

# TEMA 3

## TEORIA DE SEMICONDUCTORES

### 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:  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Culomb (C)

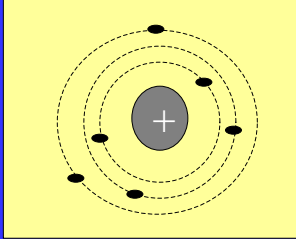
▶ ION

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

▶ HUECO

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

# ESTRUCTURA ELECTRÓNICA



NÚMEROS CUÁNTICOS

$$\left\{ \begin{array}{l} n \text{ (capa)} = 1, 2, 3, \dots \\ l \text{ (tipo de orbital)} = 0 \dots (n-1) \left\{ \begin{array}{l} 0 \Rightarrow \text{orbital s} \\ 1 \Rightarrow \text{orbital p} \\ 2 \Rightarrow \text{orbital d} \\ 3 \Rightarrow \text{orbital f} \end{array} \right. \\ m \text{ (orientación)} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l \\ s \text{ (giro)} = +1/2, -1/2 \end{array} \right.$$

## ▶ PRINCIPIO DE EXCLUSIÓN DE PAULI

En un sistema electrónico dos electrones no pueden tener los cuatro números cuánticos iguales

## ▶ NÚMERO ATÓMICO

Da el número de electrones que giran en torno al núcleo

## CONFIGURACIÓN ELECTRÓNICA DEL GRUPO IVA

C (n° atómico = 6) -> Aislante en forma cristalina (diamante)

Si (n° atómico = 14) -> Semiconductor

Ge (n° atómico = 32) -> Semiconductor

Sn (n° atómico = 50) -> Metal



C (n° atómico = 6)  $\Rightarrow 1s^2 2s^2 2p^2$

Si (n° atómico = 14)  $\Rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$

Ge (n° atómico = 32)  $\Rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$

Sn (n° atómico = 50)  $\Rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^2$

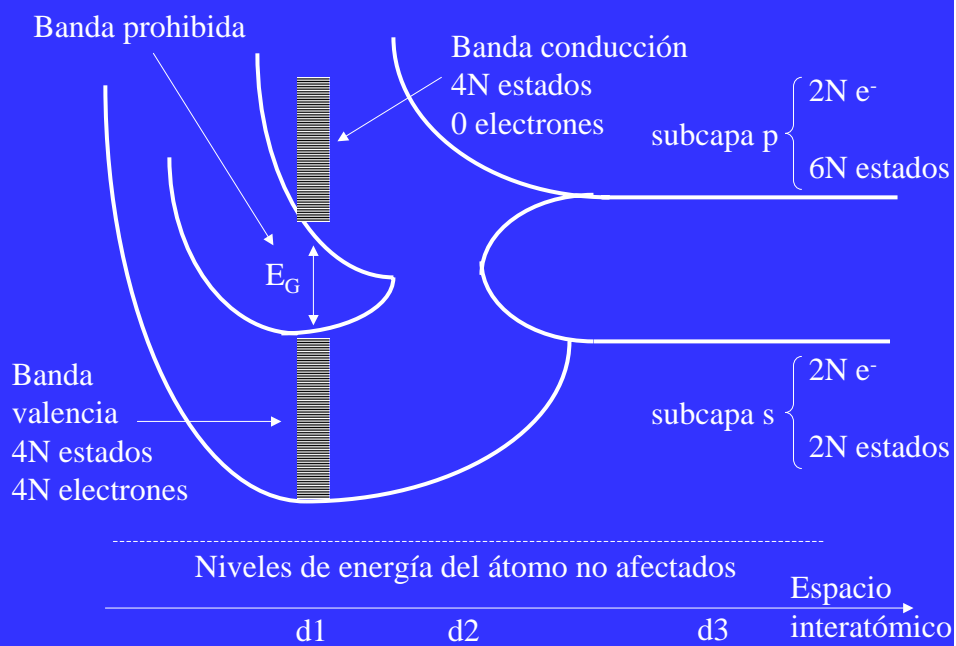
- Los electrones de las capas interiores están fuertemente unidos al átomo y no pueden desligarse fácilmente
- Los átomos que tienen completas sus últimas capas son muy estables
- Átomos con configuraciones muy estables son también aquellos que tienen 8 electrones en la última capa
- Los electrones de la capa más externa se conocen como electrones de valencia

