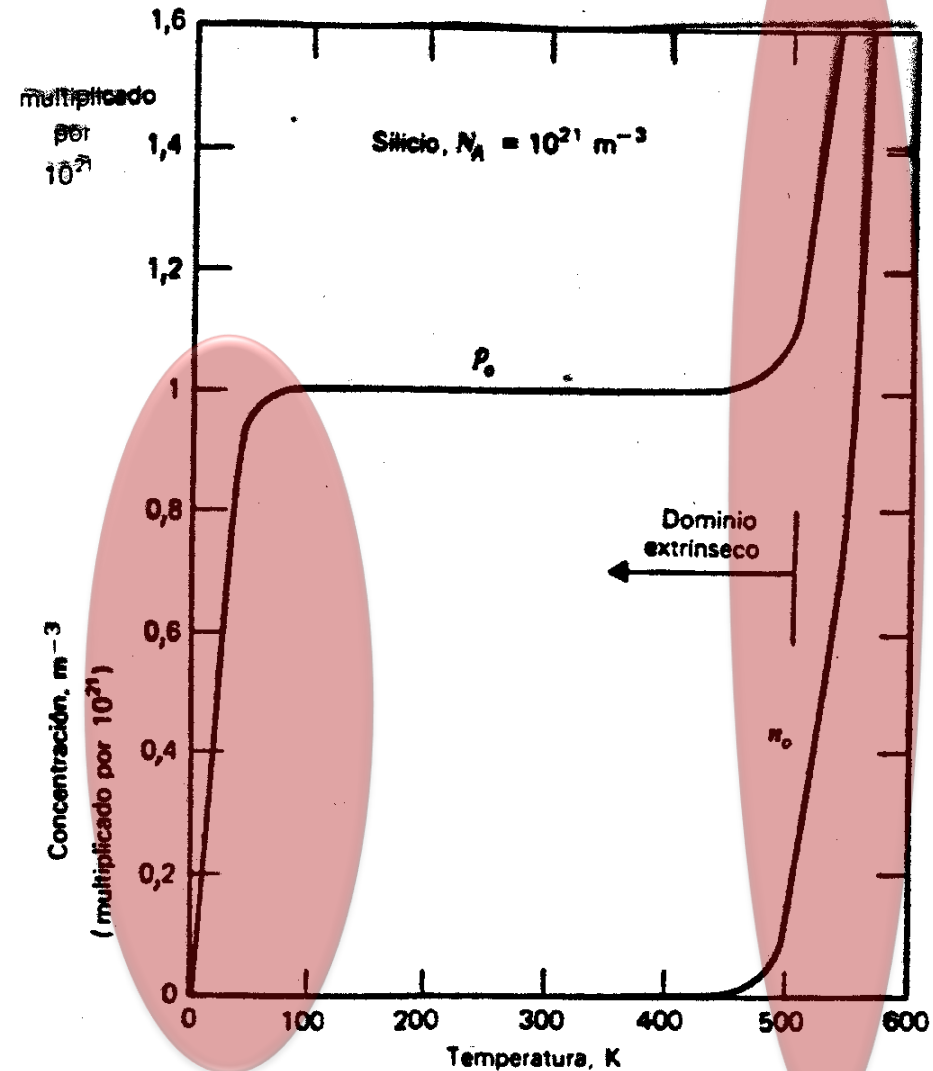
$$N_A \gg n_i$$



$$p \approx N_A$$

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

Zonas Intrínsecas



1.5 Movimientos de Portadores

Corriente de Arrastre

△ **Velocidad de Arrastre** $\equiv$ Velocidad de los portadores en un SC sometido a un campo eléctrico (expresión empírica)

Ley de Ohm

$$\vec{V}_{ap} = \mu_p \vec{\mathcal{E}}$$

$$\vec{V}_{an} = -\mu_n \vec{\mathcal{E}}$$

μ_p : Movilidad de los huecos

μ_n : Movilidad de los electrones

△ Densidad de Corriente de arrastre, $\mathbf{J}_a$ (Amperios/m²)

