

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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) 1 (p)	0	1	2
		-1	3	6
		0		
3	0 (s) 1 (p) 2 (d)	0	1	2
		-1	3	6
		0		
		1	5	10
		-2		
		-1		
0				

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

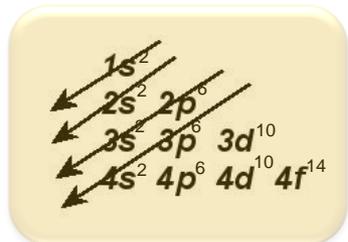
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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:

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



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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

△ Valencia:

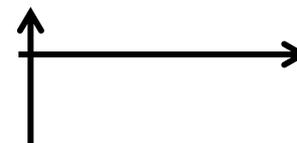
Nº de electrones que se han de ganar o perder para tener completa la última capa

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



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

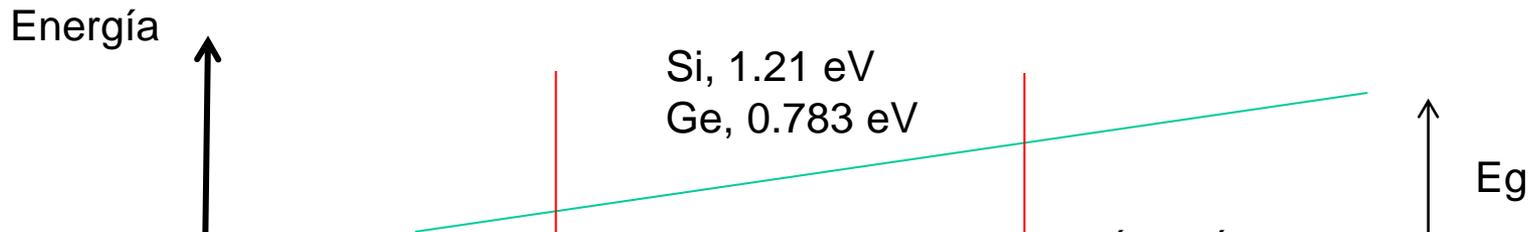
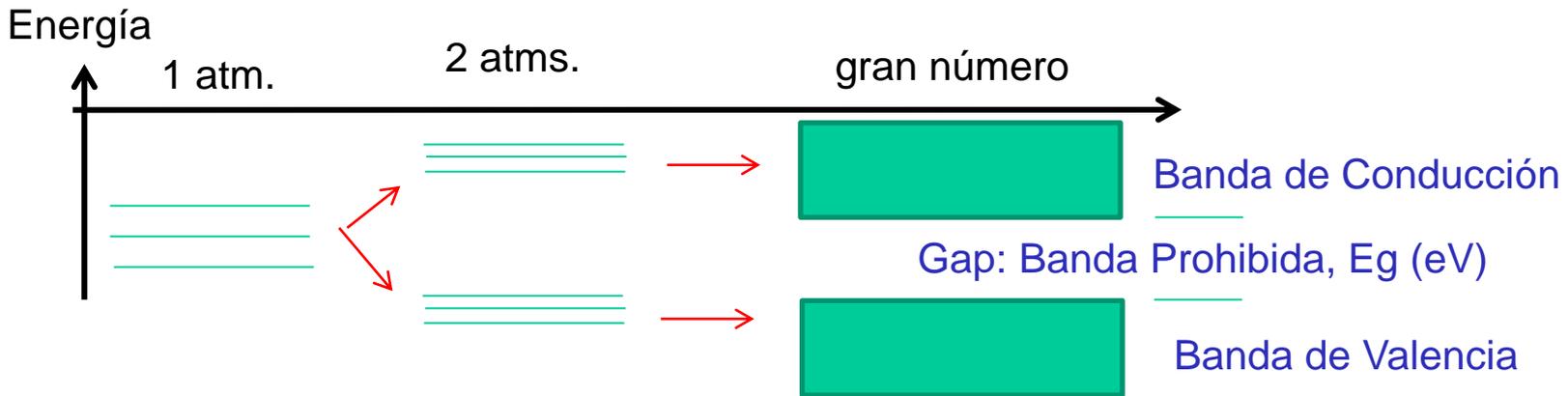
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

