Tema 3: Semiconductores.

Contenidos

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 → Nº cuántico Principal, indica Órbita
l → Nº cuántico Azimutal, indica Capa (también orbital)
m → Nº cuántico magnético, indica Subcapa (también suborbital)
s → Nº cuántico spin, indica sentido de giro

Valores:

n : 1, 2, 3, ….

l : 0, 1, … n-1

m: -l, -l + 1, …,1, 0, 1, …, l – 1, l

s: + ½, - ½

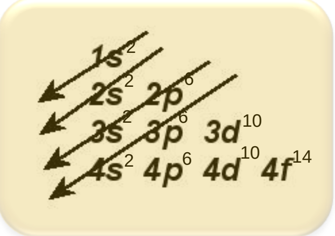
Número principal (n)	Número azimutal (l)	Número magnético (m)	Número de órbitas	Nº de electrones
1	0 (s)	0	1	2
2	0 (s)	0	1	2
	1 (p)	-1	3	6
		0		
		1		
3	0 (s)	0	1	2
	1 (p)	-1	3	6
		0		
		1		
	2 (d)	-2	5	10
		-1		
		0		
		1		
		2		

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 º atómico = 13; $1s^2$-$2s^2$-$2p^6$-$3s^2$-$3p^1$
- Si; N º 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:**

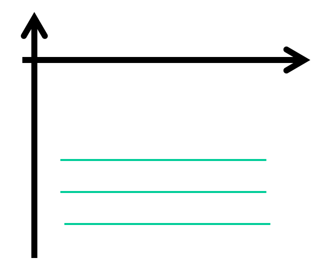
Nº de electrones que se han de ganar o perder para tener completa la última capa

Última capa → Capa de Valencia

⌂ **Carácter de Conductor:**

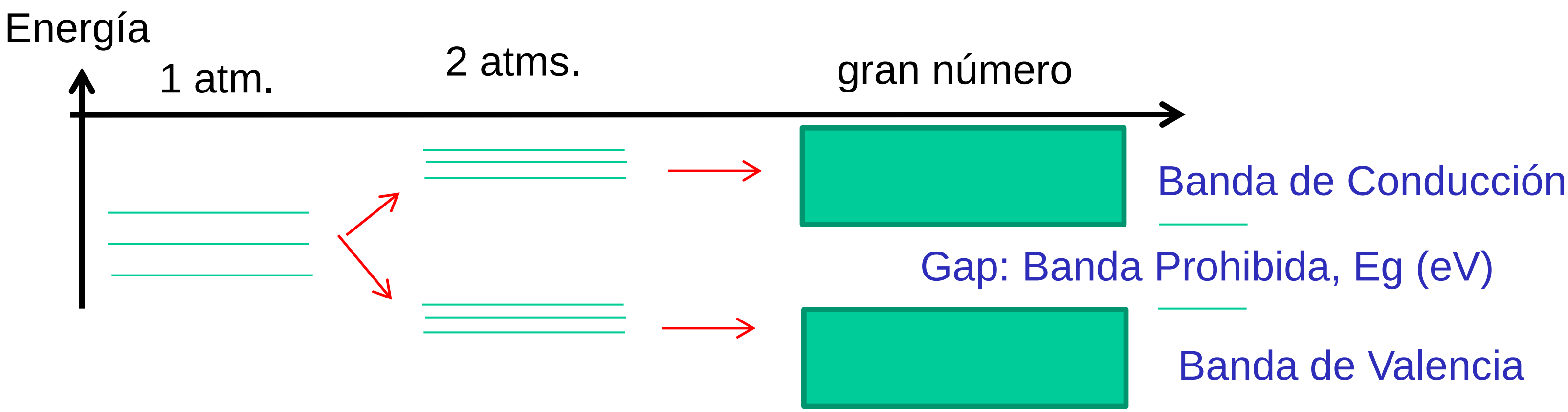
Depende de la facilidad con la que se pueden ganar o perder esos electrones → depende del número de electrones en la última capa

