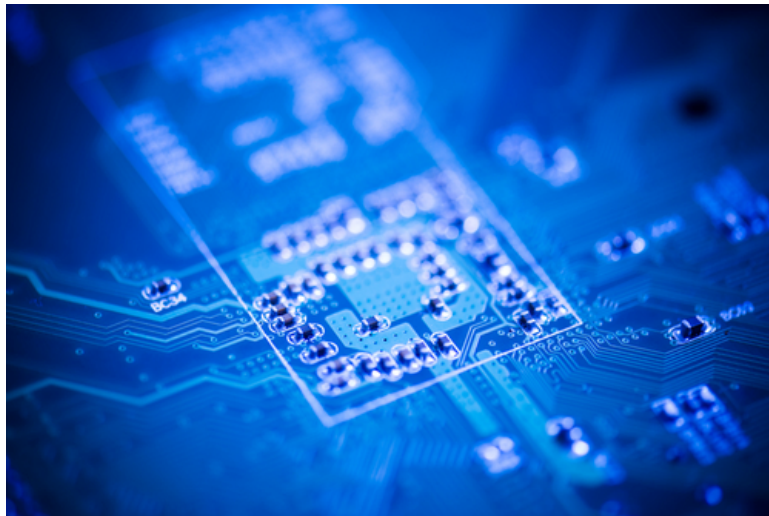
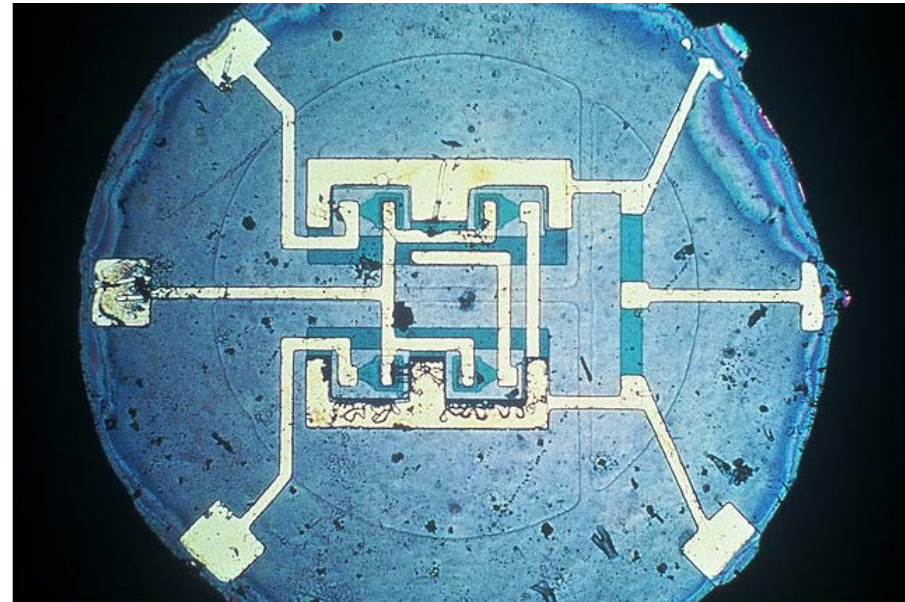


# TEMA 1. SEMICONDUCTORES



<http://www.tech-faq.com/wp-content/uploads/images/integrated-circuit-layout.jpg>



First commercial monolithic integrated circuit, Fairchild, 1961

IEEE 125 Aniversary: <http://www.flickr.com/photos/ieee125/with/2809342254/>

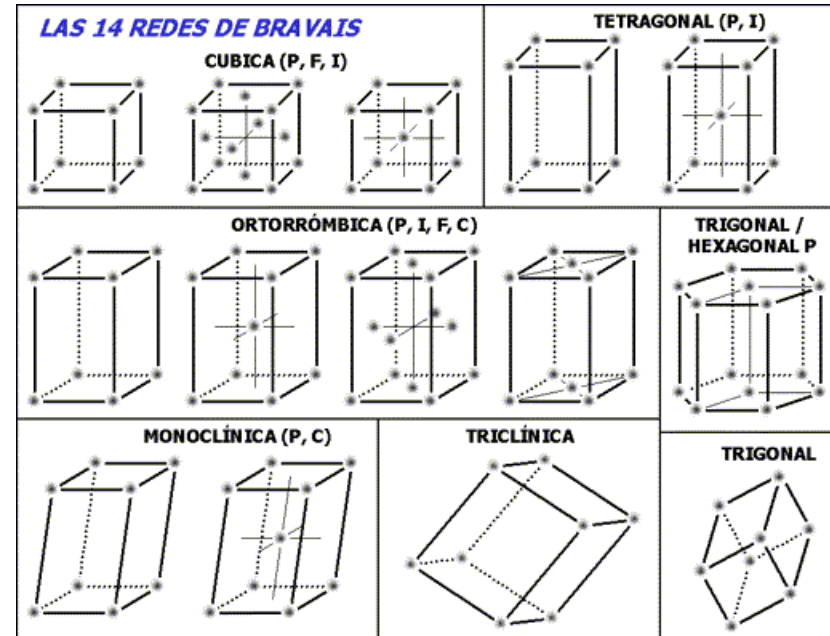


## TEMA 1. SEMICONDUCTORES

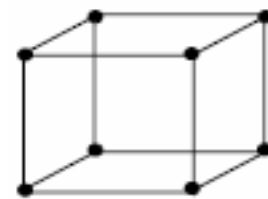
1. **Sólidos Cristalinos**
2. Semiconductores
3. Semiconductores intrínsecos y extrínsecos
4. Densidad de portadores en un semiconductor
5. Transporte de portadores en un semiconductor
  - Arrastre
  - Difusión
  - Generación-recombinación
6. Ejercicios propuestos

### ■ Sólidos cristalinos

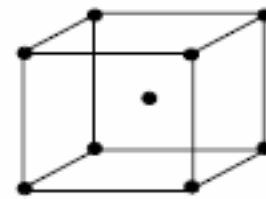
- Una posible clasificación de los materiales atendiendo a su **estructura cristalina**: cristalinos, policristalinos, amorfos.
- Los sólidos cristalinos son agrupaciones periódicas de una estructura base, que por traslación reproduce todo el material cristalino.
- Existen siete sistemas cristalinos →
- En particular nos va a interesar el **sistema cúbico** (centrado en las caras) dado que es el sistema en el que cristalizan la mayoría de los materiales sólidos electrónicos.



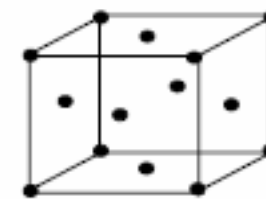
[http://enciclopedia.us.es/index.php/Redes\\_de\\_Bravais](http://enciclopedia.us.es/index.php/Redes_de_Bravais)



Red Cúbica simple



Red Cúbica centrada en cuerpo

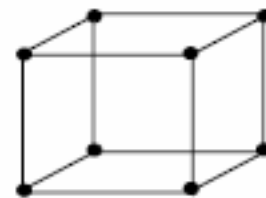


Red Cúbica centrada en caras

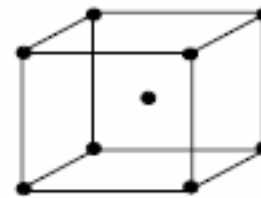
Figura 1.- Sistema cúbico

D. Pardo, et al. 1999

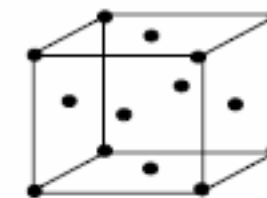
- Clasificación de Sólidos cristalinos en función de sus **propiedades eléctricas**
  - Los Semiconductores son materiales que poseen propiedades intermedias de conducción.
  - Los materiales semiconductores más importantes son
    - Silicio
    - Germanio
    - GaAs



Red Cúbica simple



Red Cúbica centrada en cuerpo



Red Cúbica centrada en caras

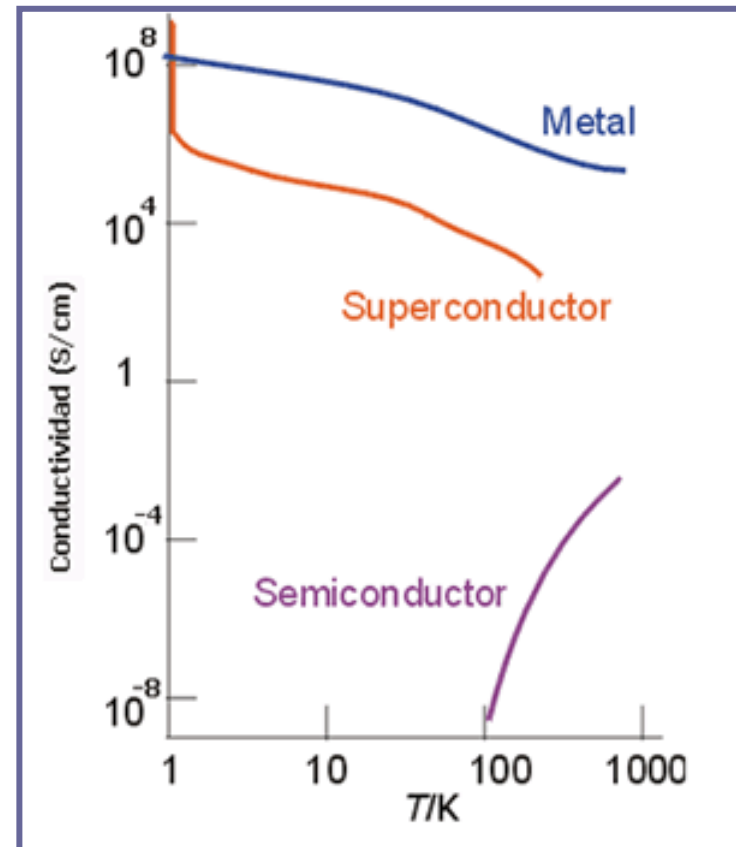
Figura 1.- Sistema cúbico

D. Pardo, et al. 1999

- **Ambos cristalizan en el sistema cúbico con red centrada en las caras.**
- Para comprender mejor esta definición es necesario recordar la clasificación de los elementos según su capacidad de conducción; en la naturaleza encontramos materiales:
  - Conductores
  - Aislantes
  - Semiconductores