△ **σ** = Conductividad

△ **ρ** = Resistividad

$$\begin{aligned}\vec{J}_{ap} &= qp\vec{V}_{ap} & \vec{J}_a &= \vec{J}_{an} + \vec{J}_{ap} = q(n\mu_n + p\mu_p)\vec{\mathcal{E}} \\ \vec{J}_{an} &= -qn\vec{V}_{an}\end{aligned}$$

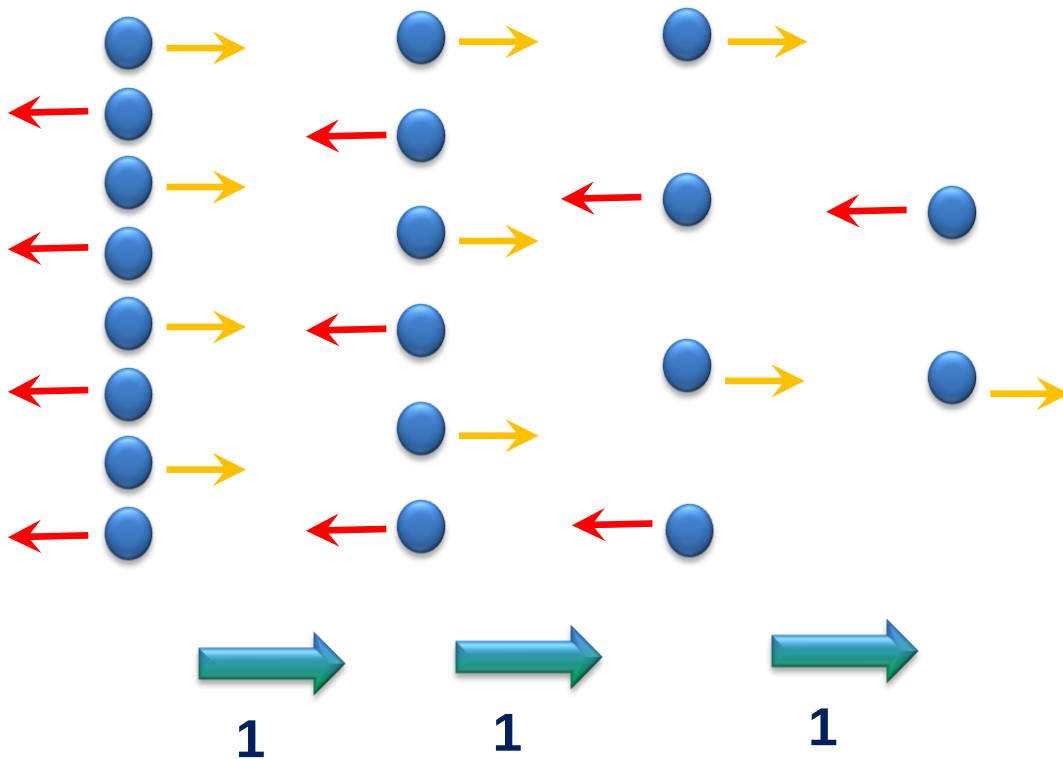
$$\sigma \equiv q(n\mu_n + p\mu_p)$$

$$\rho \equiv \frac{1}{\sigma}$$

$$\vec{J}_a = \sigma \vec{\mathcal{E}} = \frac{1}{\rho} \vec{\mathcal{E}}$$

1.5 Movimientos de Portadores

Corriente de Difusión



flujo de portadores
proporcional al gradiente
de concentración

1.5 Movimientos de Portadores

Corriente de Difusión

△ Densidad de Corriente de difusión, $\mathbf{J}_d$ (A/m²)

$$\begin{aligned}\vec{J}_{dp} &= -qD_p \frac{dp}{dx} \\ \vec{J}_{dn} &= qD_n \frac{dn}{dx}\end{aligned}\quad \vec{J}_d = \vec{J}_{dp} + \vec{J}_{dn}$$

D_p : Constante de difusión de los huecos

D_n : Constante de difusión de los electrones

Corriente Total en un Semiconductor

△ Densidad de Corriente total, $\mathbf{J}$ (A/m²)

$$\vec{J} = \vec{J}_p + \vec{J}_n = \vec{J}_{ap} + \vec{J}_{dp} + \vec{J}_{an} + \vec{J}_{dn} = q(p\mu_p\vec{\varepsilon} - D_p \frac{dp}{dx}) + q(n\mu_n\vec{\varepsilon} + D_n \frac{dn}{dx})$$

1.5 Movimientos de Portadores

Relaciones de Einstein

D y μ son parámetros estadísticos asociados al movimiento de los portadores y por lo tanto tienen que estar relacionados entre sí.