# TEORÍA DE LAS BANDAS DE ENERGÍA

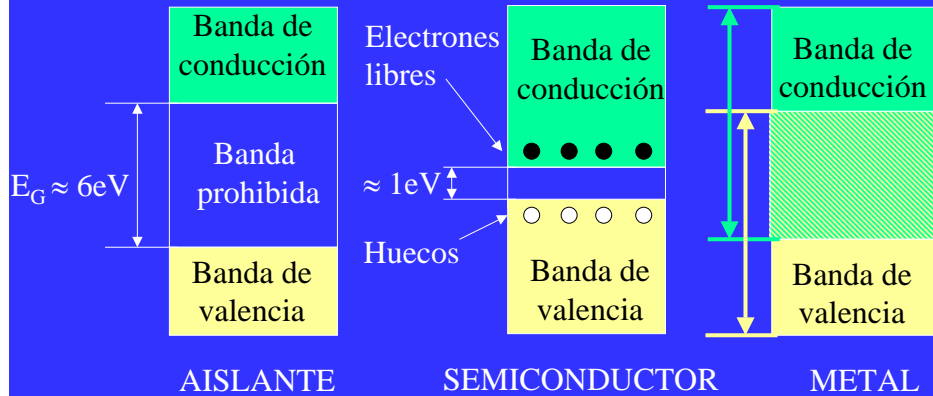
- ▶ **SÓLIDO**  
Cuerpo que tiene forma y volumen constante
- ▶ **CRISTAL**  
Sólido cuyas partículas están dispuestas regular y periódicamente

DE LOS ELECTRONES DE LA ÚLTIMA CAPA DEPENDEN LAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y ÓPTICAS DE LOS MATERIALES

## CRISTAL DE N ÁTOMOS DE ELEMENTO GRUPO IVA



## AISLANTES, SEMICONDUCTORES Y METALES



- **ELECTRÓN-VOLTIO:**  $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Julios  
 Energía que adquiere la carga de un electrón cuando se le aplica 1 voltio.  $q \cdot V = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

\* Semiconductores más utilizados:

Silicio  $\Rightarrow E_G = 1,21 \text{ eV a } 0^\circ\text{K}$

Germanio  $\Rightarrow E_G = 0,785 \text{ eV a } 0^\circ\text{K}$

\* A  $0^\circ\text{K}$  los semiconductores son aislantes

\* Conducción en semiconductores  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Por energía térmica (intrínsecos)} \\ \text{Por impurezas (extrínsecos)} \end{array} \right.$

$$E_G (\text{Si}) = 1,21 - 3,6 \cdot 10^{-4} T \text{ (eV)}$$

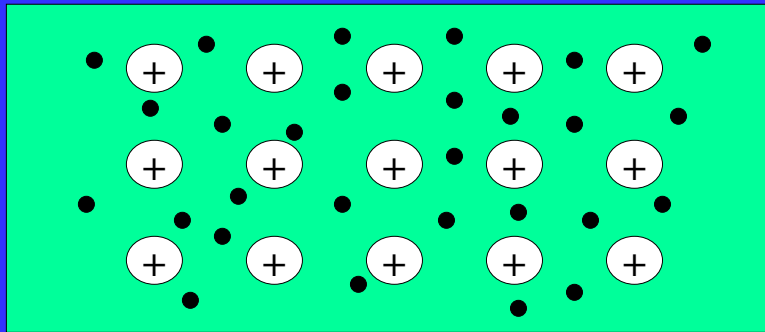
$$E_G (\text{Ge}) = 0,785 - 2,23 \cdot 10^{-4} T \text{ (eV)}$$

