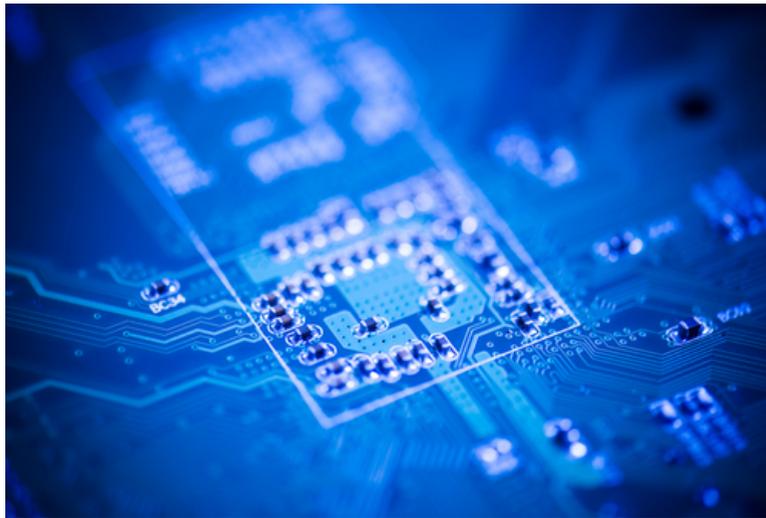
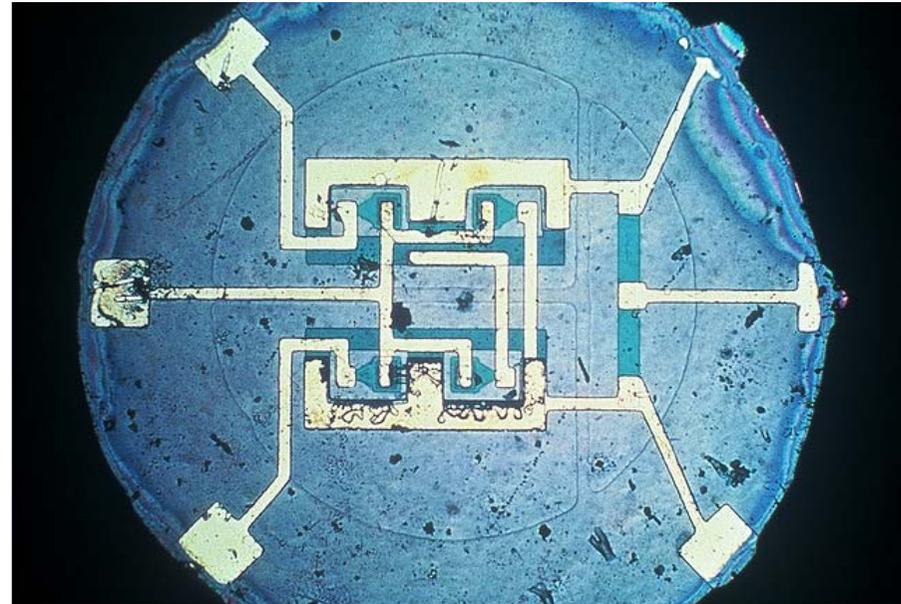