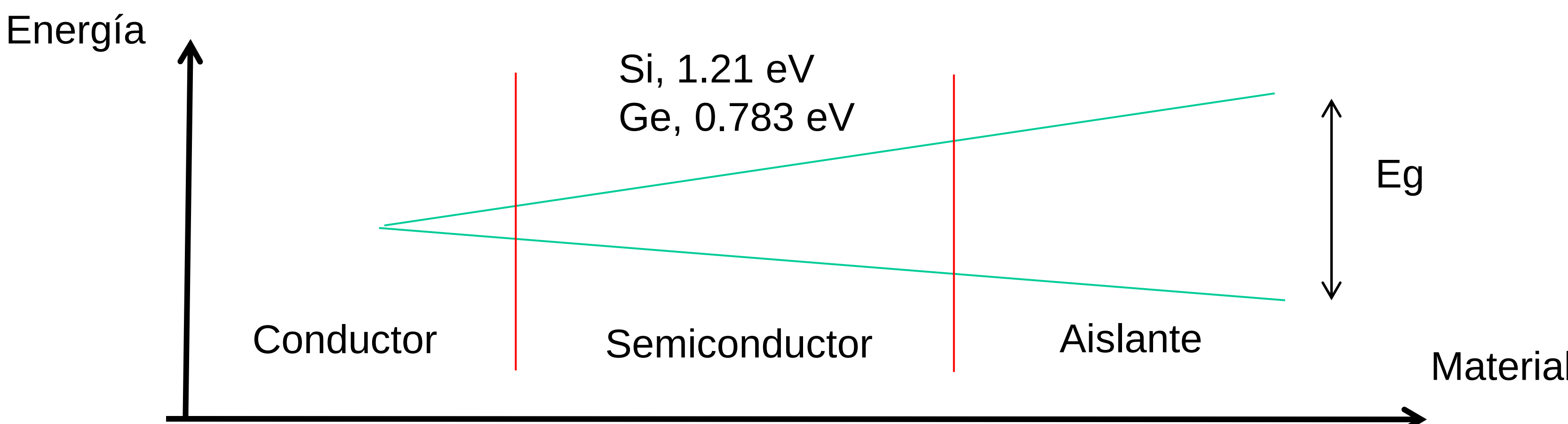
Cada electrón de la capa de Valencia necesita una energía para poder quedar libre del núcleo → Energías discretas



Energía

Si agrupamos varios átomos sigue vigente el principio de Exclusión de Pauli → Degeneración de Niveles