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

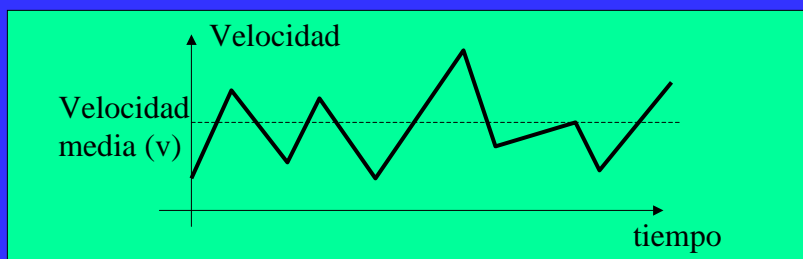
## MOVILIDAD

### Modelo de cargas de un metal

- ▶ Región que contiene una red periódica tridimensional de iones positivos pesados fuertemente enlazados, rodeados de una nube de gas electrónico

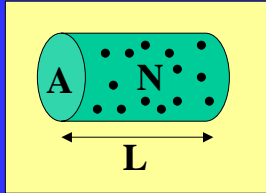


- ▶ Al aplicar un campo eléctrico  $\Rightarrow a = F/m = q \cdot E/m$   
Hasta que se llega a un equilibrio con la energía perdida en las colisiones, alcanzando una velocidad media constante:  
 $v_{\text{media}} = \mu \cdot E$        $\mu \Rightarrow$  movilidad electrones [ $\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ]



- ▶ Recorrido libre medio: Distancia media entre colisiones
- ▶ CORRIENTE: Flujo de cargas

## DENSIDAD DE CORRIENTE



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

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

$$I = \left( \frac{N}{T} \right) \cdot q = \frac{N \cdot q \cdot v}{L} [A] \qquad J = \frac{I}{A} = \frac{N \cdot q \cdot v}{A \cdot L} \left[ \frac{A}{m^2} \right]$$

$$n = \frac{N}{A \cdot L} \Rightarrow \text{concentración de } e^- \text{ por unidad de volumen } [e^-/m^3]$$

$$\rho = n \cdot q \Rightarrow \text{densidad de carga } [C/m^3]$$

$$J = \frac{N \cdot q \cdot v}{A \cdot L} = n \cdot q \cdot v = n \cdot q \cdot \mu \cdot E = \sigma \cdot E$$

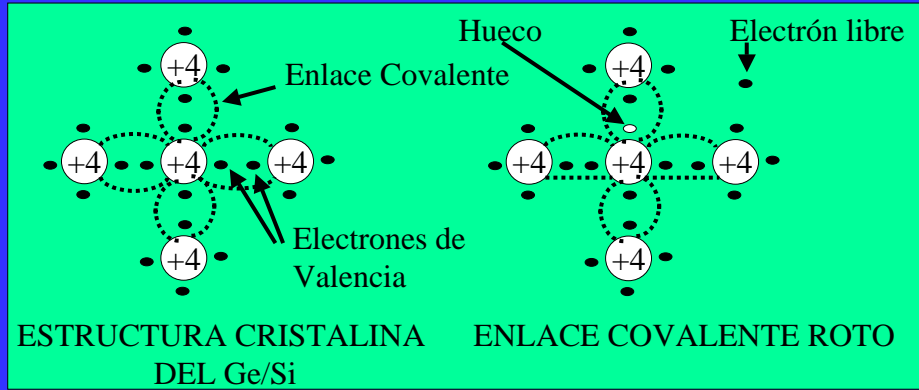
$$J = \sigma \cdot E \Rightarrow \text{Ley de Ohm}$$

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

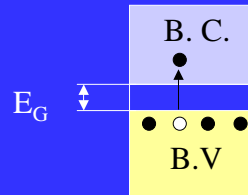
- DENSIDAD TÉRMICA DE POTENCIA (Efecto Joule)  
Es la potencia disipada por unidad de volumen. La energía se cede a los iones en los choques.

