

**TEMA 3**  
**TEORIA DE SEMICONDUCTORES**  
(Guía de clases)

Asignatura: Dispositivos Electrónicos I  
Dpto. Tecnología Electrónica

# **CONTENIDO**

## **PARTÍCULAS CARGADAS**

- Átomo
- Electrón
- Ión
- Hueco

## **TEORÍA DE LAS BANDAS DE ENERGÍA**

## **AISLANTES, SEMICONDUCTORES Y METALES**

## **MOVILIDAD**

- Modelo de cargas de un metal

## **DENSIDAD DE CORRIENTE**

## **SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS**

- Mecanismo de desplazamiento de un hueco

## **IMPUREZAS DONADORAS Y ACEPTADORAS**

- Semiconductor extrínseco tipo n
- Semiconductor extrínseco tipo p
- Ley de acción de masas

## **DENSIDAD DE CARGA EN SEMICONDUCTORES**

## **EFECTO HALL**

## **MODULACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD**

## **GENERACIÓN Y RECOMBINACIÓN DE CARGAS**

- Tiempo de vida medio de un portador

## **DIFUSIÓN**

## **VARIACIÓN DE POTENCIAL EN UN SEMICONDUCTOR**

## PARTÍCULAS CARGADAS

Átomo: Menor partícula de un elemento químico que posee sus propiedades.

Electrón: Partícula elemental del átomo cargada negativamente.

Masa:  $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$  Kg.

Carga:  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  culombios

Ión: Partícula cargada que se origina cuando un átomo pierde o gana electrones. Su carga es igual al número de electrones perdidos (ión positivo) o ganados (ión negativo).

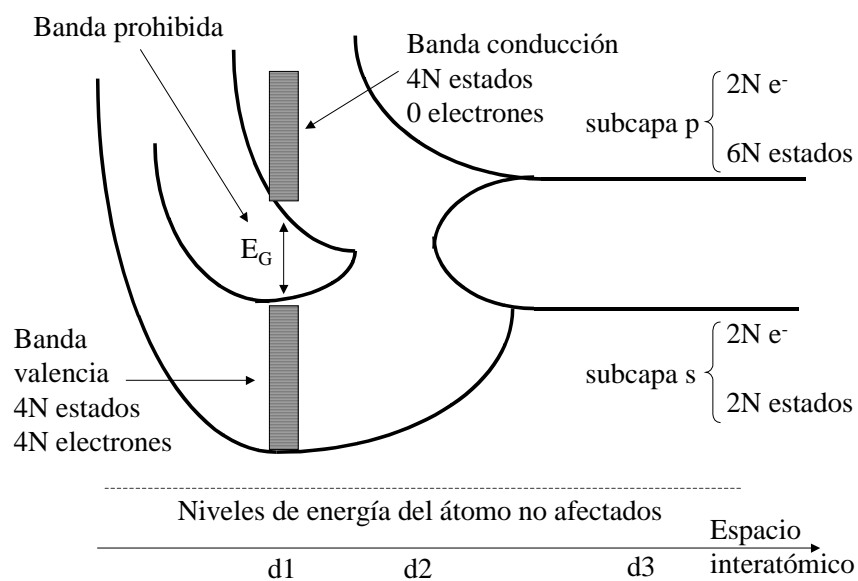
Hueco: Ausencia de un electrón en un enlace covalente. Su carga asociada es la del electrón con signo +.

## TEORÍA DE LAS BANDAS DE ENERGÍA

Sólido: Cuerpo que tiene forma y volumen constantes.