TEMA 1. SEMICONDUCTORES



<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/>

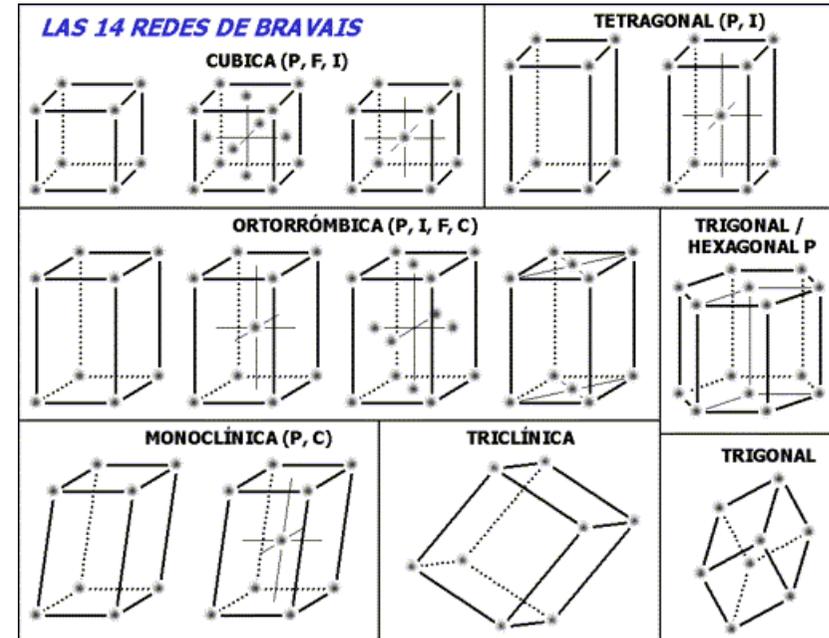


TEMA 1. SEMICONDUCTORES

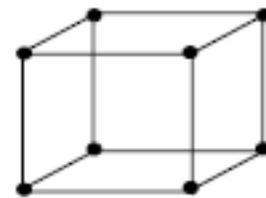
1. **Sólidos Cristalinos**
2. Semiconductores
3. Semiconductores intrínsecos y extrínsecos
4. Densidad de portadores en un semiconductor
5. Transporte de portadores en un semiconductor
 - Arrastre
 - Difusión
 - Generación-recombinación
6. Ejercicios propuestos

■ Sólidos cristalinos

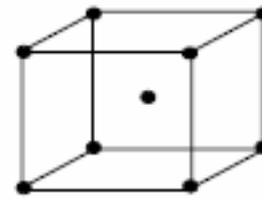
- Una posible clasificación de los materiales atendiendo a su **estructura cristalina**: cristalinos, policristalinos, amorfos.
- Los sólidos cristalinos son agrupaciones periódicas de una estructura base, que por traslación reproduce todo el material cristalino.
- Existen siete sistemas cristalinos →
- 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.



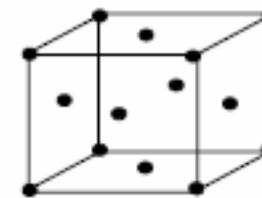
http://enciclopedia.us.es/index.php/Redes_de_Bravais



Red Cúbica simple



Red Cúbica centrada en cuerpo

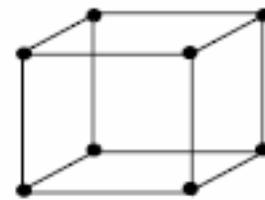


Red Cúbica centrada en caras

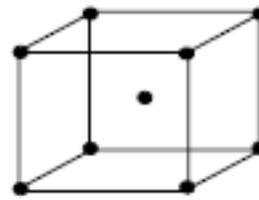
Figura 1.- Sistema cúbico

D. Pardo, et al. 1999

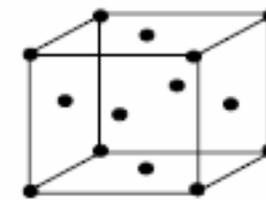
- Clasificación de Sólidos cristalinos en función de sus **propiedades eléctricas**
 - Los Semiconductores son materiales que poseen propiedades intermedias de conducción.
 - Los materiales semiconductores más importantes son
 - Silicio
 - Germanio
 - GaAs