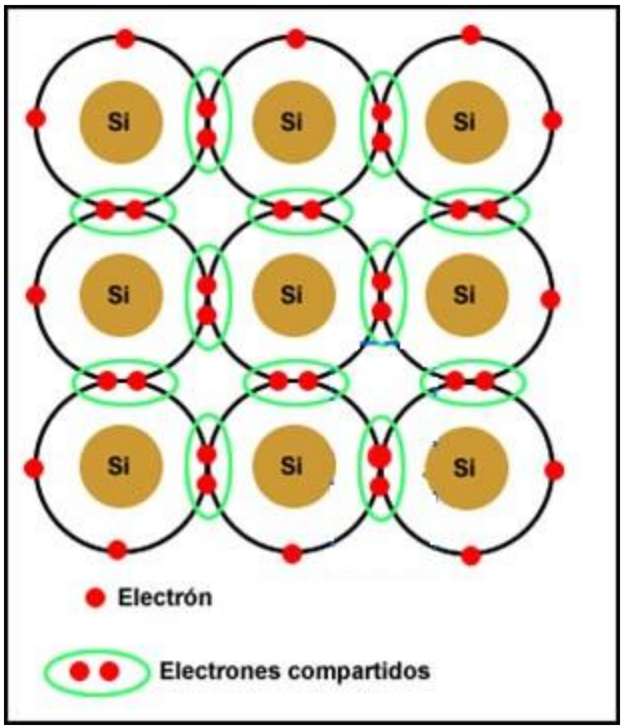




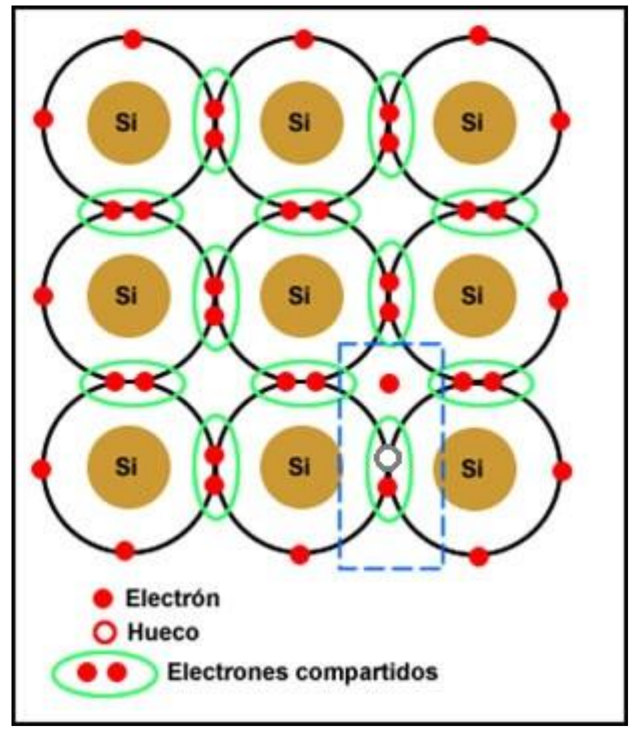
1.2 Semiconductores Intrínsecos

⌂ **SC Intrínseco:**
Compuestos únicamente por un material puro

Si, Ge → 4 e^- en la última capa → **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 = ni = pi (portadores/u. volumen)

- ❑ $n_i = n_i(T)$
- ❑ Característica de cada material, Si → n_i = 1.45 e^{10} e-/cm^{-3}

Ley de Acción de Masas:

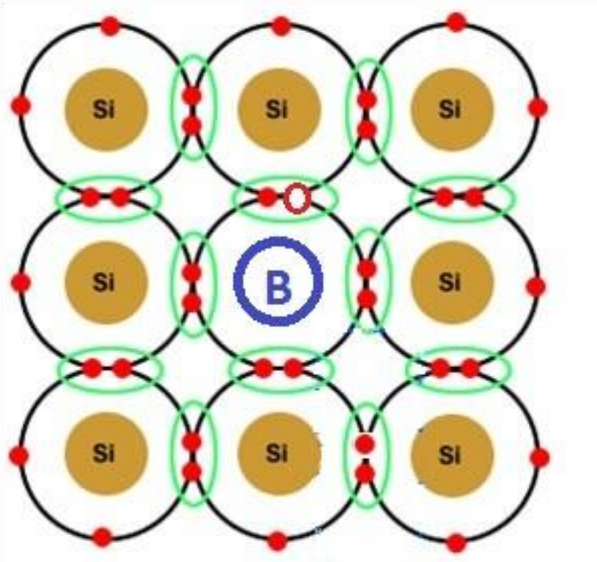
$$n \cdot p = n_i^2$$

1.3 Semiconductores Extrínsecos

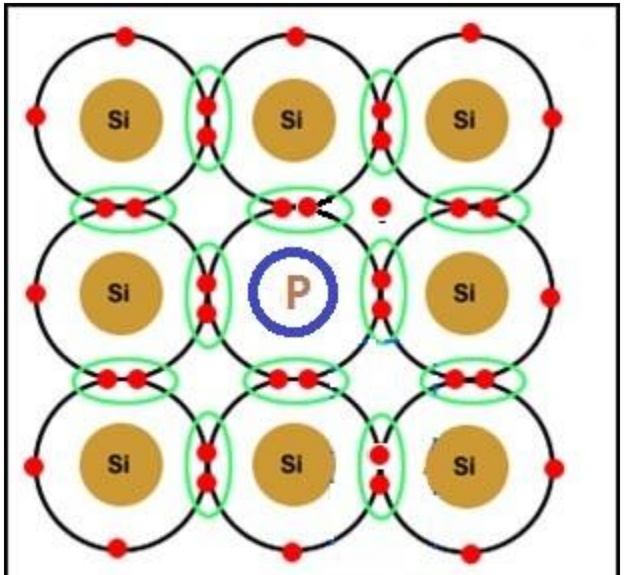
En los SC intrínsecos el número de portadores es pequeño

⌂ **Semiconductor Extrínseco:**
SC con dopantes

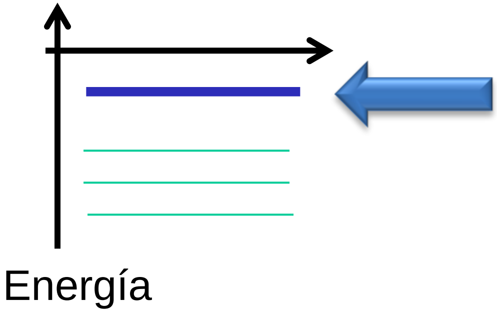
dopantes → Columna III-B : B, Ga, In → **Aceptores**
Columna V-B : P, As, Sb → **Dadores**



Semiconductor Extrínseco Tipo P



Semiconductor Extrínseco Tipo N



Nuevo nivel energético de los dopantes

- 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:** $N_D = 0\ N_A = 0 \rightarrow n = p = n_i$

⌂ **Semiconductor Extrínseco:** $N_D \neq 0\ N_A \neq 0 \rightarrow n \neq p \neq n_i$

$$\left\{ \begin{array}{c} n \cdot p = n_i^2 \\ n + N_A = p + N_D \end{array} \right\}$$