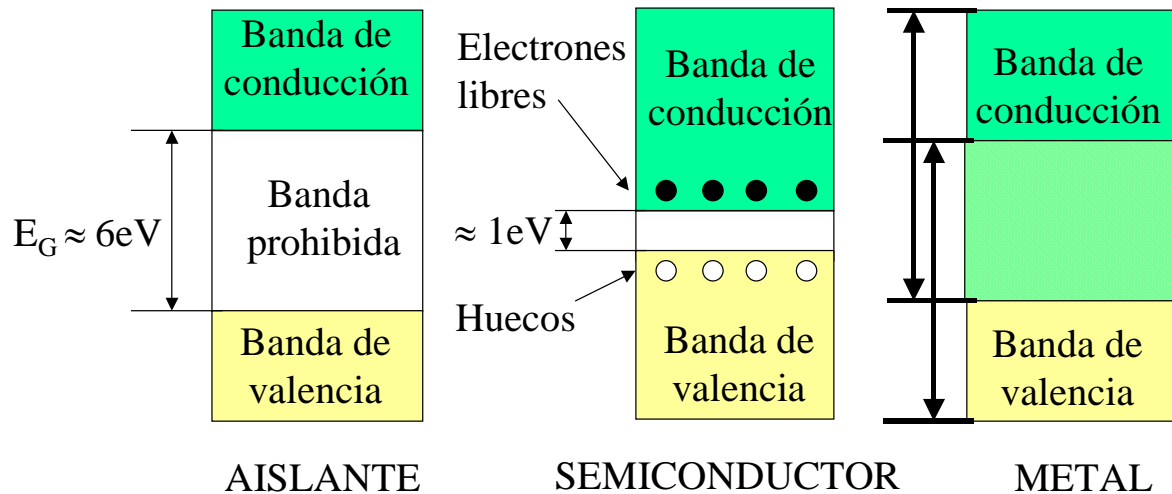
Cristal: Sólido cuyas partículas están dispuestas regular y periódicamente.

El potencial característico de la estructura cristalina es una función periódica en el espacio. Debido al acoplamiento entre las capas más exteriores de electrones de los átomos, la mecánica cuántica determina que sus niveles de energía están próximos entre sí y forman una banda de energía.



## ANOTACIONES

## AISLANTES, SEMICONDUCTORES Y METALES



Semiconductores prácticos: Silicio ( $E_G = 1,21\text{ eV}$  a  $0^\circ\text{K}$ ), Germanio ( $E_G = 0,785\text{ eV}$  a  $0^\circ\text{K}$ ).

$$E_G(\text{Si}) = 1,21 - 3,60 \cdot 10^{-4} T$$

$$E_G(\text{Ge}) = 0,785 - 2,23 \cdot 10^{-4} T$$

A temperatura ambiente  $T = 300^\circ\text{K}$ :  $E_G(\text{Si}) = 1,1\text{ eV}$  y  $E_G(\text{Ge}) = 0,72\text{ eV}$

## MOVILIDAD

### Modelo de cargas de un metal:

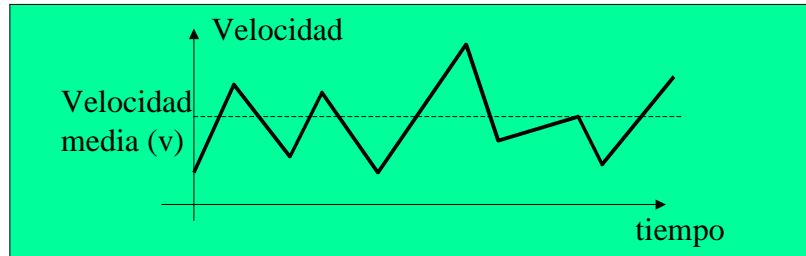
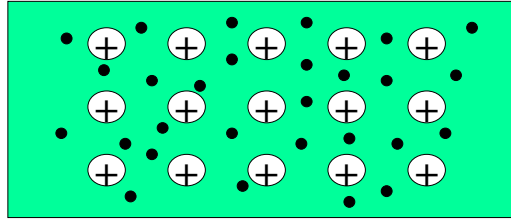
Región que contiene una red periódica tridimensional de iones pesados fuertemente enlazados rodeados de una nube de "gas electrónico".

Al aplicar un campo eléctrico se cumple la 1ª ley de Newton:  $a = F/m = q \cdot E/m$

Hasta que se llega a un equilibrio con la energía perdida en las colisiones y se llega a una velocidad media constante (similar a lo que ocurre con el rozamiento):  $v_{\text{media}} = \mu \cdot E$

$\mu \Rightarrow$  movilidad de los electrones [ $\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ]

## ANOTACIONES



El desplazamiento debido a  $E$  se superpone al debido a la agitación térmica.