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



Degeneración de Niveles



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

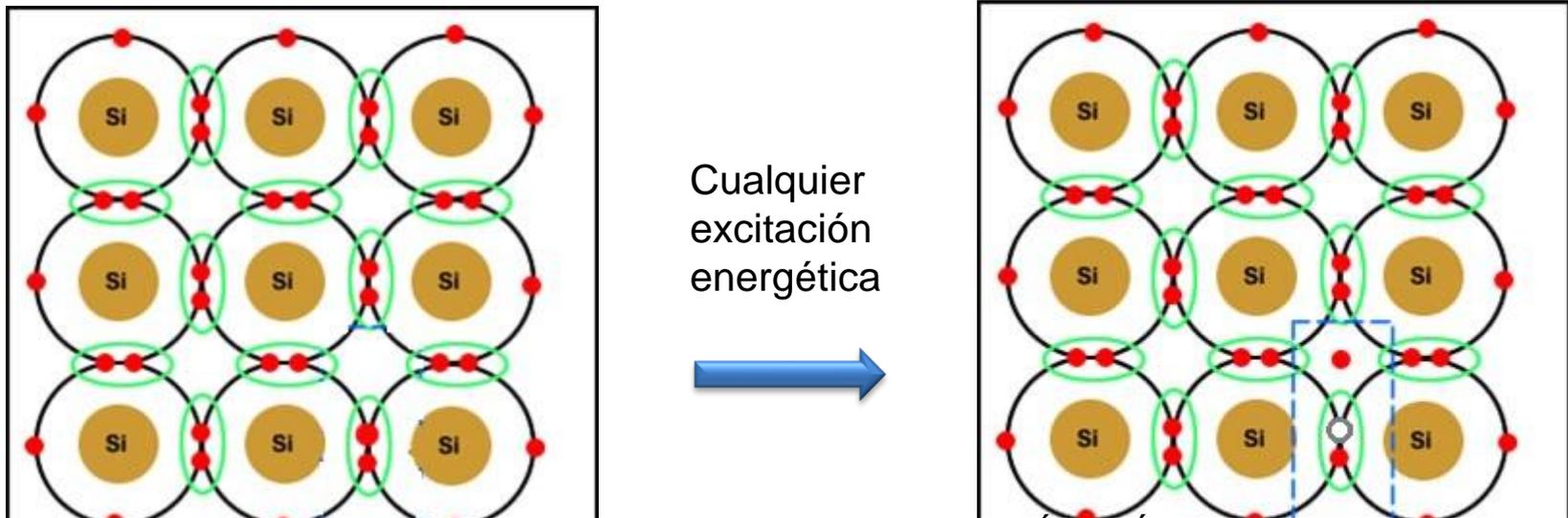
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

1.2 Semiconductores Intrínsecos

△ SC Intrínseco:

Compuestos únicamente por un material puro

Si, Ge → 4 e⁻ en la última capa → **Enlaces covalentes**



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

- ❑ 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 $\rightarrow n_i = 1.45 \text{ e}^{10} \text{ e-/cm}^{-3}$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

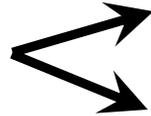
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