# TEMA 1. SEMICONDUCTORES 1.1. SÓLIDOS CRISTALINOS

- Clasificación de Sólidos cristalinos en función de sus **propiedades eléctricas**
  - Metales, semiconductores, aislantes...
  - Pero ¿cuales son las características físicas que diferencian a cada uno de ellos?
    - Debemos ahondar un poco mas en el estudio de la física de los componentes.
    - Los materiales que encontramos en nuestro medio son la combinación ordenada o estructurada de una serie de elementos conocidos como átomos
    - Estos se unen entre sí para formar las moléculas y la unión de estas forma a la vez los diferentes elementos de la naturaleza.
  - Desde el punto de vista electrónico → nos interesa la **CONDUCTIVIDAD** eléctrica del material → electrones libres que puedan ser arrastrados por un campo eléctrico (o potencial) y contribuyan a una corriente



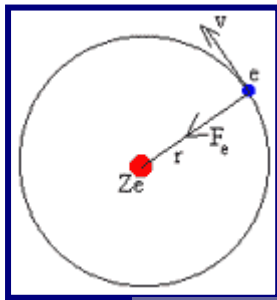
www.textoscientificos.com



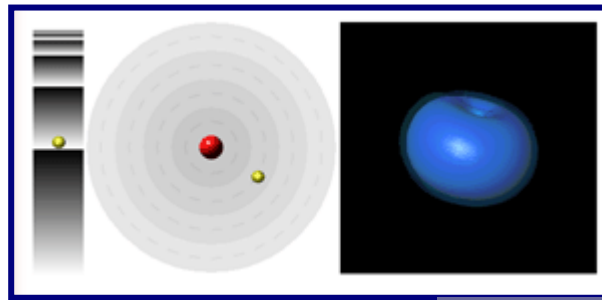
## TEMA 1. SEMICONDUCTORES

1. Sólidos Cristalinos
2. Semiconductores
3. Semiconductores intrínsecos y extrínsecos
4. Densidad de portadores en un semiconductor
5. Transporte de portadores en un semiconductor
  - Arrastre
  - Difusión
  - Generación-recombinación
6. Ejercicios propuestos

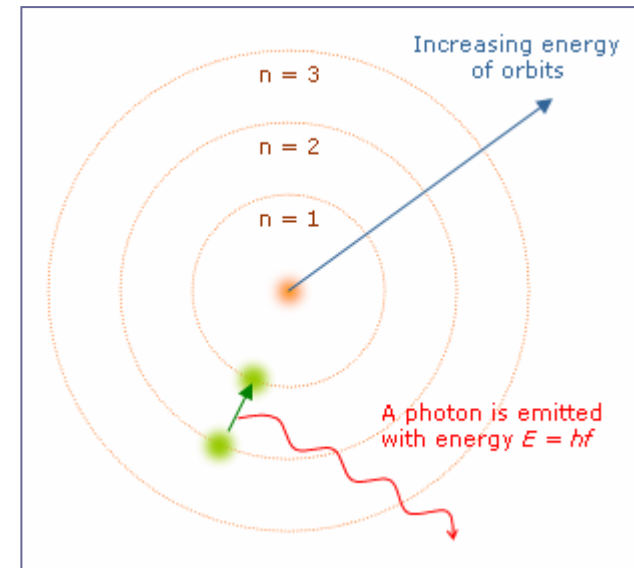
- Análisis Físico: La existencia de electrones libres (que puedan dar corriente) es una cuestión energética:
  - **Átomo aislado de H** (número atómico 1)
    - Durante el estudio del átomo, muchos científicos han tratado de explicar como esta formado y ordenado este, existen muchas teorías algunas de las cuales se contradicen; se pueden citar algunos modelos: Modelo Atómico de Dalton, Rutherford, Bohr y Schrödinger.



[www.sc.ehu.es](http://www.sc.ehu.es)



[colos.inf.um.es](http://colos.inf.um.es)



<http://www.quimicaweb.net>

- Las energías discretas que puede tener el electrón son:

$$E_n = -\frac{cte}{n^2}$$



Semiconductores

## Tabla periódica de los elementos

Número atómico →

Punto de ebullición °C →

Punto de Fusión °C →

Densidad (g/ml) →

1	1.00797
-252.7	H
-259,2	H
0,071	H
1s <sup>1</sup>	Hidrógeno

← Peso atómico

← Valencia

← Símbolo

← Estructura atómica

← Nombre

Periodo	Grupo																18		
1	1	2											13	14	15	16	17	18	
1	1 1.00797 -252.7 -259,2 0,071 H Hidrógeno																	2 4.0026 -268.9 -268.9 0,125 He	
2	3 6.941 1330 180.6 0.33 Li Litio	4 9.0122 2770 1277 1.85 Be Berilio																10 20.179 -248 -248.5 1,20 Ne	
3	11 22.990 891 87.8 0.97 Na Sodio	12 24.305 1707 950 1.74 Mg Magnesio																18 39.948 -186.9 -186.9 1,40 Ar	
4	19 39.098 761 63.7 0.87 K Potasio	20 40.08 1440 636 1.55 Ca Calcio	21 44.956 1327 908 1.54 Sc Escandio	22 47.88 3008 1908 7.13 Ti Titanio	23 50.942 3450 2000 4.51 V Vanadio	24 51.996 2885 1875 5.51 Cr Cromo	25 54.938 2650 1910 7.19 Mn Manganeso	26 55.847 3000 1538 7.43 Fe Hierro	27 58.93 2795 1538 7.87 Co Cobalto	28 58.71 2720 1492 8.9 Ni Niquel	29 63.54 2865 1455 8.9 Cu Cobre	30 65.37 2562 1357 8.96 Zn Zinc	31 69 2207 900 7.14 Ga Galio	32 72.64 2207 900 7.37 Ge Germanio	33 74.92 886 911 5.35 As Arsénico	34 75.58 886 911 5.35 Se Selenio	35 76.50 886 911 5.35 Br Bromo	36 83.80 -189.3 -189.3 3,12 Kr Criptón	
5	37 85.47 891 38.6 1.32 Rb Rubidio	38 87.62 1380 958 2.0 Sr Estroncio	39 88.50 1327 908 2.5 Y Itrio	40 91.22 3008 1908 4.51 Zr Zirconio	41 92.91 3450 2000 4.51 Nb Niobio	42 96.94 2885 1875 5.51 Mo Molibdeno	43 97 2650 1910 7.19 Tc Tecnecio	44 101.07 3000 1538 7.43 Ru Rutenio	45 102.90 2795 1538 7.87 Rh Rodio	46 106.42 3000 1538 7.43 Pd Paladio	47 107.87 2865 1455 8.9 Ag Plata	48 112.40 2562 1357 8.96 Cd Cadmio	49 114.82 2207 900 7.37 In Indio	50 118.71 2207 900 7.37 Sn Estano	51 121.75 886 911 5.35 Sb Antimonio	52 127.60 886 911 5.35 Te Teluro	53 126.90 886 911 5.35 I Yodo	54 131.30 -119.3 -119.3 4.94 Xe Xenón	
6	55 132.905 640 28.7 1.30 Cs Cesio	56 137.34 1440 636 3.5 Ba Bario	57 138.91 1327 908 2.5 La Lantano	72 178.49 3400 2000 4.51 Hf Hafnio	73 180.94 3450 2000 4.51 Ta Tantalio	74 183.85 2885 1875 5.51 W Wolframio	75 186.2 2650 1910 7.19 Re Renio	76 190.2 3000 1538 7.43 Os Osmio	77 193.22 2795 1538 7.87 Ir Iridio	78 195.08 3000 1538 7.43 Pt Platino	79 196.967 2865 1455 8.9 Au Oro	80 200.59 2562 1357 8.96 Hg Mercurio	81 204.39 2207 900 7.37 Tl Talio	82 207.19 2207 900 7.37 Pb Plomo	83 208.98 886 911 5.35 Bi Bismuto	84 218 886 911 5.35 Po Polonio	85 210 886 911 5.35 At Astato	86 222 -119.3 -119.3 7.1 Rn Radón	
7	87 223 891 38.6 1.32 Fr Francio	88 226 1380 958 2.0 Ra Radio	89 227 1327 908 2.5 Ac Actinio	104 261 3400 2000 4.51 Rf Rutherfordio	105 262 3450 2000 4.51 Db Dubnio	106 263 2885 1875 5.51 Sg Seaborgio	107 263 2650 1910 7.19 Bh Bohrio	108 265 3000 1538 7.43 Hs Hassium	109 269 2795 1538 7.87 Mt Meitnerio	110 269 3000 1538 7.43 Uun Ununillio	111 279 2865 1455 8.9 Uub Ununbio	112 279 2562 1357 8.96 Uub Ununbio	114 289 2207 900 7.37 Uuq Ununquadio	116 289 2207 900 7.37 Uuh Ununhexio	118 293 886 911 5.35 Uuo Ununoctio				

**Lantánidos**

58 140.12 9496 361 6.67 Ce Cerio	59 140.907 2127 805 6.77 Pr Praseodimio	60 144.24 1027 700 7.00 Nd Niodimio	61 147 1027 700 7.00 Pm Promecio	62 150.36 1901 1027 7.54 Sm Samario	63 151.96 1459 826 7.28 Eu Europio	64 157.25 2800 1363 5.20 Gd Gadolinio	65 162.50 2800 1363 5.20 Tb Terbio	66 162.50 2800 1363 5.20 Dy Disproscio	67 164.93 2800 1363 5.20 Ho Holmio	68 167.25 2800 1363 5.20 Er Erbio	69 168.934 2800 1363 5.20 Tm Terbio	70 173.04 2800 1363 5.20 Yb Ytterbio	71 174.97 2800 1363 5.20 Lu Lutecio
---	--	--	---	--	---	--	---	---	---	--	--	---	--

**Actínidos**

90 226.038 1750 11.7 Th Torio	91 227 1750 11.7 Pa Protactinio	92 230.033 1120 15.4 U Uranio	93 235 1120 15.4 Np Neptunio	94 242 1120 15.4 Pu Plutonio	95 244 1120 15.4 Am Americio	96 247 1120 15.4 Cm Curcio	97 251 1120 15.4 Bk Berkelio	98 259 1120 15.4 Cf Californio	99 264 1120 15.4 Es Einsteinio	100 269 1120 15.4 Fm Fermio	101 270 1120 15.4 Md Mendelevio	102 285 1120 15.4 No Nobelio	103 289 1120 15.4 Lr Lawrencio
---	---	---	--	--	--	--	--	--	--	---	---	--	--

**Notas:**

■ Metales    ■ Metaloides    ■ No metales    ■ Gases nobles

(1) Base en peso atómico carbono de 12 ( ) indica el más estable o el de isótopo más conocido.