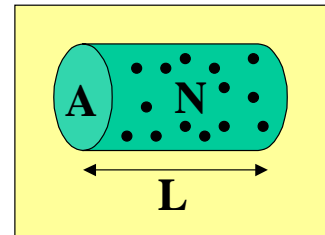
### DENSIDAD DE CORRIENTE

Nº  $e^-$  que atraviesan sección por unidad de tiempo:  $N/T$

$T$ : tiempo que tarda  $e^-$  en recorrer  $L \Rightarrow T = L/v$

$$I = (N/T) \cdot q = (N \cdot q \cdot v)/L \text{ [Amperios]}$$

$$J = I/A = (N \cdot q \cdot v)/(A \cdot L) \text{ [Amp./m}^2\text{]}$$



$n = N/(A \cdot L) \Rightarrow$  concentración de electrones por unidad de volumen [ $e^-/m^3$ ]

$\rho = n \cdot q \Rightarrow$  densidad de carga [culomb/ $m^3$ ]

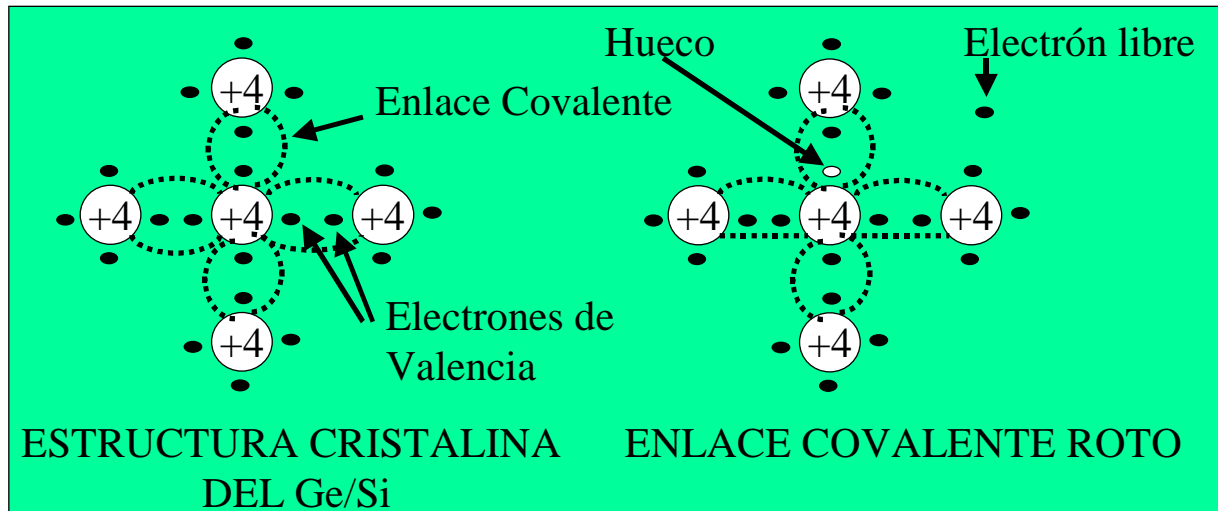
$$J = n \cdot q \cdot v = \rho \cdot v$$

$$J = n \cdot q \cdot v = n \cdot q \cdot \mu \cdot E = \sigma \cdot E$$

$\sigma = n \cdot q \cdot \mu \Rightarrow$  conductividad [ $1/(\Omega \cdot m)$ ]

Densidad térmica de potencia (efecto Joule) es la potencia disipada por unidad de volumen. La energía se cede a los iones en los choques:  $(V \cdot I)/\text{volumen} = (E \cdot L \cdot J \cdot A)/\text{volumen} = E \cdot J = \sigma \cdot E^2$  [watt/ $m^3$ ]

### ANOTACIONES

**SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS**

Hueco: Enlace covalente roto

A 0 °K los semiconductores intrínsecos son aislantes.

A temperatura ambiente existen electrones libres y huecos resultantes del aporte de energía térmica.

El mecanismo de desplazamiento de un hueco no implica electrones libres y supone un movimiento de cargas positivas.