$$n^2 - (N_D - N_A) \cdot n - n_i^2 = 0 \qquad p = \frac{n_i^2}{n}$$

$$p^2 - (N_A - N_D) \cdot p - n_i^2 = 0 \qquad n = \frac{n_i^2}{p}$$

⌂ **Semiconductor Extrínseco Tipo N:**

$N_D >> N_A$

$N_D >> n_i$

$$n \approx N_D$$

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

⌂ **Semiconductor Extrínseco Tipo P:**

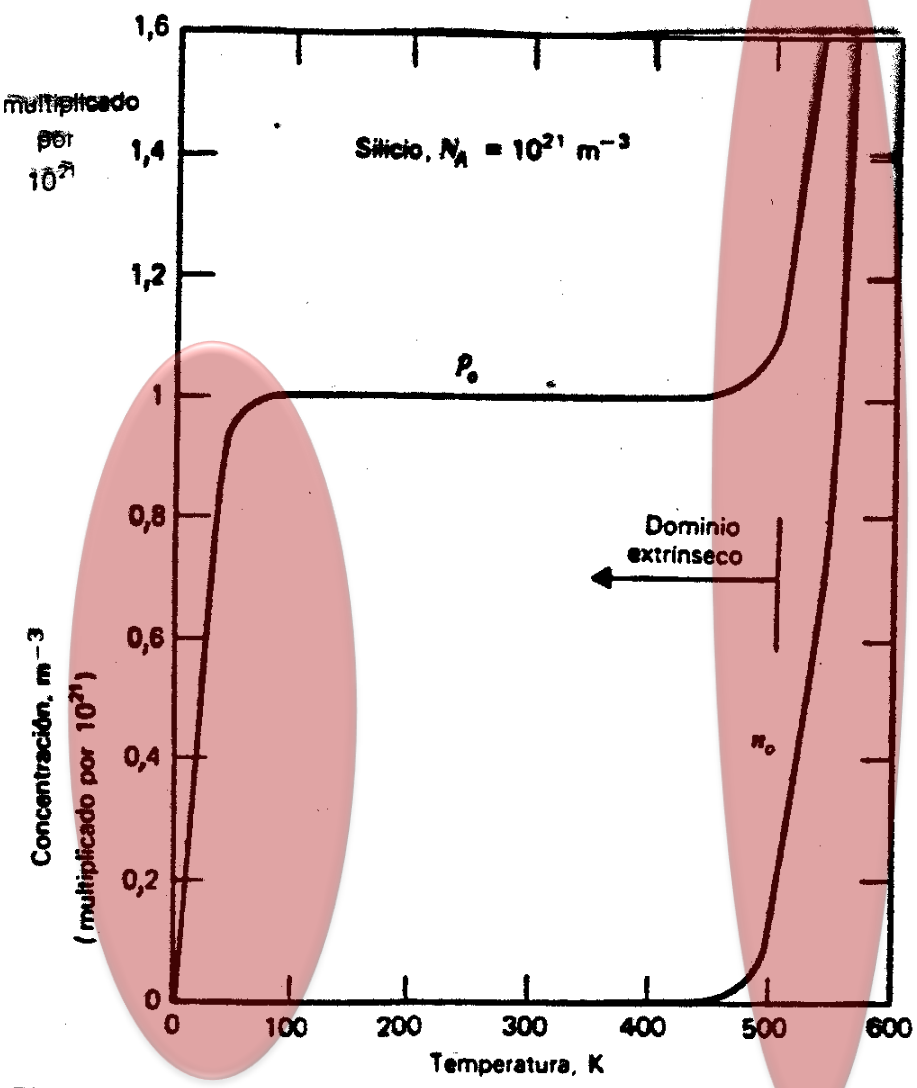
$N_A >> N_D$

$N_A >> n_i$

$$p \approx N_A$$

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

Zonas Intrínsecas



1.5 Movimientos de Portadores

Corriente de Arrastre

⌂ **Velocidad de Arrastre** ≡ Velocidad de los portadores en un SC sometido a un campo eléctrico (expresión empírica)

Ley de Ohm

$$\vec{v}_{ap} = \mu_p \vec{\varepsilon}$$

$$\vec{v}_{an} = -\mu_n \vec{\varepsilon}$$

μ_p: Movilidad de los huecos

μ_n: Movilidad de los electrones

⌂ Densidad de Corriente de arrastre, $\mathbf{J_a}$ (Amperios/m^2)

$$\vec{J}_{ap} = qp\vec{v}_{ap}$$

$$\vec{J}_{an} = -qn\vec{v}_{an}$$

$$\vec{J}_a = \vec{J}_{an} + \vec{J}_{ap} = q(n\mu_n + p\mu_p)\vec{\varepsilon}$$