<http://www.politecnicoartagena.com>

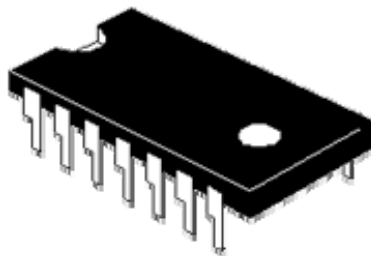


### Silicio : Si

Descubridor : Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) (Sueco) Año : 1823

Etimología : del latín *silex*

- En estado puro tiene propiedades físicas y químicas parecidas a las del diamante.
- **El dióxido de silicio (sílice) [SiO<sub>2</sub>]** se encuentra en la naturaleza en gran variedad de formas: **cuarzo, ágata, jaspe, ónice**, esqueletos de animales marinos.
- Su estructura cristalina le confiere propiedades **semiconductoras**. En estado muy puro y con pequeñas trazas de elementos como el boro, fósforo y arsénico constituye el material básico en la construcción de los **chips** de los ordenadores.



<http://www.politecnicocartagena.com>

1	2	13	14	15	16	17	18										
H	He																
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne										
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar										
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra		Unq	Unp	Unh	Uns	Uno	Uue	Uun	Uuu							
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Metales alcalinos

Metales alcalinotérreos

Metales de transición

Lantánidos

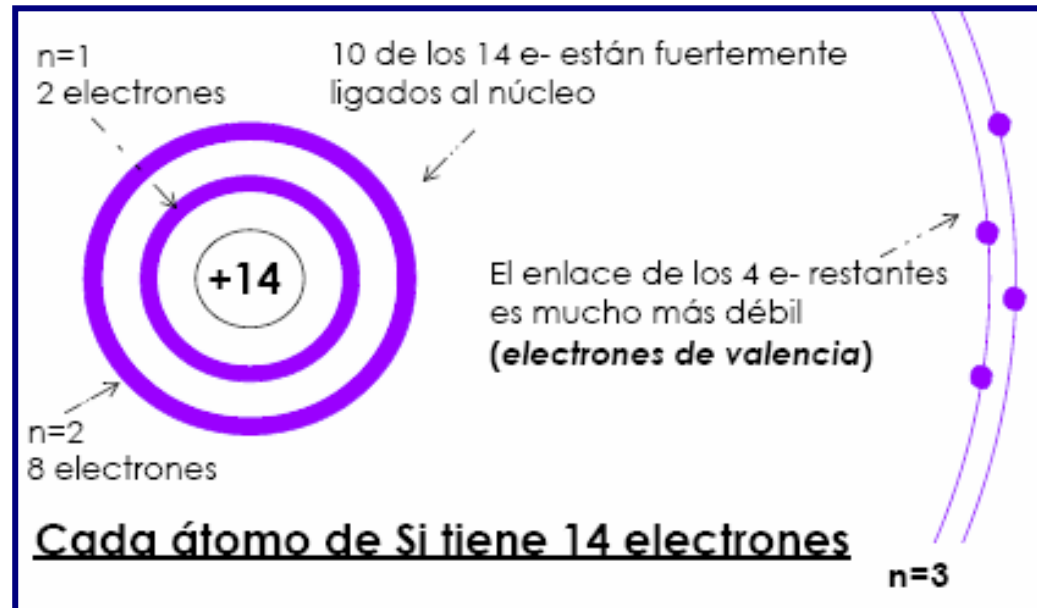
Actínidos

Otros metales

No metales

Gases nobles

- **Átomo aislado de Si**  
(número atómico 14)

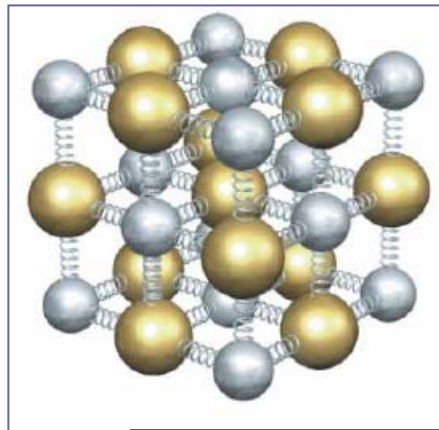


<http://www.politecnicocartagena.com>

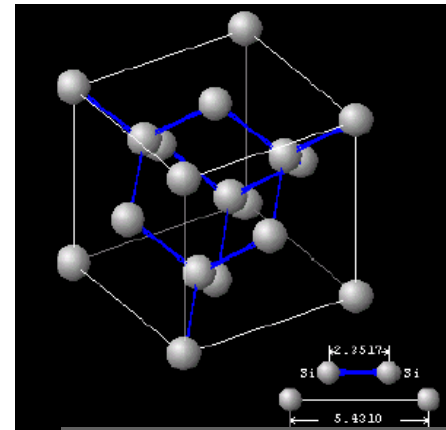
- Los dos primeros niveles ( $E_1$  y  $E_2$ ) acomodan: 2 y 8 electrones
  - Estos electrones están ligados al átomo y no pueden ser perturbados
- En el tercer nivel  $E_3$  restan 4 electrones → Son los llamados electrones de valencia → Pueden ser fácilmente liberados de sus posiciones para formar enlaces.

- Los **cristales de semiconductores** están formados por átomos donde los **vecinos más cercanos** están **enlazados** de manera **covalente** (mas o menos polar).
  - Los materiales semiconductores más importantes **crystalizan en el sistema cúbico con red centrada en las caras**:

**GaAs:** estructura Zinc-Blenda



<http://www.esacademic.com>

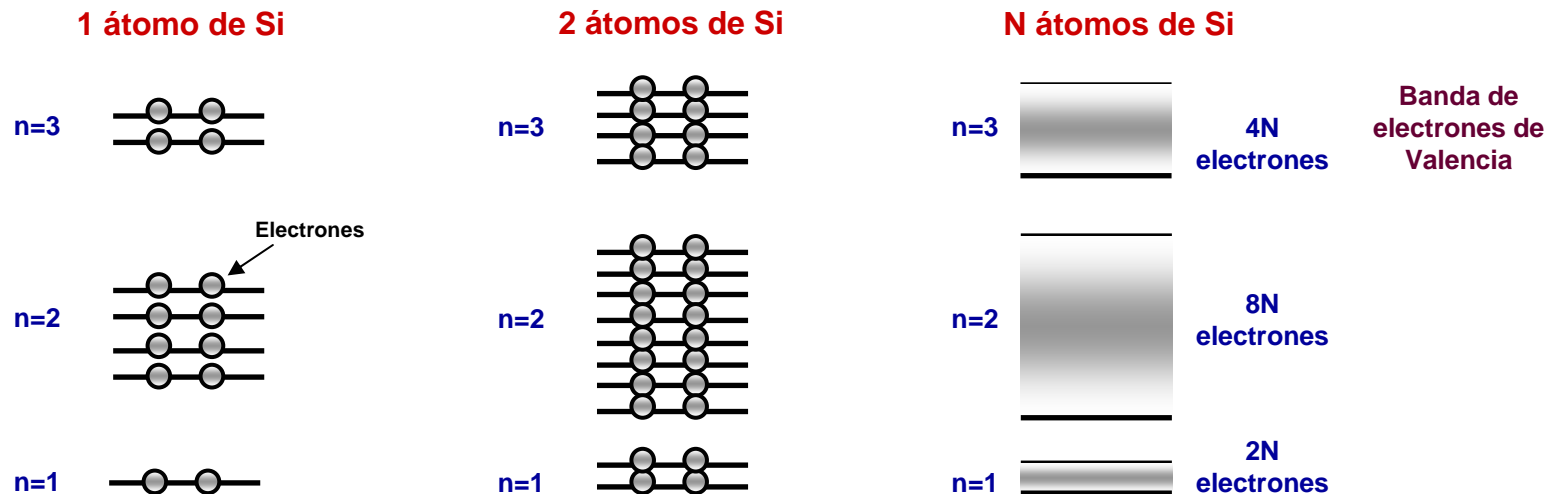


Cortesía de wie@acsu.buffalo.edu

**Si, Ge:** estructura diamante

- Estos SC tienen en su último orbital 4 electrones de valencia (que están “atrapados en los enlaces”).
- Sin embargo, el electrón puede abandonar el enlace y pasar a ser electrón libre (móvil en el cristal) y formar parte de una corriente → si **recibe energía**
  - Térmica (ejemplos: 0 K, 300 K)
  - Óptica
  - Eléctrica

- Los **cristales de semiconductores** → Modelo de bandas de energía
- Niveles electrónicos de un sólido que es la unión de N átomos (N del orden de  $20^{23}$ )
  - Aparecen superpuestos los niveles de energía atómicos de los N átomos
  - Cada nivel se ensancha y forma una banda de valores discretos de energía (aunque muy juntos) para contener los  $4N$  electrones.