En un semiconductor intrínseco la concentración de electrones libres ( $n$ ) es igual a la de huecos ( $p$ ) e igual a su vez a la concentración intrínseca.

$$n = p = n_i$$

Recombinación: Desaparición de pares de electrón-hueco

**ANOTACIONES**

## **IMPUREZAS DONADORAS Y ACEPTADORAS**

Semiconductor extrínseco: Semiconductor contaminado con átomos de otro material.

Semiconductor extrínseco tipo n: Semiconductor contaminado con impurezas donadoras (elementos químicos pentavalentes como por ejemplo el Sb, P, As del grupo VA de la tabla periódica).

Semiconductor extrínseco tipo p: Semiconductor contaminado con impurezas aceptadoras (elementos químicos trivalentes como por ejemplo el B, Ga, In del grupo IIIA de la tabla periódica).

### Ley de acción de masas

A una temperatura T de equilibrio térmico se cumple que:

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

$n_i \Rightarrow$  concentración intrínseca. Aumenta con la temperatura.

Semiconductor tipo n:  $e^-$  (n)  $\rightarrow$  portadores mayoritarios  $\rightarrow n_n$

Huecos (p)  $\rightarrow$  portadores minoritarios  $\rightarrow p_n$

Semiconductor tipo p:  $e^-$  (n)  $\rightarrow$  portadores minoritarios  $\rightarrow n_p$

Huecos (p)  $\rightarrow$  portadores mayoritarios  $\rightarrow p_p$

Las impurezas aumentan la conductividad.

## **DENSIDAD DE CARGA EN UN SEMICONDUCTOR**

Ley de acción de masas:  $n \cdot p = n_i^2$

Ley de la neutralidad eléctrica ( $n^\circ$  cargas  $+$  =  $n^\circ$  cargas  $-$ ):  $p + N_D = n + N_A$

Semiconductor tipo n:

$$N_A = 0 \Rightarrow n = N_D + p \approx N_D$$

$$n_n \approx N_D ; \text{ como } n_n \cdot p_n = n_i^2 \Rightarrow p_n = n_i^2 / N_D$$

---

## **ANOTACIONES**

Semiconductor tipo p:

$$N_D = 0 \Rightarrow p = N_A + n \approx N_A$$

$$p_p \approx N_A ; \text{ como } n_p \cdot p_p = n_i^2 \Rightarrow n_p = n_i^2 / N_A$$

Concentración intrínseca

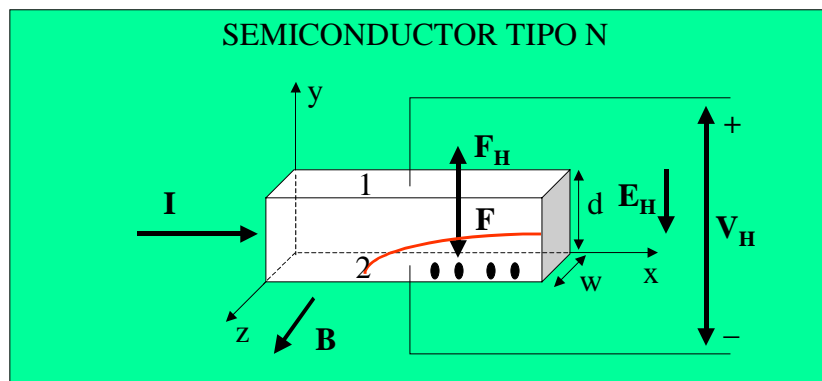
$$n_i^2 = A_0 \cdot T^3 \cdot e^{-E_{G0}/K \cdot T}$$

$E_{G0}$ : ancho de la banda prohibida a 0 °K

K: constante de Boltzman =  $1,381 \cdot 10^{-23}$  julios/°K

$A_0$ : constante independiente de T

Conductividad de un semiconductor:  $\sigma = n \cdot \mu_n \cdot q + p \cdot \mu_p \cdot q$

**EFEECTO HALL**

En equilibrio:

$$q \cdot E_H = q \cdot v \cdot B \quad \Rightarrow \quad V_H = d \cdot v \cdot B; \quad V_H : \text{ Tensión de Hall}$$

$$V_H = E_H \cdot d$$

Aplicaciones:

- Medida tipo de semiconductor (n o p) según el signo de la tensión de Hall
- Medida de la densidad de carga  $\rho = (B \cdot I)/(w \cdot V_H)$
- Medida de la movilidad y conductividad
- Medida de campo magnético  $B = \rho \cdot w \cdot (V_H/I)$
- Multiplicador de efecto Hall  $V_H = (1/\rho \cdot w) \cdot B \cdot I$

**ANOTACIONES**



## MODULACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD

La conductividad  $\sigma$  puede elevarse incrementando  $n$  o  $p$  por medio de:

- Elevación de temperatura
- Dopaje
- Illuminación. Fotoconductores o fotorresistores o LDR (Light Dependent Resistors)

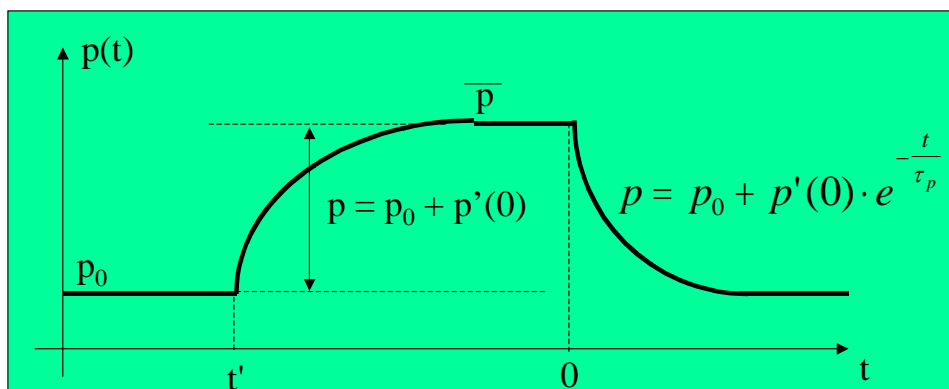
$$\lambda_c = 1,24/E_G \text{ [\mu m]}$$

## GENERACIÓN Y RECOMBINACIÓN DE CARGAS

Tiempo de vida medio de un portador: ( $\tau_p$  o  $\tau_n$ ) Es el tiempo de existencia de un hueco (electrón) antes de recombinarse.

Supongamos barra de Silicio tipo  $n$  con una concentración en equilibrio  $n_0$  y  $p_0$ , que en  $t'$  se ilumina alcanzándose las concentraciones  $p$  y  $n$ . Lógicamente  $p - p_0 = n - n_0$

En un tiempo  $t=0$  se suprime la iluminación.



Silicio tipo  $n \Rightarrow \Delta p/p_0 \gg \Delta n/n_0 \Rightarrow$  La generación de portadores (en este caso por iluminación) afecta principalmente a los portadores minoritarios. Por tanto vamos a realizar el estudio de los portadores minoritarios, en este caso de los huecos.

$p/\tau_p$  : decrecimiento del nº de huecos por unidad de tiempo

$g$  : Incremento de huecos (por generación térmica) por unidad de tiempo

$dp/dt = g - p/\tau_p$  En equilibrio  $\Rightarrow dp/dt = 0$  y  $p = p_0 \Rightarrow g = p_0/\tau_p$

$dp/dt = (p_0 - p)/\tau_p = -p'/\tau_p$

Como  $p' = p - p_0 \Rightarrow dp'/dt = dp/dt \Rightarrow dp'/dt = -p'/\tau_p$

## ANOTACIONES

$$p'(t) = p'(0) \cdot e^{-t/\tau_p} \Rightarrow p - p_0 = p'(0) \cdot e^{-t/\tau_p} \Rightarrow p = p_0 + p'(0) \cdot e^{-t/\tau_p}$$

Una vez creados los portadores ha de transcurrir un cierto tiempo hasta que se recombinen.

## DIFUSIÓN

Además de producirse una  $I$  (corriente de conducción) en un semiconductor al aplicar un campo eléctrico  $E$ , se puede tener otra corriente  $I$  de difusión de portadores entre dos zonas de diferente concentración.