1.3 Semiconductores Extrínsecos

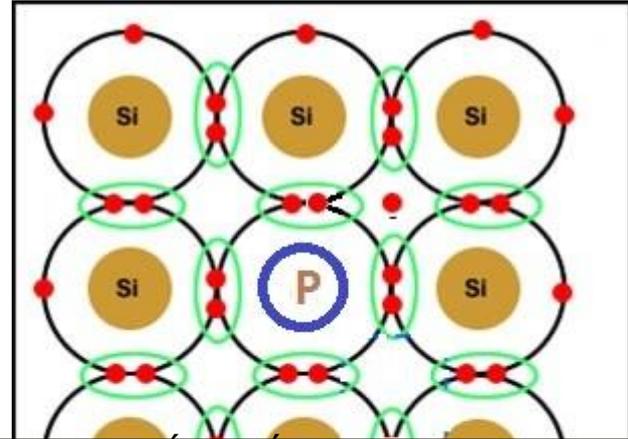
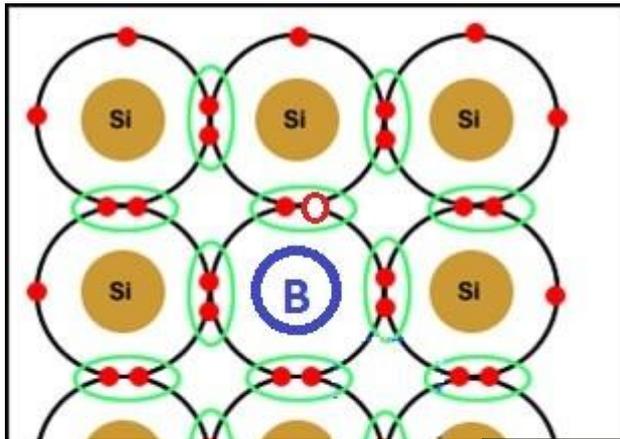
En los SC intrínsecos el número de portadores es pequeño

🏠 **Semiconductor Extrínseco:**
SC con dopantes

dopantes



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



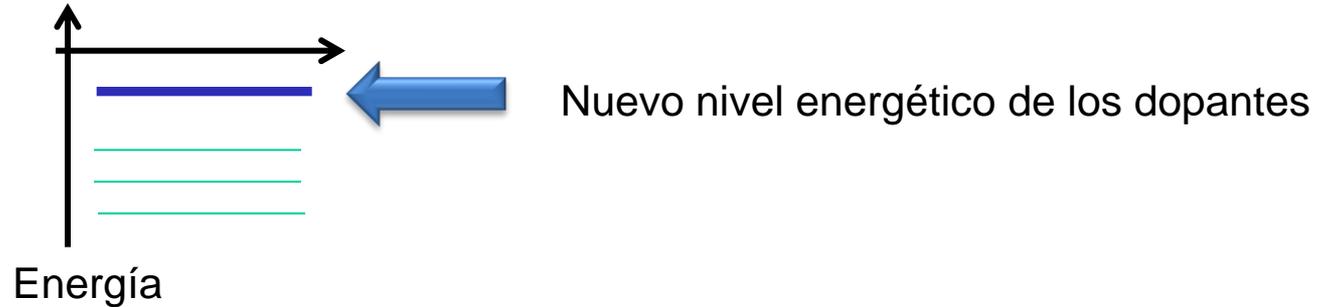
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Extrínseco Tipo P

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)

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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

Cartagena99

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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

△ Semiconductor Extrinsic Type N:

$$N_D \gg N_A$$
$$N_D \gg n_i$$



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

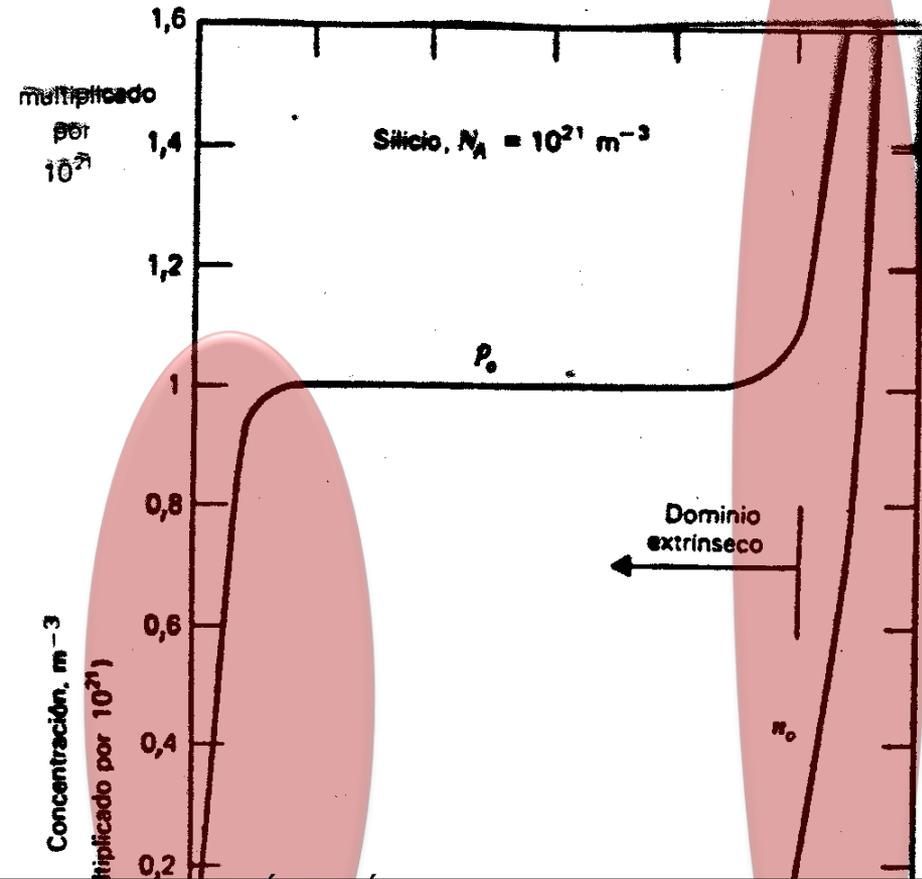
△ Semiconductor Extrinsic Type P:

$$N_A \gg N_D$$
$$N_A \gg n_i$$



Cartagena99

Zonas Intrínsecas



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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, J_a (Amperios/m²)

△ σ = Conductividad

△ ρ = Resistividad

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

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

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

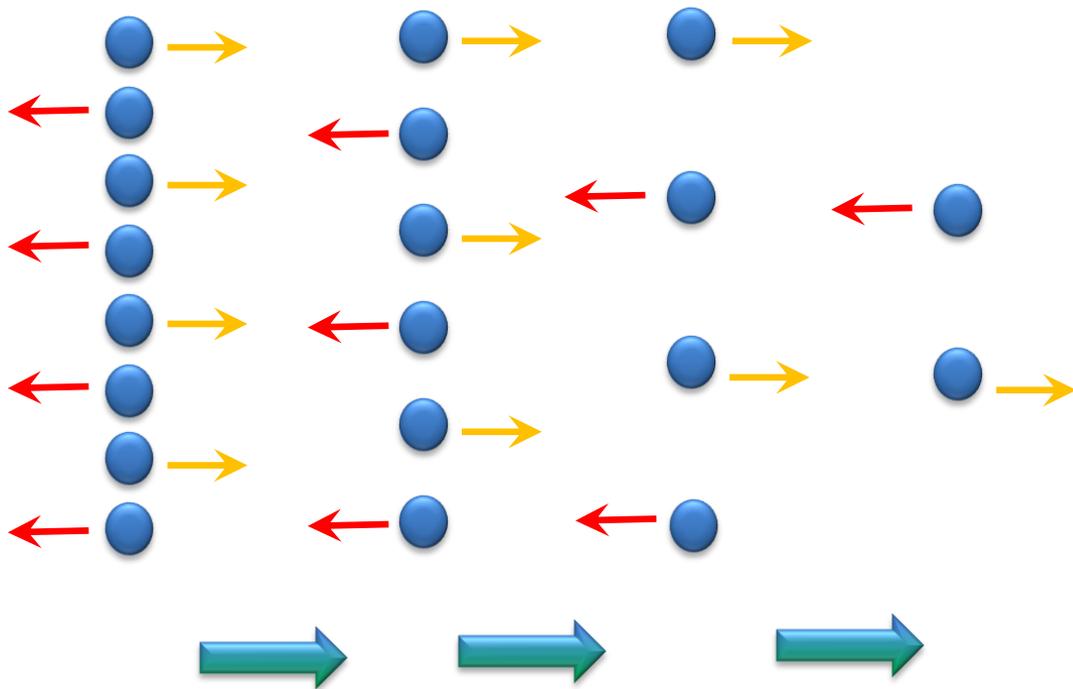
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

1.5 Movimientos de Portadores

Corriente de Difusión



flujo de portadores
proporcional al gradiente
de concentración

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVIA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

1.5 Movimientos de Portadores

Corriente de Difusión

△ Densidad de Corriente de difusión, J_d (A/m²)

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

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

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

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, J (A/m²)

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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).