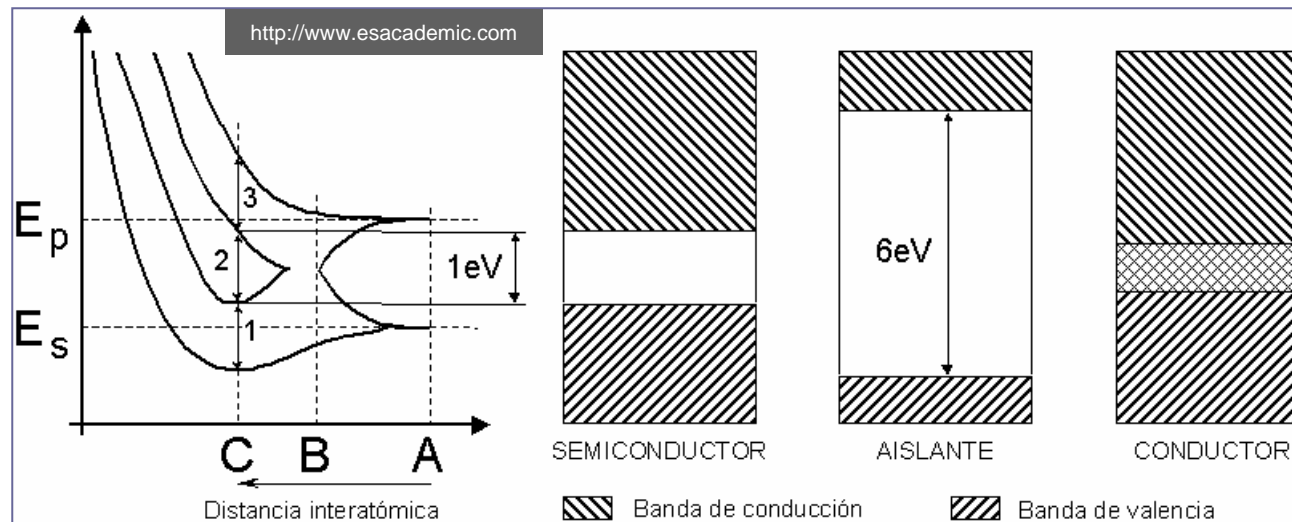


### Modelo de bandas de energía: **Clasificación**

- Las energías que tienen los electrones en el cristal son semejantes a las que tienen en los átomos libres → pero los electrones deben obedecer al principio de exclusión de Pauli (no puede haber dos e- en el mismo estado cuántico)
  - En los sólidos, debido a la interacción entre los átomos que forman el cristal, aparece un desdoblamiento de estados → desdoblamiento de energías.
  - Cada nivel en el átomo forma una banda. Para la distancia interatómica de equilibrio pueden las bandas estar
    - Solapadas → **METAL**
    - Separadas (0.5-4 eV) → **SEMICONDUCTOR**
    - Muy separadas (> 4eV) → **AISLANTE**



**Aparece un GAP de energías no permitidas:  $E_g$**





## TEMA 1. SEMICONDUCTORES

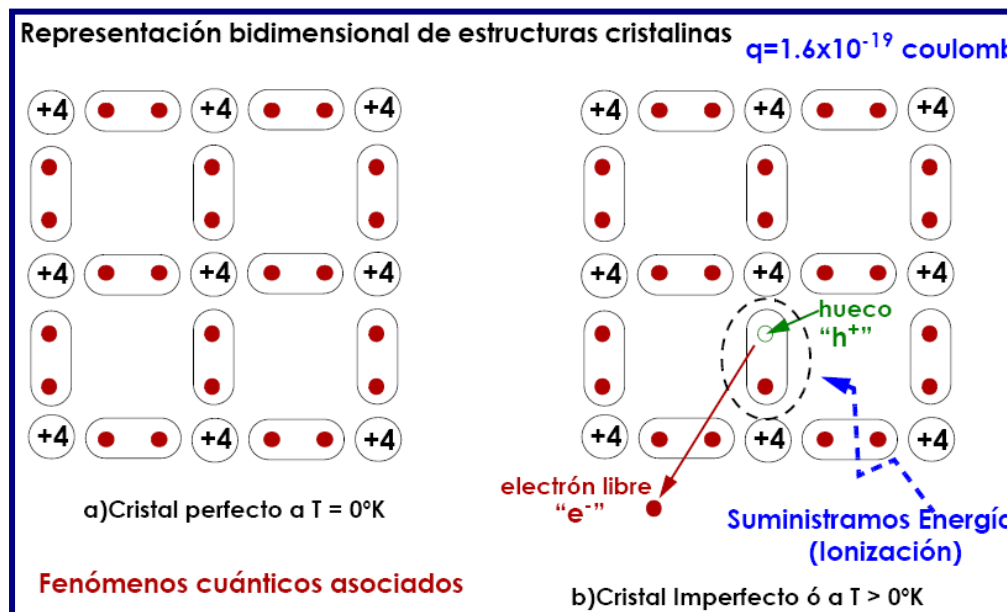
Introducción: conceptos básicos

1. Sólidos Cristalinos
2. Semiconductores
3. Semiconductores intrínsecos y extrínsecos
4. Densidad de portadores en un semiconductor
5. Transporte de portadores en un semiconductor
  - Arrastre
  - Difusión
  - Generación-recombinación
6. Ejercicios propuestos



■ **Cristal Semiconductor intrínseco:**

- A simple vista es imposible que un semiconductor permita el movimiento de electrones a través de sus bandas de energía
  - Idealmente, a  $T=0^{\circ}\text{K}$ , **el semiconductor es un aislante** porque todos los e- están formando enlaces.
- Pero **al crecer la temperatura, algún enlace covalente se puede romper y quedar libre un e-** para moverse en la estructura cristalina.

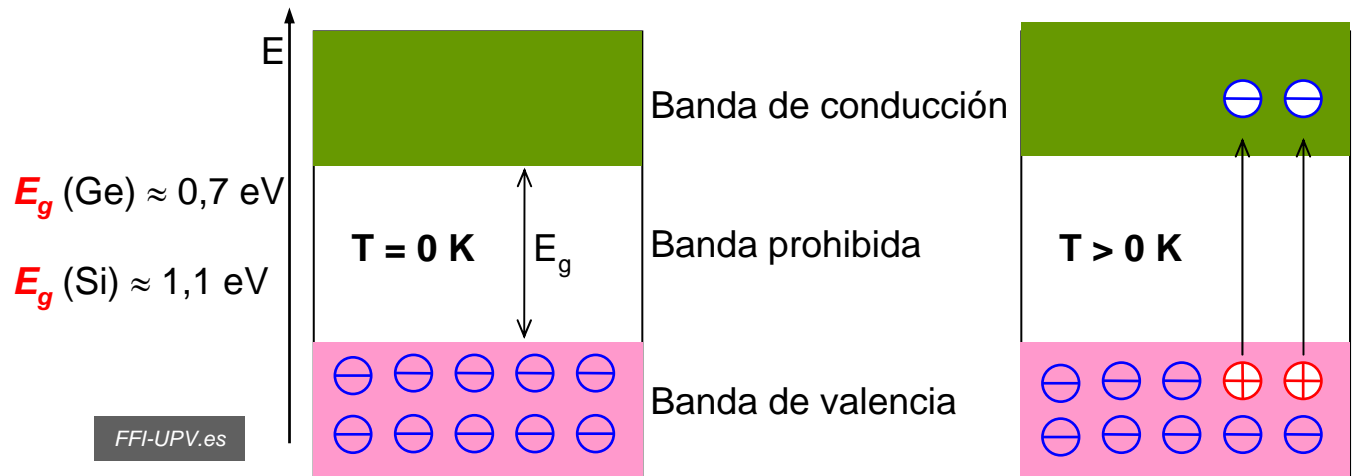


Representación bidimensional de la estructura cristalina del Si

- El hecho de liberarse un e- **deja un “hueco” (partícula ficticia positiva) en la estructura cristalina.** De esta forma, dentro del semiconductor encontramos el *electrón libre* (e-), pero también hay un segundo tipo de portador: *el hueco* (h+)

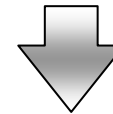
## 1.3. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

- Modelo de bandas de energía: **Conducción intrínseca**



FFI-UPV.es

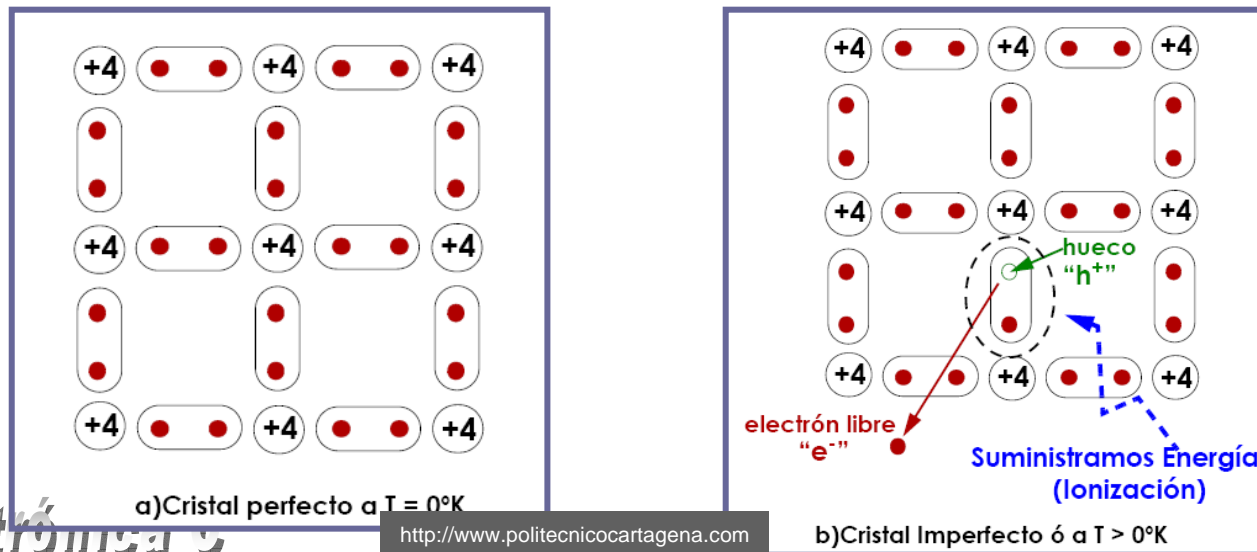
$$n = p = n_i$$



$n$ : nº electrones/ $\text{m}^3$

$p$ : nº electrones/ $\text{m}^3$

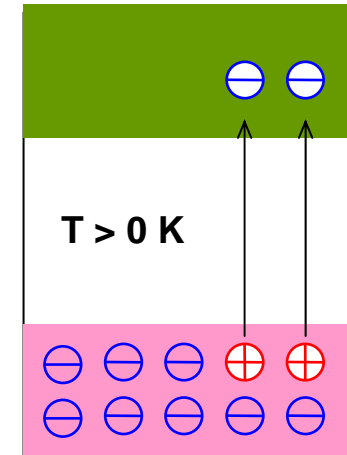
$n_i$ : densidad intrínseca de portadores



## 1.3. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

- Modelo de bandas de energía: **Conducción intrínseca**
  - En un semiconductor perfecto, las concentraciones de electrones y de huecos son iguales:

$$n = p = n_i$$



FFI-UPV.es

$n$ : número de electrones (por unidad de volumen) en la banda de conducción  
 $p$ : número de huecos (por unidad de volumen) en la banda de valencia  
 $n_i$ : concentración intrínseca de portadores