$$\frac{V \cdot I}{\text{volumen}} = \frac{E \cdot L \cdot J \cdot A}{\text{volumen}} = E \cdot J = \sigma \cdot E^2 [W/m^3]$$

## SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS



Temperatura ambiente (300 °K)  $\left\{ \begin{array}{l} E_G (\text{Ge}) = 0,72 \text{ eV} \\ E_G (\text{Si}) = 1,1 \text{ eV} \end{array} \right.$



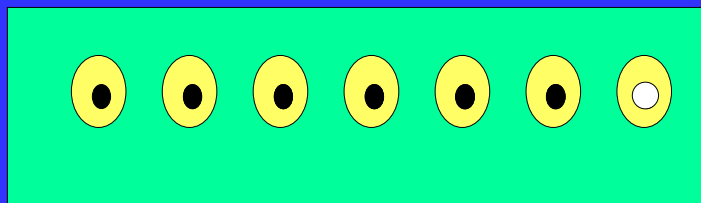
### ▶ HUECO

Enlace covalente roto

\* A 0 °K los semiconductores intrínsecos son aislantes

\* A temperatura ambiente (300 °K) existen electrones libres y huecos resultantes del aporte de energía térmica

### ▶ MECANISMO DE DESPLAZAMIENTO DE UN HUECO





▶ **CONCENTRACIONES DE ELECTRONES Y HUECOS**

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 ( $n_i$ ).

$$n = p = n_i$$

▶ **RECOMBINACIÓN**

Desaparición de pares de electrón-hueco

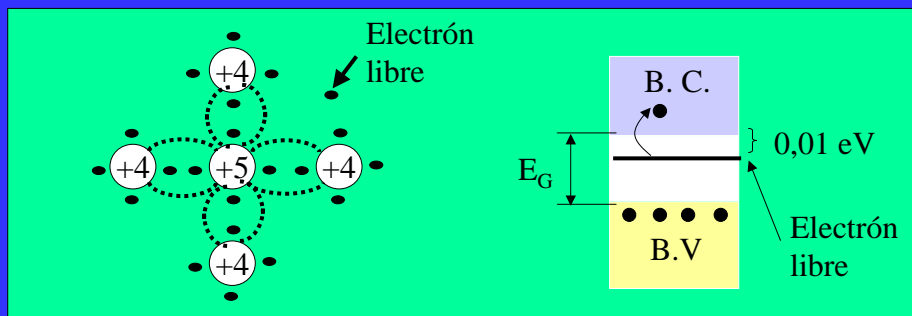
## SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS

▶ **SEMICONDUCTOR EXTRÍNSECO**

Semiconductor contaminado con átomos de otro material

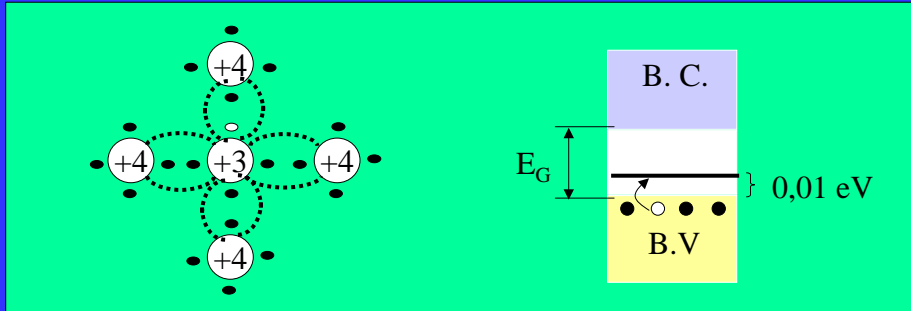
▶ **SEMICONDUCTOR EXTRÍNSECO TIPO N**

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 aceptoras (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

$$n_i^2 = A_0 \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{E_{G_0}}{K \cdot T}} \left\{ \begin{array}{l} E_{G_0}: \text{ ancho de la banda prohibida a } 0 \text{ }^\circ\text{K} \\ K: \text{ cte de Boltzman} = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ julios/}^\circ\text{K} \\ \quad = 8,620 \cdot 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K} \\ A_0: \text{ una constante independiente de } T \end{array} \right.$$