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

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

Recombinación

Generación de pares electrón/hueco

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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**

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

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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

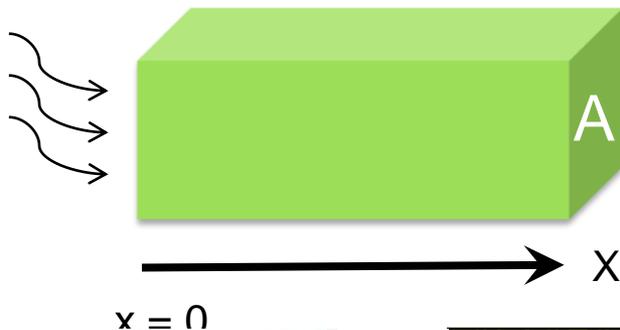
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

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 $\rightarrow p' \ll n$



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



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

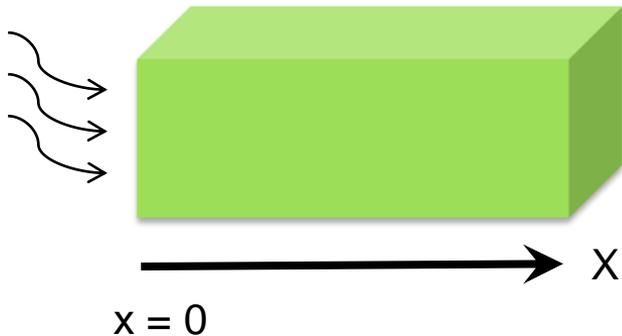
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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)



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

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

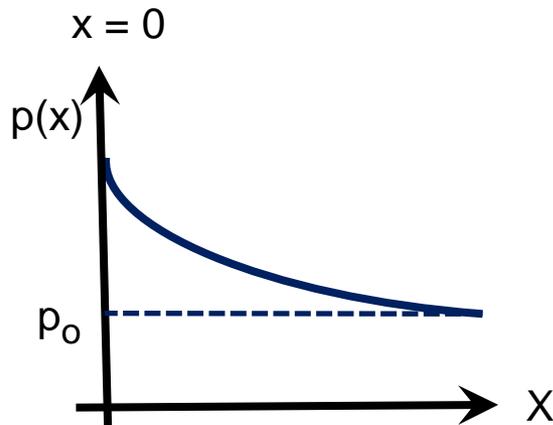
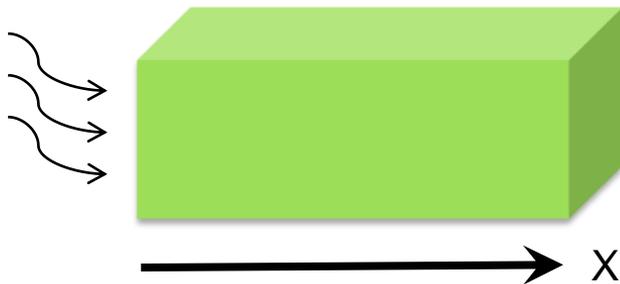
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

1.5 Movimientos de Portadores

Ejemplo de Aplicación de las Ecuaciones de Continuidad



Condiciones de contorno:

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

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

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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:

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

1.5 Movimientos de Portadores

Ejemplo de Aplicación de las Ecuaciones de Continuidad

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

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

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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 $\rightarrow p(x), n(x)$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

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:

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

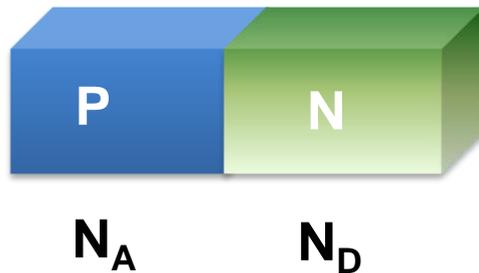
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Ley de Boltzman:

1.5 Movimientos de Portadores

Ejemplo de Aplicación de las Ecuaciones de Continuidad

Consecuencias:



Concentraciones constantes en la zona P y N

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70