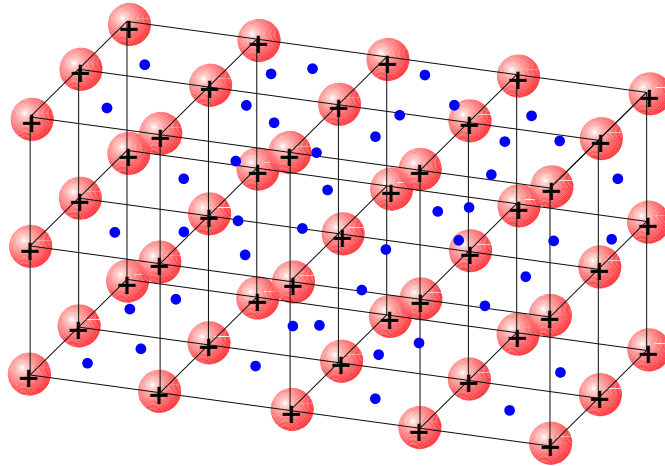
T=300 K	GaAs	Si	Ge
$n_i$ (port./cm <sup>3</sup> )	1.8·10 <sup>6</sup>	1.5·10 <sup>10</sup>	2.4·10 <sup>13</sup>
$E_g$ : GAP (eV)	1.42	1.12	0.66
Conductividad (Ω <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> )	2.4 10 <sup>-9</sup>	4.5 10 <sup>-6</sup>	-

FFI-UPV.es

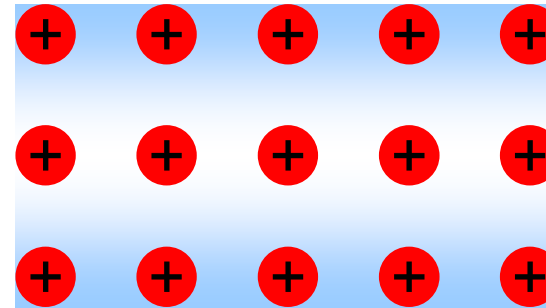


## 1.3. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

### ■ Estructura de un metal



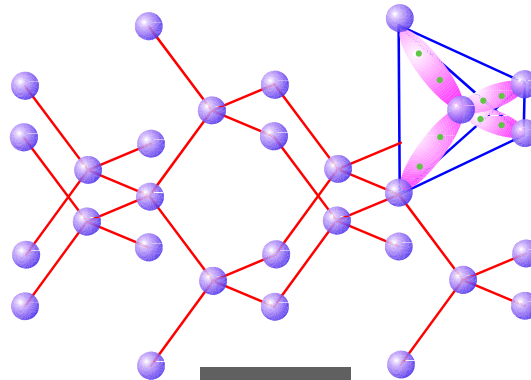
FFI-UPV.es



$\approx 10^{23}$  e<sup>-</sup> libres/cm<sup>3</sup>

FFI-UPV.es

### ■ Estructura de un semiconductor



FFI-UPV.es

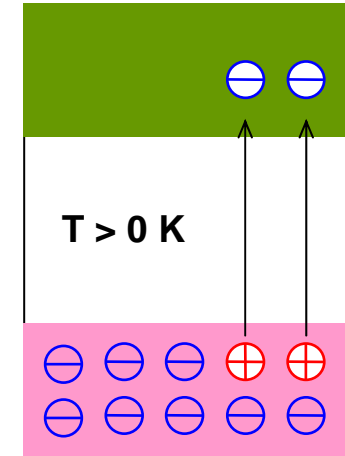
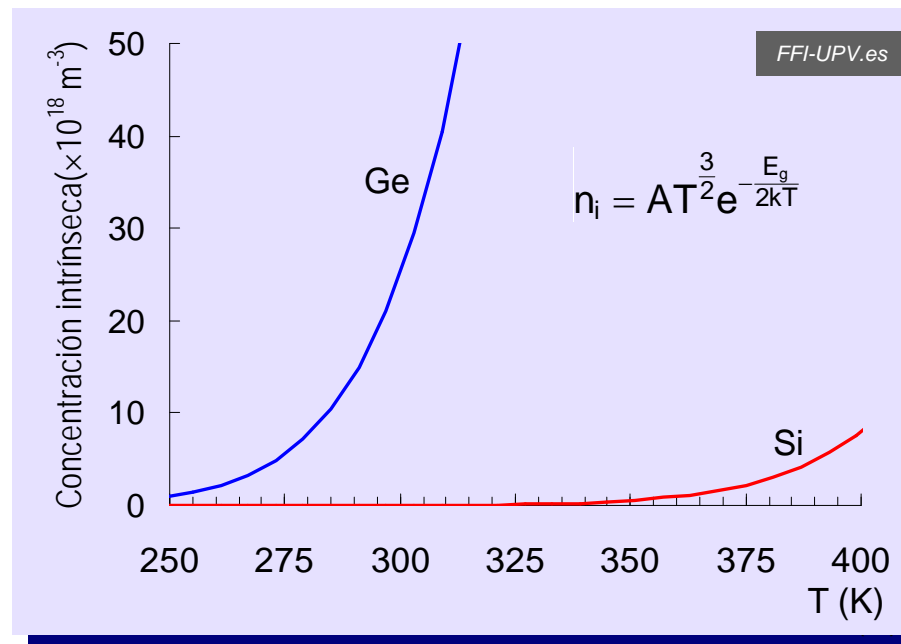
$\approx 10^{13}$  e<sup>-</sup> libres/cm<sup>3</sup>

## 1.3. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

- Modelo de bandas de energía: **Conducción intrínseca**

- Dependencia con la Temperatura: Gráfico  $n_i = f(T)$

$$n_i = f(T) = AT^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$



FFI-UPV.es

## 1.3. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

### ■ Semiconductor **Intrínseco**:

- Intrínseco indica un material semiconductor **extremadamente puro** → contiene una cantidad insignificante de átomos de impurezas. En él se cumple:

$$n = p = n_i$$

### ■ Semiconductor **Extrínseco**:

- En la práctica **nos interesa controlar la concentración de portadores** en un semiconductor (***n*** o ***p***).
- De este modo se pueden modificar las propiedades eléctricas: **conductividad**
- Para ello se **procede al proceso de DOPADO**:
  - Un **pequeño porcentaje de átomos del SC intrínseco se sustituye por átomos de otro elemento (impurezas o dopantes)**.
  - Estas impurezas **sustituyen** a los átomos de Silicio en el cristal formando enlaces.
  - **De este modo podemos**
    - Favorecer la aparición de **electrones** (Semiconductores **Tipo N: donde  $n > p$** )
    - Favorecer la aparición de **huecos** (Semiconductores **Tipo P: donde  $p > n$** ).

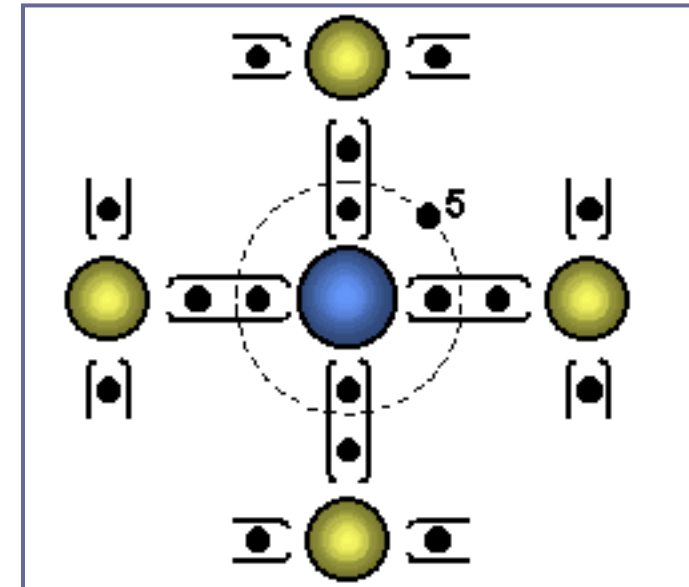


## 1.3. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

### ■ Caso particular del **Silicio**

#### □ Material extrínseco **Tipo n**:

- Se ha dopado con elementos pentavalentes (**As**, **P** o **Sb**) que tienen 5 electrones en la última capa: **IMPUREZA DONADORA**.
- Al formarse la estructura cristalina, **el quinto electrón** no estará ligado en ningún enlace covalente.
  - Con muy poca energía (**sólo la térmica, 300 K**) el **5º electrón** se separa del átomo y **pasa la banda de conducción**.
  - La **impureza fija en el espacio** quedará **IONIZADA (cargada positivamente)**
- En un **semiconductor tipo n**, los dopantes contribuyen a la existencia “extra de electrones”, lo cuál aumenta “enormemente” la conductividad debida a **electrones**.



<http://enciclopedia.us.es/index.php/Semiconductor>

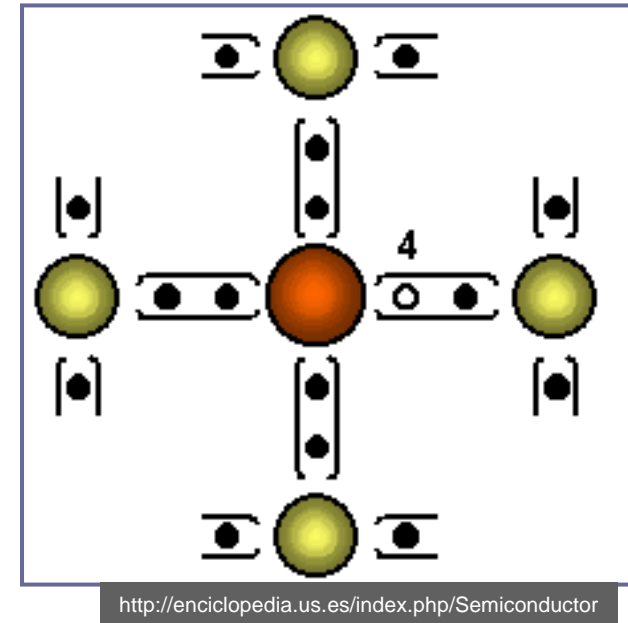
$n \gg p$

## 1.3. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

### ■ Caso particular del **Silicio**

#### □ Material extrínseco **Tipo P**:

- Cuando se sustituye un átomo de Si por un átomo como (Boro, Galio) que tienen 3 electrones en la última capa: **IMPUREZA ACEPTADORA**.
- Al formarse el cristal, **los tres electrones** forman el enlace covalente con los átomos de Si, pero queda un hueco (un enlace vacante).
  - A ese hueco se pueden mover otros electrones que dejarán a su vez otros huecos en la Banda de Valencia.
  - La **impureza** fija en el espacio quedará **cargada negativamente**
- En un **semiconductor tipo p**, los dopantes contribuyen a la existencia “extra de **huecos**” sin haber electrones en la banda de conducción.