⌂ **σ = Conductividad**

⌂ **ρ = Resistividad**

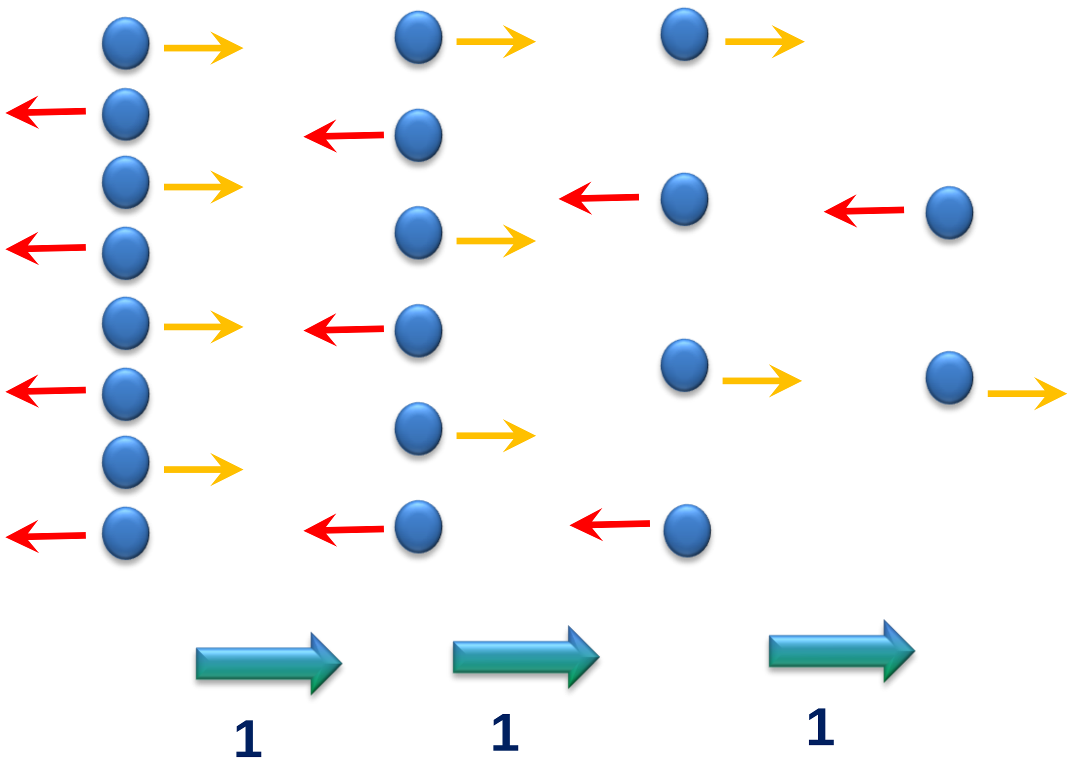
$$\sigma \equiv q(n\mu_n + p\mu_p)$$

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

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

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/m^2)

$$\vec{J}_{dp} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$\vec{J}_{dn} = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$\vec{J}_d = \vec{J}_{dp} + \vec{J}_{dn}$$

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/m^2)

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

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 ºK

V_{Te}≡ Tensión térmica (0.0258 V a 300º 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 << concentración de portadores mayoritarios en equilibrio

Vuelta al Equilibrio

Recombinación

Generación de pares electrón/hueco

⌂ La constante que rige el paso a la situación de equilibrio es la **vida media** de los portadores, $\boldsymbol{\tau_n}$, $\boldsymbol{\tau_p}$

1.5 Movimientos de Portadores

Vuelta al Equilibrio

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

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

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

n_p ≡ concentración de electrones en semiconductor tipo p

n'_p, p'_n ≡ exceso de portadores con respecto al equilibrio

⌂ **Longitud de Difusión ≡**
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**

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = -\frac{n_p'}{\tau_n} + \frac{1}{q}\frac{\partial J_n}{\partial x}$$

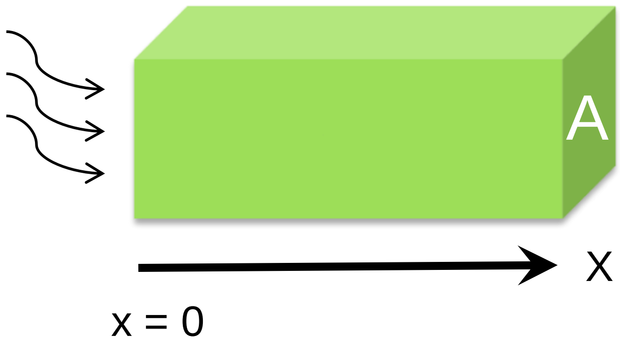
$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\frac{p_n'}{\tau_p} - \frac{1}{q}\frac{\partial J_p}{\partial x}$$

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, $n_o = N_D$ $p_o = n_i^2/N_D$)

- Sobre ella actúa una radiación constante generando un exceso de portadores en X= 0 también constante.