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{KT}{q} = V_{Te}$$

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{KT}{q} = V_{Te}$$

K : Constante de Boltzmann

T : Temperatura en °K

$V_{Te} \equiv$ Tensión térmica (0.0258 V a 300° K).

1.5 Movimientos de Portadores

Concentración de Portadores fuera del Equilibrio

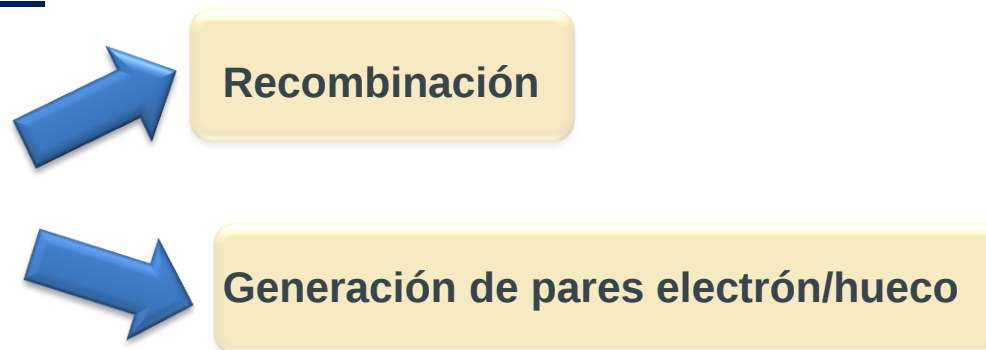
$n \cdot p > n_i^2 \rightarrow$ Inyección de portadores

$n \cdot p < n_i^2 \rightarrow$ Extracción de portadores

△ Inyección de Bajo Nivel:

El exceso de portadores minoritarios inyectados $\ll$ concentración de portadores mayoritarios en equilibrio

Vuelta al Equilibrio



△ La constante que rige el paso a la situación de equilibrio es la **vida media** de los portadores, τ_n , τ_p

1.5 Movimientos de Portadores

Vuelta al Equilibrio

La velocidad de vuelta al equilibrio es proporcional a lo alejados que estamos de éste.

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \frac{n_{po} - n_p}{\tau_n} = -\frac{n'_p}{\tau_n}$$

$n_p \equiv$ concentración de electrones en semiconductor tipo p

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = \frac{p_{no} - p_n}{\tau_p} = -\frac{p'_n}{\tau_p}$$

$n'_p, p'_n \equiv$ exceso de portadores con respecto al equilibrio

△ Longitud de Difusión $\equiv$

Longitudes promedio recorridas por los portadores durante su vida media

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}$$

1.5 Movimientos de Portadores

Ecuaciones de continuidad

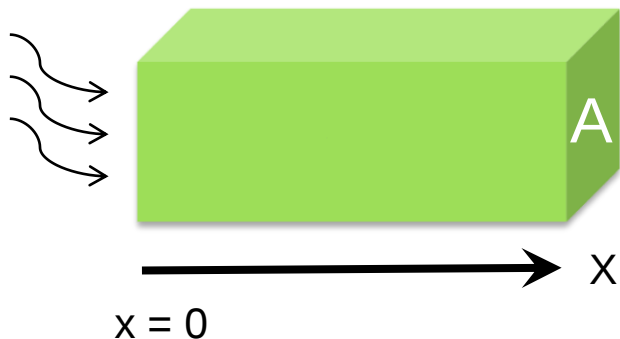
△ Si además existe una corriente en el SC, entonces las ecuaciones anteriores se modifican para obtener las **Ecuaciones de continuidad**

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = -\frac{n'_p}{\tau_n} + \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x}$$
$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\frac{p'_n}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x}$$

1.5 Movimientos de Portadores

Ejemplo de Aplicación de las Ecuaciones de Continuidad

- Una barra muy larga de semiconductor, con dopado constante de átomos dadores N_D (Semiconductor tipo N, $n_0 = N_D$ $p_0 = n_i^2/N_D$)
- Sobre ella actúa una radiación constante generando un exceso de portadores en $X=0$ también constante.