## LAS IMPUREZAS AUMENTAN LA CONDUCTIVIDAD

Semiconductor tipo n  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Electrones portadores mayoritarios} \Rightarrow n_n \\ \text{Huecos portadores minoritarios} \Rightarrow p_n \end{array} \right.$

Semiconductor tipo p  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Huecos portadores mayoritarios} \Rightarrow p_p \\ \text{Electrones portadores minoritarios} \Rightarrow n_p \end{array} \right.$

## DENSIDAD DE CARGA

### ► LEY DE ACCIÓN DE MASAS

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

### ► LEY DE LA NEUTRALIDAD ELÉCTRICA

$$n^\circ \text{cargas } + = n^\circ \text{cargas } - \Rightarrow p + N_D = n + N_A$$

SEMICONDUCTOR TIPO N

$$N_A = 0 \Rightarrow n = N_D + p \overset{n \gg p}{\approx} N_D$$

$$n_n \approx N_D \quad n_n \cdot p_n = n_i^2 \Rightarrow p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

## SEMICONDUCTOR TIPO P

$$N_D = 0 \Rightarrow p = N_A + n \overset{p \gg n}{\approx} N_A$$

$$p_p \approx N_A \quad n_p \cdot p_p = n_i^2 \Rightarrow n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

---

$$\text{Si } N_A = N_D$$

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

## CONDUCTIVIDAD

▶ METAL (unipolar)

$$\sigma = n \cdot q \cdot \mu$$

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

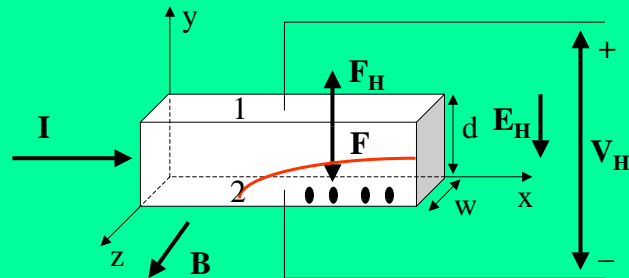
▶ SEMICONDUCTOR (bipolar)

$$\sigma = n \cdot q \cdot \mu_n + p \cdot q \cdot \mu_p = q \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$$

$$J = \sigma \cdot E = q \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \cdot E$$

## EFECTO HALL

### SEMICONDUCTOR TIPO N

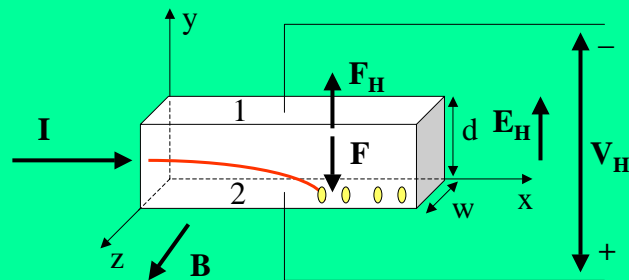


$$\vec{F} = \bar{q} \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \Rightarrow F = q \cdot v \cdot B \quad \vec{F}_H = \bar{q} \cdot \vec{E}_H \Rightarrow F_H = q \cdot E_H$$

$$\text{En equilibrio} \Rightarrow F = F_H \Rightarrow q \cdot v \cdot B = q \cdot E_H \Rightarrow E_H = v \cdot B$$

$$V_H = E_H \cdot d \Rightarrow V_H = d \cdot v \cdot B$$

### SEMICONDUCTOR TIPO P



$$\vec{F} = \bar{q} \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \Rightarrow F = q \cdot v \cdot B \quad \vec{F}_H = \bar{q} \cdot \vec{E}_H \Rightarrow F_H = q \cdot E_H$$