Suponemos baja inyección → p' << n

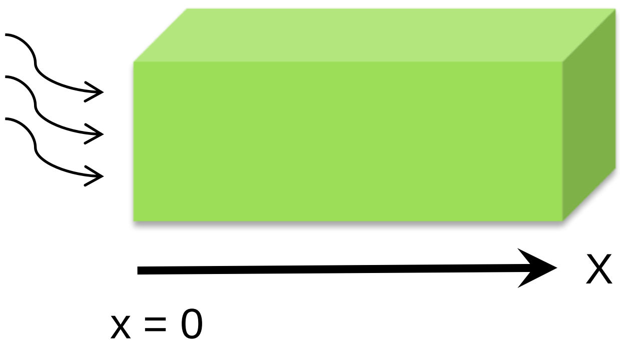
$p = p' + p_o << n$

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

$J_a \sim J_{an}$

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) $\Rightarrow$

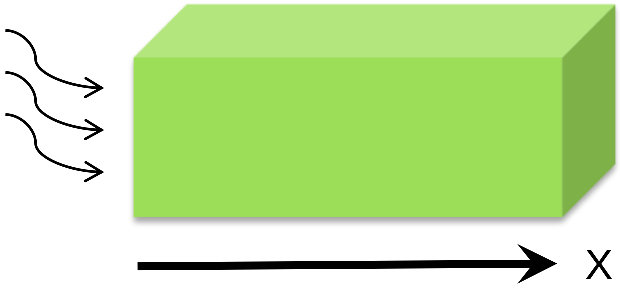
$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0 = -\frac{p - p_0}{\tau_p} + D_p \frac{d^2 p}{dx^2}$$

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

$\Rightarrow$ $$\boxed{\frac{d^2 p'}{dx^2} = \frac{p'}{L_p^2}}$$ E.D.L. 2º orden $\Rightarrow$ $$\boxed{p' = k_1 e^{\frac{-x}{L_p}} + k_2 e^{\frac{x}{L_p}}}$$

1.5 Movimientos de Portadores

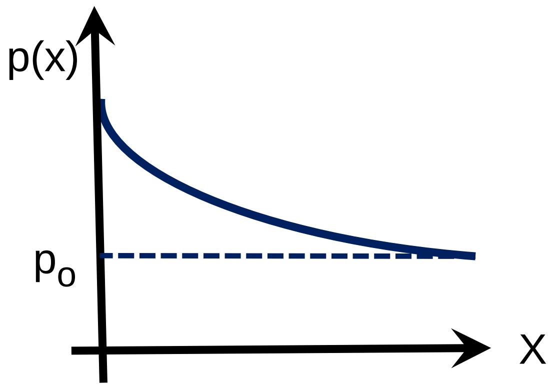
Ejemplo de Aplicación de las Ecuaciones de Continuidad



Condiciones de contorno:

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

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



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

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

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:

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

Corriente de difusión de electrones:

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

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

Corriente de arrastre de electrones:

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

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

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

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

1.5 Movimientos de Portadores

Ejemplo de Aplicación de las Ecuaciones de Continuidad

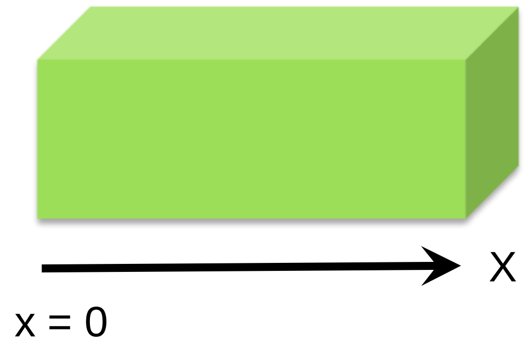
Como existe una corriente de arrastre ➡ existirá también un **ε**:

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

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

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 $\longrightarrow$ 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 $\longrightarrow$ No existe corriente ni de electrones ni de huecos

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

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

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

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

$$\left.\begin{aligned} p_p &= N_A \\ p_n &= \frac{n_i^2}{N_D} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \boxed{\phi_o \equiv V_n - V_p = V_{Te} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)}$$

⌂ $\phi_o \equiv$ Potencial Barrera