$J_p = -q \cdot D_p \cdot dp/dx$  : Densidad de corriente de difusión de huecos

$J_n = q \cdot D_n \cdot dn/dx$  : Densidad de corriente de difusión de electrones

$D_p$  y  $D_n$  : Constante de difusión

Relación de Einstein:

$$D_p/\mu_p = D_n/\mu_n = V_T = T(^{\circ}\text{K})/11600 \ (\approx 26 \text{ mV a } 300 \text{ }^{\circ}\text{K})$$

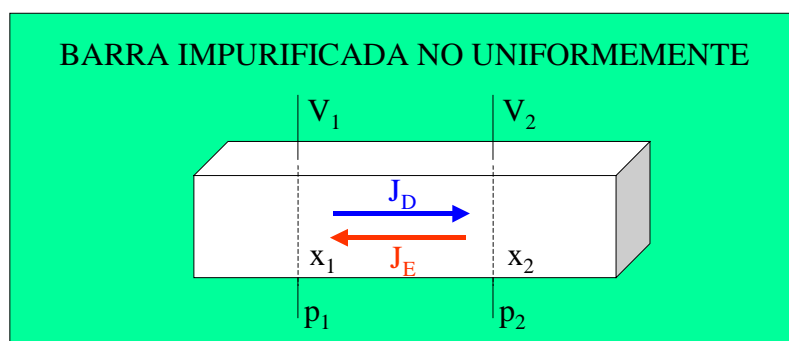
$V_T$  : Potencial equivalente de temperatura

Corriente total:  $J_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E - q \cdot D_p \cdot dp/dx$

$$J_n = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot E + q \cdot D_n \cdot dn/dx$$

## VARIACIÓN DE POTENCIAL EN UN SEMICONDUCTOR

Supongamos una barra impurificada no uniformemente



## ANOTACIONES

Si está en circuito abierto:  $I = 0 \Rightarrow J_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E - q \cdot D_p \cdot dp/dx = 0$

$$E = (D_p/\mu_p \cdot p) \cdot dp/dx = (V_T/p) \cdot dp/dx$$

Además tenemos que  $E = -dV/dx \Rightarrow dV = -E \cdot dx$

Por lo tanto  $dV = -V_T \cdot dp/p$

$$V_{21} = -V_T \cdot \int dp/p = V_T \cdot \ln(p_1/p_2) \Rightarrow p_1 = p_2 \cdot e^{V_{21}/V_T}$$

Análogamente se tiene:

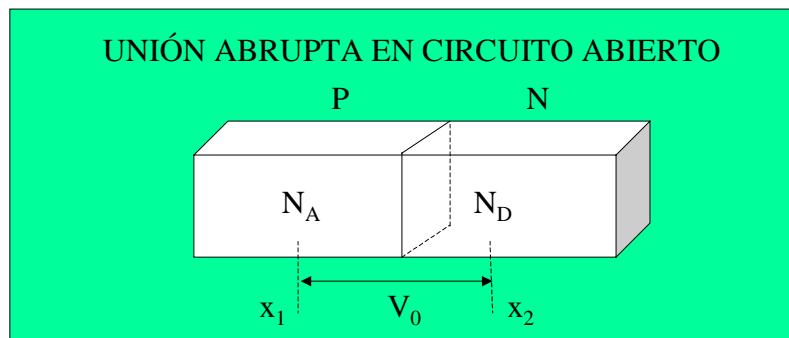
$$J_n = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot E + q \cdot D_n \cdot dn/dx = 0 \Rightarrow n_1 = n_2 \cdot e^{-V_{21}/V_T}$$

Lo anterior implica que:

$$p_1 \cdot n_1 = p_2 \cdot n_2 \Rightarrow p \cdot n \text{ es independiente de } x$$

$$n \cdot p = n_i^2 \text{ Demostración de la ley de acción de masas.}$$

Supongamos una unión abrupta en circuito abierto:



$$V_0 = V_{12} = V_T \cdot \ln(p_p/p_n)$$

$$p_p \approx N_A \text{ y } p_n \approx n_i^2/N_D$$

$$V_0 = V_T \cdot \ln(N_A \cdot N_D/n_i^2) : \text{Diferencia de potencial de contacto}$$