Suponemos baja inyección $\rightarrow p' \ll n$



$$p = p' + p_0 \ll n$$



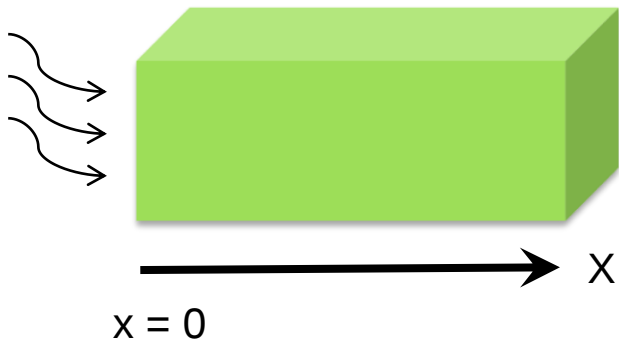
$$J_{ap} = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \varepsilon \ll J_{an} = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \varepsilon$$



$$J_a \sim J_{an}$$

1.5 Movimientos de Portadores

Ejemplo de Aplicación de las Ecuaciones de Continuidad



Existe un gradiente de concentración:

$$J_{dp} = -qD_p \frac{dp}{dx} \Rightarrow \frac{dJ_{dp}}{dx} = -qD_p \frac{d^2 p}{dx^2}$$

Como estamos en un **régimen estacionario** (nada varía con el tiempo)



$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0 = -\frac{p - p_0}{\tau_p} + D_p \frac{d^2 p}{dx^2}$$

$$p' = p - p_0; \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$



$$\frac{d^2 p'}{dx^2} = \frac{p'}{L_p^2}$$

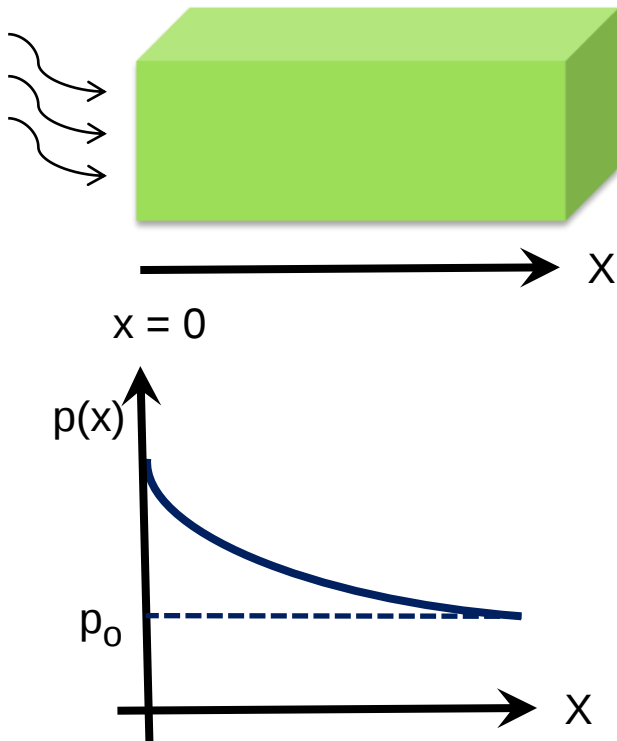
E.D.L. 2º orden



$$p' = k_1 e^{\frac{-x}{L_p}} + k_2 e^{\frac{x}{L_p}}$$

1.5 Movimientos de Portadores

Ejemplo de Aplicación de las Ecuaciones de Continuidad



Condiciones de contorno:

$$x \rightarrow \infty; p' = 0 \rightarrow k_2 = 0$$

$$x = 0; p' = p'(0) \rightarrow k_1 = p'(0)$$

$$p' = k_1 e^{\frac{-x}{L_p}} + k_2 e^{\frac{x}{L_p}} \rightarrow p'(x) = p'(0) e^{\frac{-x}{L_p}}$$

$$p(x) = p_o + [p(0) - p_o] e^{\frac{-x}{L_p}}$$

1.5 Movimientos de Portadores

Ejemplo de Aplicación de las Ecuaciones de Continuidad

Ya podemos calcular todas las corrientes que hay en la barra:

Corriente de difusión de huecos:

$$J_{dp} = -qD_p \frac{dp}{dx} = q \frac{D_p}{L_p} [p(0) - p_0] e^{\frac{-x}{L_p}} \Rightarrow I_{dp} = A \cdot q \frac{D_p}{L_p} [p(0) - p_0] e^{\frac{-x}{L_p}}$$

Corriente de difusión de electrones:

$$n - n_0 = p - p_0 \Rightarrow \frac{dn}{dx} = \frac{dp}{dx} \Rightarrow qD_n \frac{dn}{dx} = qD_n \frac{dp}{dx}$$

$$I_{dn} = -\frac{D_n}{D_p} I_{dp}$$

Corriente de arrastre de electrones:

$$I = I_{dn} + I_{dp} + I_{an} + I_{ap} \approx I_{dn} + I_{dp} + I_{an} = 0 \Leftarrow I_{ap} \approx 0$$

$$I_{an} = \left(\frac{D_n}{D_p} - 1 \right) I_{dp}$$

$$\text{Ge; } \frac{D_n}{D_p} \approx 2$$

$$\text{Si; } \frac{D_n}{D_p} \approx 3$$

1.5 Movimientos de Portadores

Ejemplo de Aplicación de las Ecuaciones de Continuidad

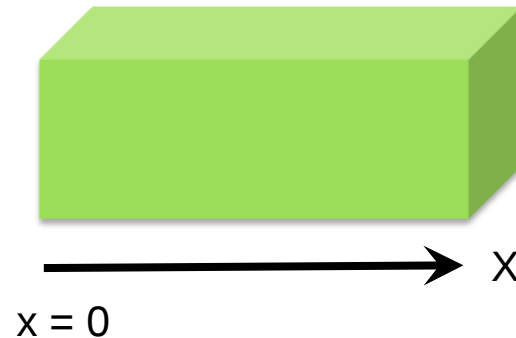
Como existe una corriente de arrastre  existirá también un $\mathcal{E}$:

$$I_{an} = \left(\frac{D_n}{D_p} - 1 \right) I_{dp} = A \cdot q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \mathcal{E}$$

$$\mathcal{E}(x) = \frac{1}{A \cdot q \cdot n(x) \cdot \mu_n} \left(\frac{D_n}{D_p} - 1 \right) I_{dp}(x)$$

1.5 Movimientos de Portadores

Ejemplo de Aplicación de las Ecuaciones de Continuidad



Dopamos la barra con una concentración de huecos o electrones NO uniforme $\rightarrow p(x), n(x)$



Va a existir una diferencia de potencial entre cualesquiera dos puntos a lo largo del eje X

1.5 Movimientos de Portadores

Ejemplo de Aplicación de las Ecuaciones de Continuidad

Demostración:

Barra Aislada $\rightarrow$ No existe corriente ni de electrones ni de huecos

$$J_p = J_{ap} + J_{dp} = qp\mu_p \varepsilon - qD_p \frac{dp}{dx} = 0 \Rightarrow \varepsilon = \frac{1}{p} \frac{D_p}{\mu_p} \frac{dp}{dx} = \frac{V_{Te}}{p} \frac{dp}{dx}$$

$$\text{Como } \varepsilon = -\frac{dV}{dx}$$

$$\text{Entonces } -dV = \frac{V_{Te}}{p} dp \Rightarrow V_2 - V_1 = V_{Te} \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$$

Equivalentemente:

$$p_1 = p_2 e^{V_{21}/V_{Te}}$$

$$n_1 = n_2 e^{-V_{21}/V_{Te}}$$

Ley de Boltzman:

1.5 Movimientos de Portadores

Ejemplo de Aplicación de las Ecuaciones de Continuidad

Consecuencias:



N_A

N_D

Concentraciones constantes en la zona P y N

$$\left. \begin{aligned} p_p &= N_A \\ p_n &= \frac{n_i^2}{N_D} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\phi_o \equiv V_n - V_p = V_{Te} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

⌠ $\phi_o \equiv$ Potencial Barrera