$$\text{En equilibrio} \Rightarrow F = F_H \Rightarrow q \cdot v \cdot B = q \cdot E_H \Rightarrow E_H = v \cdot B$$

$$V_H = E_H \cdot d \Rightarrow V_H = d \cdot v \cdot B$$

## ▶ APLICACIONES DEL EFECTO HALL

\* Medida del tipo de semiconductor según el signo de la tensión de Hall

\* Medida de la densidad de carga

$$V_H = d \cdot v \cdot B \Rightarrow v = \frac{V_H}{d \cdot B}$$

Coefficiente de Hall

$$R_H = 1/\rho$$

$$J = \rho \cdot v \Rightarrow \rho = \frac{J}{v} = \frac{I \cdot d \cdot B}{w \cdot d \cdot V_H} = \frac{I \cdot B}{w \cdot V_H}$$

\* Medida de la movilidad y conductividad  $\Rightarrow \sigma = n \cdot q \cdot \mu = \rho \cdot \mu$

\* Medida del campo magnético  $\Rightarrow B = \rho \cdot w \cdot \frac{V_H}{I}$

\* Multiplicador de efecto Hall  $\Rightarrow V_H = \left( \frac{1}{\rho \cdot w} \right) \cdot B \cdot I$

## MODULACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD

### ▶ ELEVACIÓN DE LA TEMPERATURA

Termistores: Mezclas de Ni O, Mn<sub>2</sub> O<sub>3</sub>, Co<sub>2</sub> O<sub>3</sub>

$\sigma$  aumenta  $\Rightarrow R$  disminuye  $\Rightarrow$  NTC

Semiconductores intrínsecos:

$\sigma$  (Ge)  $\Rightarrow$  6% por grado de temperatura

$\sigma$  (Si)  $\Rightarrow$  8% por grado de temperatura

### ▶ DOPAJE

Semiconductores extrínsecos

### ▶ ILUMINACIÓN

Fotoconductores, fotorresistores, o LDR (Light Dependent Resistors)

## ► ILUMINACIÓN

Fotoconductores, fotorresistores, o LDR (Light Dependent Resistors)

$c \equiv$  velocidad de la luz  $\approx 3 \cdot 10^8$  m/s

$h \equiv$  constante de Planck =  $6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s =  $4,14125 \cdot 10^{-15}$  eV·s

$$\lambda = \frac{c \cdot h}{E} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cdot 4,14125 \cdot 10^{-15} eV \cdot s}{E} = \frac{1,24}{E} [\mu m]$$

$$E = \frac{1,24}{\lambda} \Rightarrow \lambda_c = \frac{1,24}{E_G} [\mu m]$$

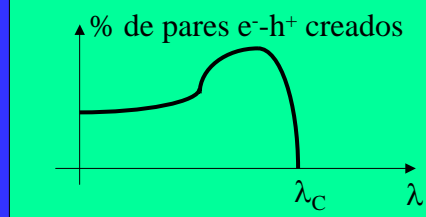
$E_G$  : Energía de la Banda Prohibida

(distancia entre Banda de Valencia y Banda de Conducción)