$$p \gg n$$

## 1.3. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

### ■ Caso particular del Silicio

- Donadores y aceptadores para el Si

1 H 1,008							2 He 4,003			
3 Li 6,941	4 Be 9,012				5 B 10,811	6 C 12,011	7 N 14,007	8 O 15,999	9 F 18,998	10 Ne 20,183
11 Na 22,990	12 Mg 24,305				13 Al 26,982	14 Si 28,086	15 P 30,974	16 S 32,064	17 Cl 35,453	18 Ar 39,948
19 K 39,10	20 Ca 40,08	...	30 Zn 65,37	31 Ga 69,72	32 Ge 72,59	33 As 74,92	34 Se 78,96	35 Br 79,91	36 Kr 83,80	
37 Rb 85,47	38 Sr 87,62	...	48 Cd 112,40	49 In 114,82	50 Sn 118,89	51 Sb 121,75	52 Te 127,60	53 I 126,90	54 Xe 131,30	
55 Cs 132,91	56 Ba 137,33	...	80 Hg 200,59	81 Tl 204,37	82 Pb 207,19	83 Bi 208,98	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)	

FFI-UPV.es

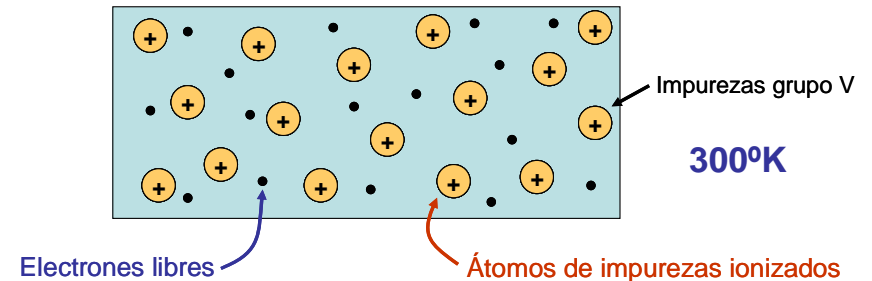
## 1.3. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

### ■ Resumiendo, semiconductores extrínsecos

#### □ Material extrínseco **Tipo N**:

- Impurezas del grupo V de la tabla periódica.
- Con muy poca energía se ionizan (pierden un electrón).

Los portadores mayoritarios de carga en un semiconductor tipo N son **Electrones libres**

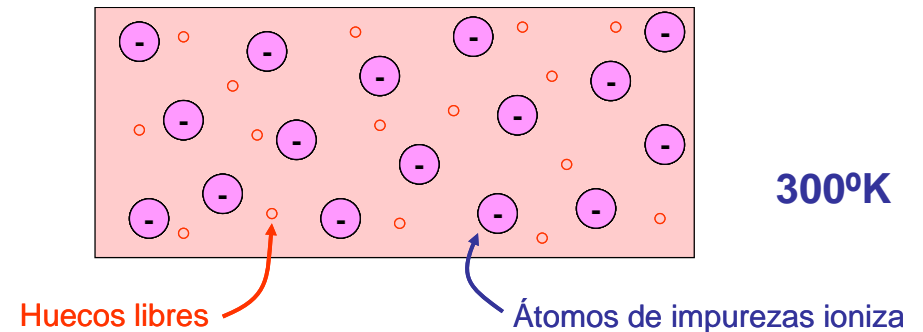


<http://www.politecnicocartagena.com>

#### □ Material extrínseco **Tipo P**

- Impurezas del grupo III de la tabla periódica
- A  $T=300\text{ K}$  todos los átomos de impureza han captado un electrón.

Los portadores mayoritarios de carga en un semiconductor tipo P son **Huecos**: *Actúan como portadores de carga positiva.*



<http://www.politecnicocartagena.com>



## TEMA 1. SEMICONDUCTORES

Introducción: conceptos básicos

1. Sólidos Cristalinos
2. Semiconductores
3. Semiconductores intrínsecos y extrínsecos
4. Densidad de portadores en un semiconductor
5. Transporte de portadores en un semiconductor
  - Arrastre
  - Difusión
  - Generación-recombinación
6. Ejercicios propuestos

## 1.4. DENSIDAD DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

### ■ Ley de acción de masas

- En un semiconductor tanto intrínseco como extrínseco, se cumple:

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

$n$ : número de e- /volumen  
 $p$ : número de h+ /volumen  
 $n_i$ : concentración intrínseca

- A una Temperatura dada: **el producto de las densidades de los dos tipos de portadores e mantiene constante**
- En un semiconductor extrínseco, el incremento de un tipo de portador tiende a reducir el otro.

### ■ Ley de cuasi-neutralidad eléctrica (general)

$$N_A + n = N_D + p$$

- Lo que indica que las cargas positivas deben ser igual que las negativas

$N_A$ : densidad de impurezas aceptadoras  
 $N_D$ : densidad de impurezas donadoras





## 1.4. DENSIDAD DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

- Leyes de acción de masas y de cuasi-neutralidad eléctrica. Casos particulares

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

$$N_A + n = N_D + p$$

$N_A$ : dens. impurezas aceptadoras  
 $N_D$ : dens. impurezas donadoras

- Semiconductor **intrínseco**:

$$N_A = N_D = 0 \rightarrow p = n = n_i$$

- Semiconductor **tipo N**

$$N_A = 0; n \approx N_D \rightarrow p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

- Semiconductor **tipo P**

$$N_D = 0; p \approx N_A \rightarrow n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$





## TEMA 1. SEMICONDUCTORES

Introducción: conceptos básicos

1. Sólidos Cristalinos
2. Semiconductores
3. Semiconductores intrínsecos y extrínsecos
4. Densidad de portadores en un semiconductor
5. Transporte de portadores en un semiconductor
  - Arrastre
  - Difusión
  - Generación-recombinación
6. Ejercicios propuestos

## 1.5. TRANSPORTE DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

- El movimiento de electrones y huecos (partículas cargadas) da lugar a una corriente.
- Esta corriente es la manera de operar de los dispositivos electrónicos → Que a su vez controlan la corriente en la malla en la que están situados.
- Veamos los diferentes fenómenos a los que están expuestos los portadores:
  - Movimiento aleatorio térmico
  - Arrastre o desplazamiento
  - Difusión
  - Generación-recombinación

## 1.5. TRANSPORTE DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

### ■ Movimiento aleatorio **térmico**

- En **equilibrio térmico**, los portadores dentro del semiconductor están siempre en movimiento térmico aleatorio.
- La mecánica estadística nos dice que: un portador a una temperatura T tiene una energía térmica media de  $3K_B T/2$ 
  - Esta energía térmica le sirve para moverse (convertirla en energía cinética) a una velocidad térmica :  $v_{th}$

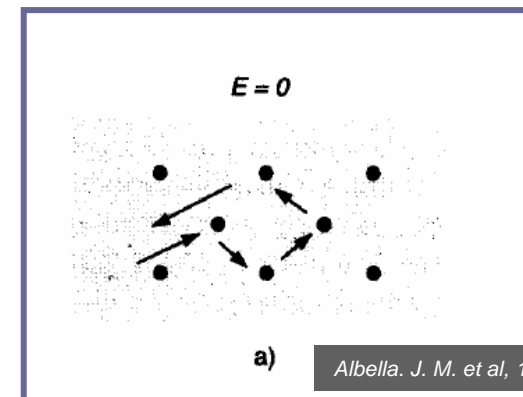
$$\frac{1}{2} m^* v_{th}^2 = \frac{3}{2} K_B T$$

- El portador se mueve rápidamente dentro del cristal en todas las direcciones alternando recorridos libres y colisiones con los átomos de la red.
- En **equilibrio térmico y sin campo eléctrico aplicado** ( $E=0$ ), el movimiento de todos los portadores se cancela y **la corriente media en cualquier dirección es nula.**

$m^*$ : masa efectiva del portador

$K_B$ : Constante de Boltzmann

$K_B T$  (300K): 0.026 eV



Albella. J. M. et al, 1996

## 1.5. TRANSPORTE DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

### ■ Aplicación de un campo eléctrico (**E**): arrastre o deriva

#### □ Movimiento de los portadores

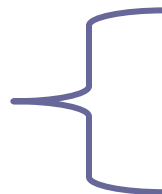
□ Cuando se aplica **E**: los portadores sufren una fuerza igual a :

- **F= - e E** para electrones (acelerados en sentido opuesto al campo)
- **F= e E** para huecos (acelerados en el sentido del campo)

□ Estas fuerzas proporcionan una aceleración (2ª ley de Newton) → una velocidad media neta que se puede escribir (estadísticamente, en media)

$$\vec{v}_{dp} = \frac{e\tau_p}{m_p^*} \vec{E} = \mu_p \vec{E}$$

$$\vec{v}_{dn} = -\frac{e\tau_n}{m_n^*} \vec{E} = -\mu_n \vec{E}$$

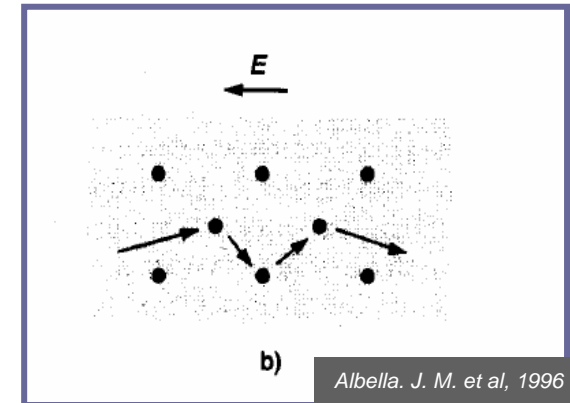


$m_n^*$ : masa efectiva de electrones

$\tau_n$ : tiempo medio entre choques

$\mu_n$ : movilidad de electrones

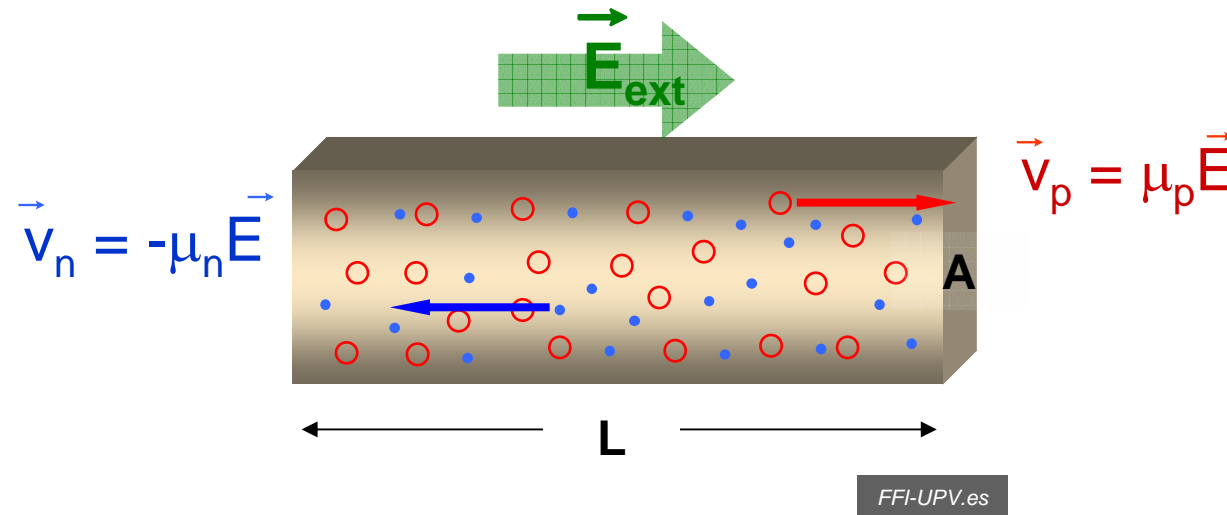
- Los valores:  $m^*$ ,  $\tau$ ,  $\mu$  son propios de cada tipo de portador y del semiconductor.
- En general  $m_p^* > m_n^*$ , y  $\tau_n = \tau_p \rightarrow v_{dn} > v_{dp}$



Movimiento de un electrón bajo la acción de un **E**

## 1.5. TRANSPORTE DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

- Aplicación de un campo eléctrico ( $\vec{E}$ ): **arrastre** o **deriva** (II)
  - Cálculo de las corrientes de arrastre
  - Consideramos un pedazo de semiconductor homogéneo de área  $A$  transversal y longitud  $L$ .



- Semiconductor **tipo N homogéneo**:
  - La corriente eléctrica ( $n^\circ$  de portadores que atraviesan una superficie por unidad de tiempo) es:

$$I_n = -e A n v_{dn} = e A n \mu_n \vec{E}$$



## 1.5. TRANSPORTE DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

- Aplicación de un campo eléctrico (**E**): **arrastre** o **deriva** (III)

- Cálculo de las corrientes de arrastre

- Semiconductor **tipo N homogéneo**, en el que se cumple:

- El campo eléctrico es constante y depende de la diferencia de potencial externo aplicado entre extremos:

$$E = V/L$$

- La resistencia de la muestra está relacionada con su conductividad/resistividad:

$$R_n = \rho_n \frac{L}{A} = \frac{1}{\sigma_n} \frac{L}{A}$$

- Sustituyendo en la ecuación anterior, obtenemos que en un semiconductor se cumple la Ley de OHM:

$$I_n = e A n \mu_n \frac{V}{L} = A \sigma_n \frac{V}{L} = \frac{V}{R_n}$$

- Siendo la conductividad del semiconductor debida a los electrones

$$\sigma_n = e n \mu_n$$

## 1.5. TRANSPORTE DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

- Aplicación de un campo eléctrico (**E**): arrastre o deriva (IV)

- Cálculo de las corrientes de arrastre

- De manera análoga en un semiconductor **tipo P homogéneo**:

- La corriente de arrastre de huecos: 

$$I_p = e A p v_{dp} = e A p \mu_p \vec{E} = e A p \mu_p \frac{V}{L}$$

- De nuevo, la resistencia de la muestra está relacionada con su conductividad/resistividad:

$$R_p = \rho_p \frac{L}{A} = \frac{1}{\sigma_p} \frac{L}{A}$$

- Sustituyendo obtenemos :

$$I_p = e A p \mu_p \frac{V}{L} = A \sigma_p \frac{V}{L} = \frac{V}{R_p}$$

con:

$$\sigma_p = e p \mu_p$$

# TEMA 1. SEMICONDUCTORES

## 1.5. TRANSPORTE DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

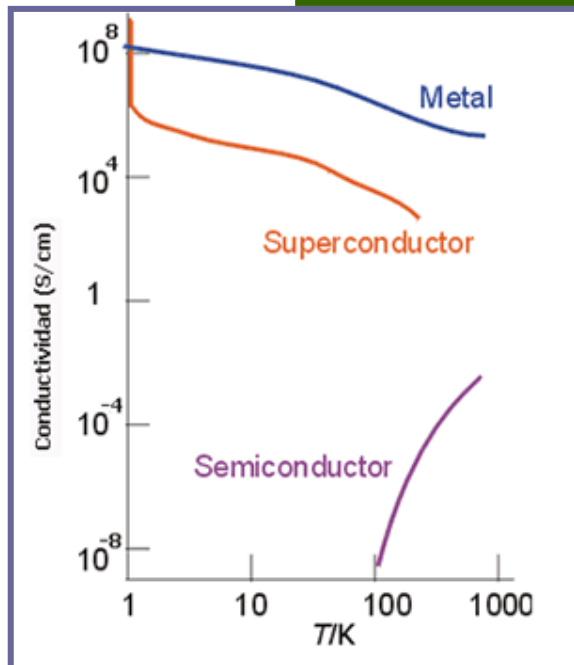
### Corrientes de deriva/arrastre/desplazamiento en SC

- En un semiconductor con **ambos tipos de portadores**:

$$I = I_n + I_p = A(\sigma_n + \sigma_p) \frac{V}{L}$$

$$\frac{I}{A} = (\sigma_n + \sigma_p) \frac{V}{L}$$

$$J = (\sigma_n + \sigma_p)E = \sigma_T E$$



www.textoscientificos.com

$$n_i = f(T) = AT^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

### Intrínsecos

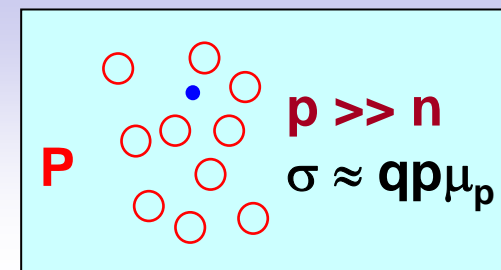
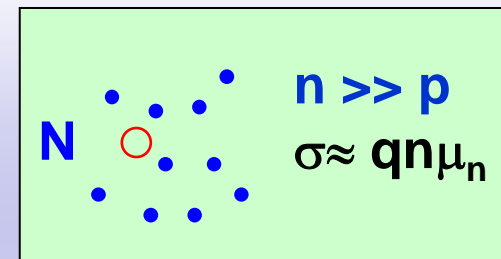
$$p = n = n_i$$

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$$

$$\sigma = e n_i (\mu_n + \mu_p)$$

### Extrínsecos

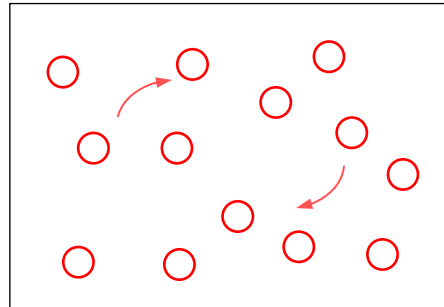
FFI-UPV.es



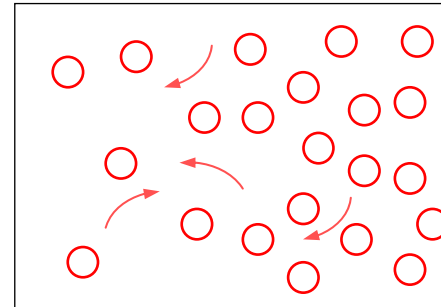
## 1.5. TRANSPORTE DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

### ■ Fenómenos de **difusión (I)**

- La difusión ocurre como consecuencia de la no-homogeneidad de concentración → los portadores se difunden desde donde la concentración es mas alta hacia donde es más baja.



$$\nabla n = 0$$



$$\nabla n = \frac{d\vec{n}}{dx}$$

FFI-UPV.es

- Cómo son partículas cargadas este movimiento da lugar a **corrientes de difusión**: obedecen a la **Ley de Fick**:

$$F = -D \frac{dN}{dx}$$

**D**: coeficiente de difusión

**N**: concentración de portadores

## 1.5. TRANSPORTE DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

### ■ Fenómenos de **difusión** (II)

- Las corrientes de difusión de electrones y de huecos, se pueden calcular partiendo del flujo como:

$$I_n = -eAF = e A D_n \frac{dn}{dx}$$

$$I_p = eAF = -e A D_p \frac{dp}{dx}$$

$D_n$ : coeficiente de difusión de electrones

$D_p$ : coeficiente de difusión de huecos

- Los signos indican que la corriente de difusión de huecos es opuesta a su gradiente.

### ■ Corrientes TOTALES (arrastre+ **difusión**)

- La corriente total en un semiconductor en general (con ambos tipos de portadores) debe obtenerse por la suma de las componentes de arrastre más las de difusión de ambos tipos de portadores:

$$\left. \begin{aligned} I_n &= e A \left( \mu_n n E + D_n \frac{dn}{dx} \right) \\ I_p &= e A \left( \mu_p p E - D_p \frac{dp}{dx} \right) \end{aligned} \right\} I = I_n + I_p$$

María Jesús Martín Martínez : mjmm@usal.es

## 1.5. TRANSPORTE DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

### ■ Fenómenos de **generación-recombinación** (g-r) (I)

□ En **equilibrio térmico**: Para una  $T^a$  dada, los portadores poseen una energía térmica:

- Algunos electrones de la BV pueden alcanzar la BC, dejando un hueco en la BV → Se genera un par e-h: **fenómeno de generación**.

□ Este fenómeno se caracteriza por un número :  $G_{th}$   
(número de pares **generados** por unidad de volumen y de tiempo).

- También un electrón de la BC puede pasar a la BV (desaparece un par electrón-hueco) → **fenómeno de recombinación**.