$\lambda_c$ : Longitud de onda crítica

$$E = \frac{1,24}{\lambda} \Rightarrow \lambda_c = \frac{1,24}{E_G} [\mu m]$$

### RESPUESTA ESPECTRAL



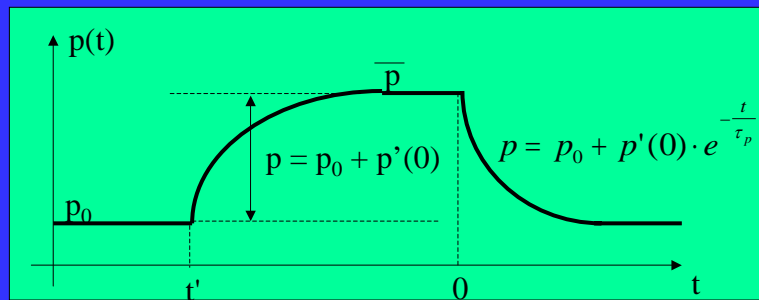
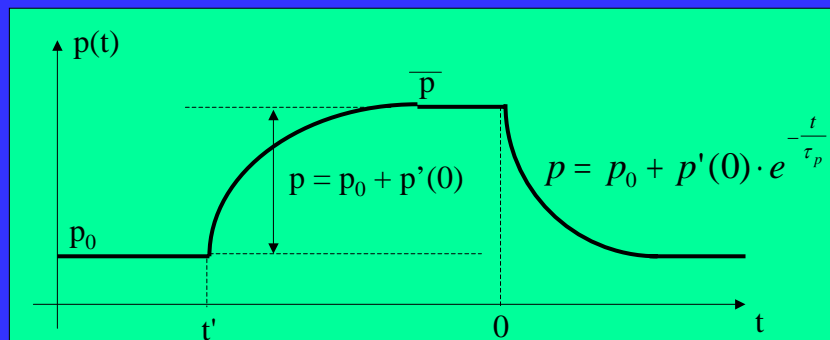
Aplicaciones LDR:

- \* Medida iluminación
- \* Interruptores sensibles a la luz

## GENERACIÓN Y RECOMBINACIÓN DE CARGAS

Suponemos barra de Silicio tipo n con concentraciones en equilibrio  $n_0$  y  $p_0$ . En  $t'$  se ilumina alcanzándose concentraciones  $\bar{p}$  y  $\bar{n}$ .

$$\bar{p} - p_0 = \bar{n} - n_0$$



Silicio tipo n  $\Rightarrow \Delta p/p_0 \gg \Delta n/n_0 \Rightarrow$  La generación de portadores afecta principalmente a los portadores minoritarios.

\* Tiempo de vida medio de un portador:

Es el tiempo de existencia de un hueco (electrón) antes de recombinarse  $\Rightarrow \tau_p \tau_n$

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

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



$$\frac{dp}{dt} = g - \frac{p}{\tau_p} \quad \text{En equilibrio} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{dp}{dt} = 0 \\ p = p_0 \end{array} \right\} \Rightarrow g = \frac{p_0}{\tau_p}$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{p_0}{\tau_p} - \frac{p}{\tau_p} = \frac{(p_0 - p)}{\tau_p} = -\frac{p'}{\tau_p}$$

$$p' = p - p_0 \Rightarrow \frac{dp'}{dt} = \frac{dp}{dt} \Rightarrow \frac{dp'}{dt} = -\frac{p'}{\tau_p}$$

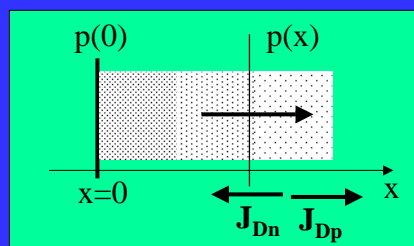
$$p'(t) = p'(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} \Rightarrow p(t) - p_0 = p'(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} \Rightarrow$$

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

## DIFUSIÓN

### ▶ CORRIENTE DE DIFUSIÓN

Corriente que se crea entre dos zonas de diferente concentración.



$$J_{D_p} = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx} \quad : \text{Densidad de corriente de difusión de huecos}$$

$$J_{D_n} = q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} \quad : \text{Densidad de corriente de difusión de electrones}$$

$D_p$  y  $D_n$  : Constantes de difusión de huecos y electrones [m<sup>2</sup>/s]

► RELACIÓN DE EINSTEIN

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = V_T = \frac{T(^{\circ}K)}{11600}$$

$$V_T = \frac{k \cdot T(^{\circ}K)}{q} \quad \text{A temperatura ambiente (300 }^{\circ}\text{K), } V_T \approx 26 \text{ mV}$$