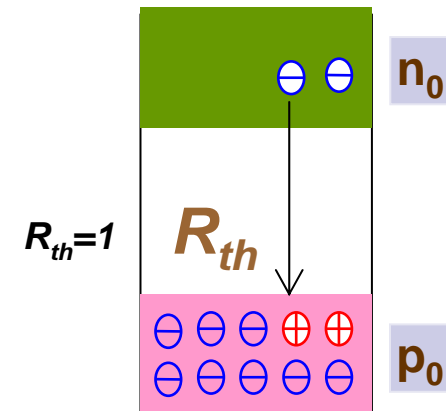
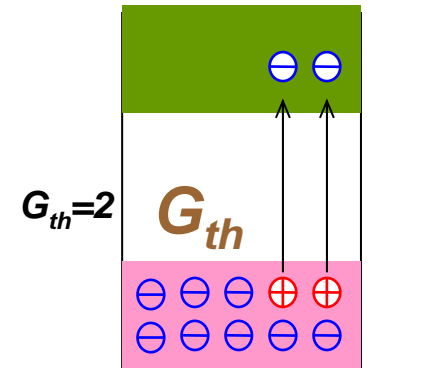
□ Este fenómeno se caracteriza por un número :  $R_{th}$   
(número de pares **recombinados** por unidad de volumen y de tiempo)

- Es importante resaltar como en equilibrio, ambos fenómenos se compensan:

$$R_{th} = G_{th}$$

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

(de manera que se mantiene la validez de la ley de acción de masas). Siendo  $n_0$  y  $p_0$  son las densidades de electrones y de huecos en la BC y BV en equilibrio.



FFI-UPV.es

## 1.5. TRANSPORTE DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

### ■ Fenómenos de *g-r* (II)

- En situaciones de **NO equilibrio térmico**:

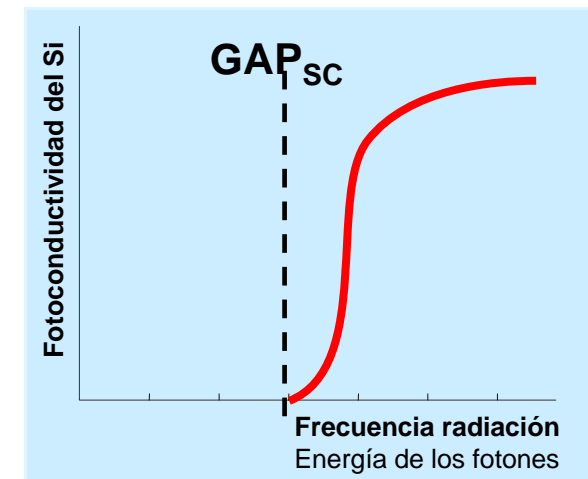
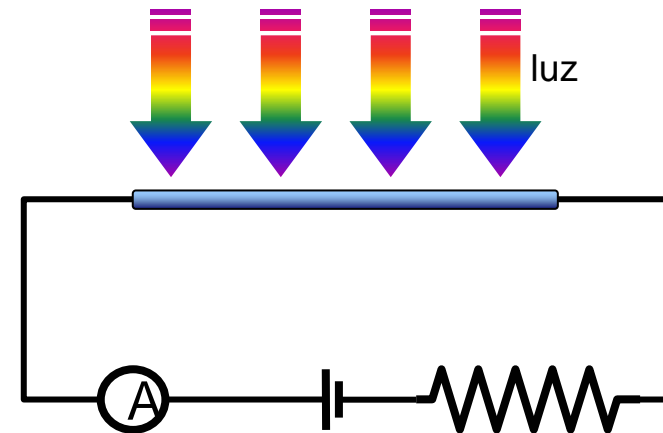
- EJEMPLO → **INYECCION OPTICA**

- Hacemos incidir sobre el SC un rayo de luz cuya energía es igual o superior que el GAP del material.

$$\varepsilon = h\nu > \text{GAP}_{\text{SC}}$$

$h$ : Cte de planck:  $4.14 \cdot 10^{-15}$  eV s  
 $\nu$ : frecuencia de la radiación

- Si la energía de los fotones es absorbida por un electrón de la BV que pasa a la BC → se produce el fenómeno ADICIONAL de generación llamado **FOTO-generación** → aumento de la cantidad de portadores (tanto electrones como huecos)
- Este fenómeno es la **base de los fotodetectores**: La consecuencia es que tiene lugar un aumento de la conductividad que depende de la iluminación → **FOTO-CONDUCTIVIDAD**.



FFI-UPV.es

## 1.5. TRANSPORTE DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

### ■ Fenómenos de *g-r* (III)

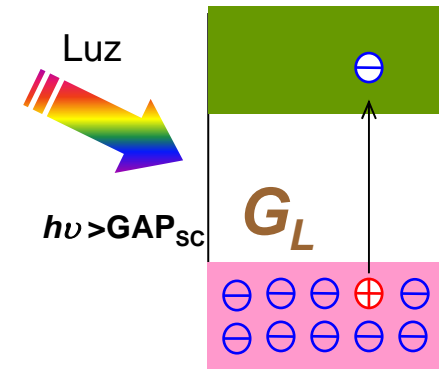
□ En situaciones de **NO equilibrio térmico**: **Inyección óptica**

- Tenemos una nueva componente *g-r* : **FOTOGENERACION**
- Este fenómeno se caracteriza por un número :  $G_L$   
(número de pares **generados** por unidad de volumen y de tiempo).
- Ahora el número de electrones y de huecos en las bandas de valencia y conducción será:

$$\begin{aligned} n &= n_0 + \Delta n \\ p &= p_0 + \Delta p \end{aligned}$$

$$\sigma = e(n \mu_n + p \mu_p) = \sigma_0 + \Delta\sigma$$

**Aumento de conductividad debido a la iluminación**

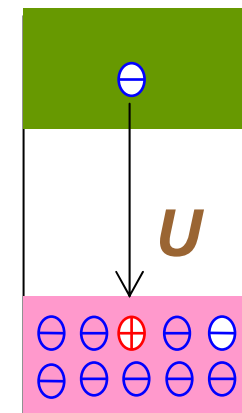


FFI-UPV.es

□ De manera que ahora ya no se cumple la ley de acción de masas.

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

- Debido a esa generación "extra" → los *g-r* intentarán reestablecer el equilibrio: **umentarán los fenómenos de recombinación**:  
**RECOMBINACION RADIATIVA: U** → Al final habrá una densidad estacionaria de portadores (diferente de equilibrio).



FFI-UPV.es



## 1.5. TRANSPORTE DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

### ■ Fenómenos de *g-r* (III)

□ De modo, que en total, bajo situaciones de **NO equilibrio térmico**:

#### ■ EJEMPLO de Inyección óptica

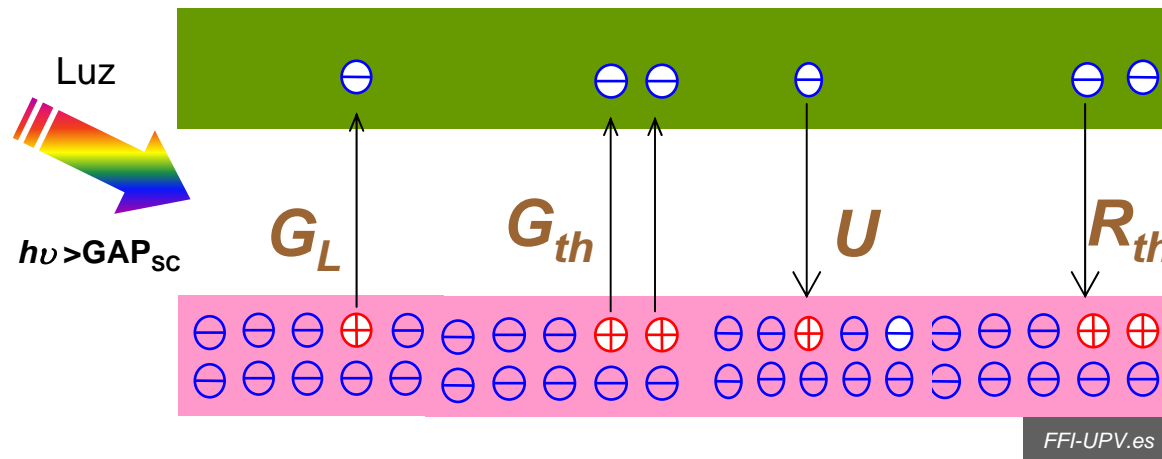
□ El número de portadores generados GLOBAL por foto-conductividad se puede expresar como:

$$\Delta n = G_L \tau$$

$$\Delta p = G_L \tau$$

$G_L$ : número de portadores que se generan/ (m<sup>3</sup> s)  
 $\tau$ : tiempo de vida media por recombinación (s)

□ Finalmente, debemos considerar las 4 componentes mencionadas



FFI-UPV.es



## ■ Agradecimientos

- *Jose Antonio Gomez Tejedor. Apuntes Fundamentos Físicos de la Informática. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Pardo Collantes, Daniel; Bailón Vega, Luís A., “Elementos de Electrónica”. Universidad de Valladolid. Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial. 1999.
- Albella J. M, y Martínez-Duart, J.M. “Fundamentos de electrónica física y microelectrónica”. Ed. Addison Wesley/UA Madrid, 1996
- <http://www.textoscientificos.com/imagenes/quimica/variacion-conductividad.gif>
- <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/456727> (Física del estado sólido).
- <http://www.esacademic.com/pictures/eswiki/67/Celdi1.PNG>
- <http://www.politecnicocartagena.com/img%20dto%20fisica/semiconductores.ppt>
- [http://enciclopedia.us.es/index.php/Redes\\_de\\_Bravais](http://enciclopedia.us.es/index.php/Redes_de_Bravais)
- <http://enciclopedia.us.es/index.php/Semiconductor>
- [http://colos.inf.um.es/carmfisica/FisicaCurricu/GO\\_AtomoSchrodinger.html](http://colos.inf.um.es/carmfisica/FisicaCurricu/GO_AtomoSchrodinger.html)
- [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/principios/caja/atomo\\_bohr2.gif](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/principios/caja/atomo_bohr2.gif)
- [http://www.quimicaweb.net/grupo\\_trabajo\\_fyq3/tema4/imagenes/Bohratommodel.png](http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_fyq3/tema4/imagenes/Bohratommodel.png)