$V_T$  : Potencial equivalente de temperatura

$k$  : Constante de Boltzman ( $\text{J}/^{\circ}\text{K}$ ) =  $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J}/^{\circ}\text{K}$

► CORRIENTE TOTAL

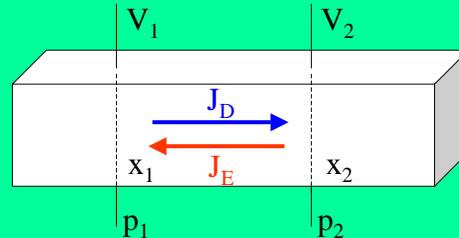
$$J_p = J_{E_p} + J_{D_p} = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E - q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

$$J_n = J_{E_n} + J_{D_n} = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot E + q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}$$

$$J = J_n + J_p$$

## VARIACIÓN DE POTENCIAL EN UN SEMICONDUCTOR

BARRA IMPURIFICADA NO UNIFORMEMENTE



En circuito abierto  $I = 0 \Rightarrow$  Debe existir una corriente de desplazamiento igual a la de difusión y en sentido contrario  $\Rightarrow$   
Creación de un campo eléctrico

Circuito abierto  $\Rightarrow I = 0 \Rightarrow J = 0$

$$J \approx J_p = J_{E_p} + J_{D_p} = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E - q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx} = 0$$

$$q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E = q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

$$E = \left( \frac{D_p}{\mu_p \cdot p} \right) \cdot \frac{dp}{dx} = \left( \frac{V_T}{p} \right) \cdot \frac{dp}{dx}$$

$$E = - \frac{dV}{dx} \Rightarrow dV = -E \cdot dx \Rightarrow dV = -V_T \cdot \frac{dp}{p}$$

$$V_{21} = -V_T \cdot \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = -V_T \cdot \ln p \Big|_{p_1}^{p_2} = -V_T \cdot (\ln p_2 - \ln p_1) =$$

$$V_T \cdot (\ln p_1 - \ln p_2) = V_T \cdot \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right) \Rightarrow p_1 = p_2 \cdot e^{\frac{V_{21}}{V_T}}$$

En el caso de semiconductor tipo N, análogamente se tiene que:

$$J \approx J_n = J_{E_n} + J_{D_n} = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot E + q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} = 0$$

$$V_{21} = -V_T \cdot \ln\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \Rightarrow n_1 = n_2 \cdot e^{-\frac{V_{21}}{V_T}}$$

$$p_1 = p_2 \cdot e^{\frac{V_{21}}{V_T}} \Rightarrow \text{Ecuación de BOLTZMAN para huecos}$$

$$n_1 = n_2 \cdot e^{-\frac{V_{21}}{V_T}} \Rightarrow \text{Ecuación de BOLTZMAN para electrones}$$

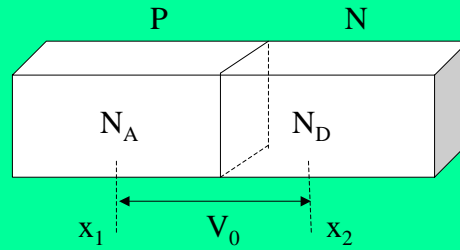
$$p_1 = p_2 \cdot e^{\frac{V_{21}}{V_T}} \qquad n_1 = n_2 \cdot e^{-\frac{V_{21}}{V_T}}$$

$$p_1 \cdot n_1 = \left(p_2 \cdot e^{\frac{V_{21}}{V_T}}\right) \cdot \left(n_2 \cdot e^{-\frac{V_{21}}{V_T}}\right) = p_2 \cdot n_2$$

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

$$p \cdot n = n_i^2 \Rightarrow \text{Demostración de la LEY DE ACCIÓN DE MASAS}$$

### UNIÓN ABRUPTA EN CIRCUITO ABIERTO



$$V_0 = V_{21} = V_T \cdot \ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right)$$

$$p_p \approx N_A$$

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

$$V_0 = V_T \cdot \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right)$$

Diferencia de potencial de contacto