Red Cúbica simple



Red Cúbica centrada en cuerpo



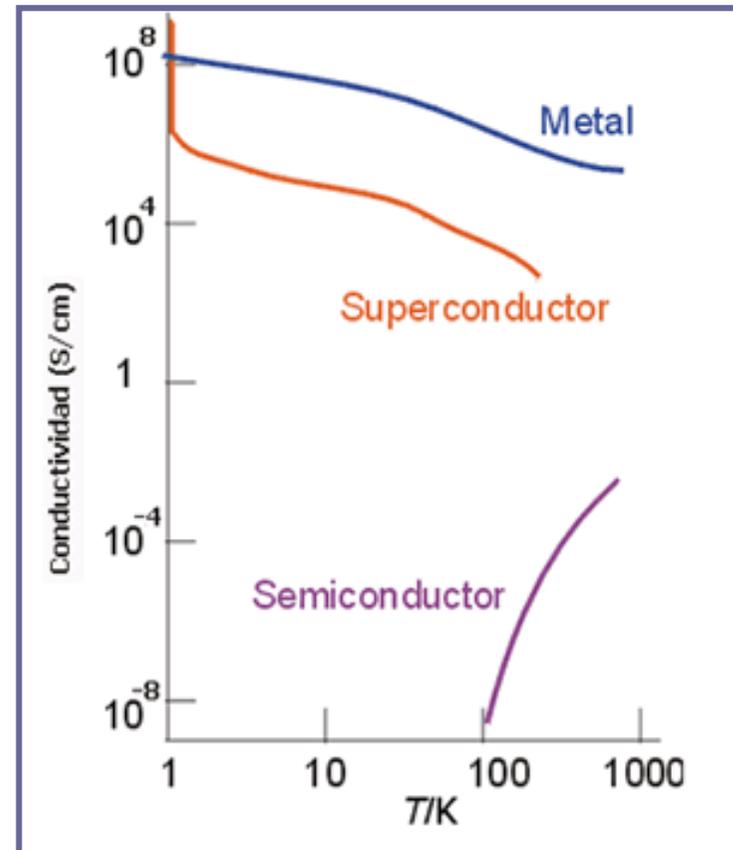
Red Cúbica centrada en caras

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

- 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



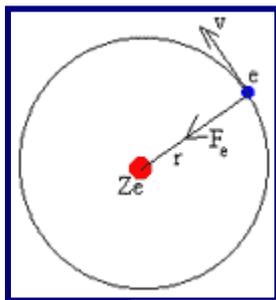
www.textoscientificos.com



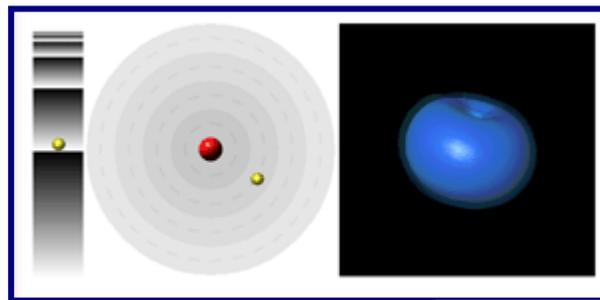
TEMA 1. SEMICONDUCTORES

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

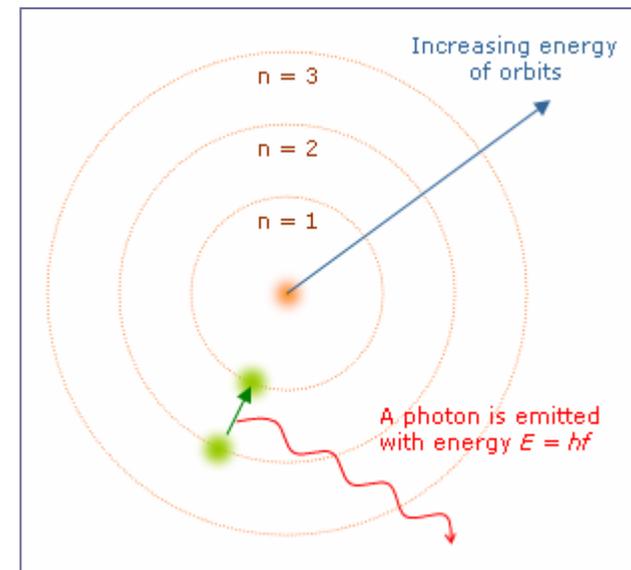
- Análisis Físico: La existencia de electrones libres (que puedan dar corriente) es una cuestión energética:
 - **Átomo aislado de H** (número atómico 1)
 - Durante el estudio del átomo, muchos científicos han tratado de explicar como esta formado y ordenado este, existen muchas teorías algunas de las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



www.sc.ehu.es



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 ¹ | Hidrógeno |

← Peso atómico

← Valencia

← Símbolo

← Estructura atómica

← Nombre

| Periodo | Grupo | | | | | | | | | | | | | | | | 18 | |
|---------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|
| 1 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 1 | 1 H | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 He |
| 2 | 3 Li | 4 Be | | | | | | | | | | | | | | | | 10 Ne |
| 3 | 11 Na | 12 Mg | | | | | | | | | | | | | | | | 18 Ar |
| 4 | 19 K | 20 Ca | 21 Sc | 22 Ti | 23 V | 24 Cr | 25 Mn | 26 Fe | 27 Co | 28 Ni | 29 Cu | 30 Zn | 31 Ga | 32 Ge | 33 As | 34 Se | 35 Br | 36 Kr |
| 5 | 37 Rb | 38 Sr | 39 Y | 40 Zr | 41 Nb | 42 Mo | 43 Tc | 44 Ru | 45 Rh | 46 Pd | 47 Ag | 48 Cd | 49 In | 50 Sn | 51 Sb | 52 Te | 53 I | 54 Xe |
| 6 | 55 Cs | 56 Ba | 57 La | 58 Ce | 59 Pr | 60 Nd | 61 Pm | 62 Sm | 63 Eu | 64 Gd | 65 Tb | 66 Dy | 67 Ho | 68 Er | 69 Tm | 70 Yb | 71 Lu | |
| 7 | 87 Fr | 88 Ra | 89 Ac | 104 Rf | 105 Db | 106 Sg | 107 Bh | 108 Hs | 109 Mt | 110 Uun | 111 Uuu | 112 Uub | 114 Uuq | 116 Uuh | 118 Uuo | | | |

Lantánidos

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 58 Ce | 59 Pr | 60 Nd | 61 Pm | 62 Sm | 63 Eu | 64 Gd | 65 Tb | 66 Dy | 67 Ho | 68 Er | 69 Tm | 70 Yb | 71 Lu |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Actínidos

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 90 Th | 91 Pa | 92 U | 93 Np | 94 Pu | 95 Am | 96 Cm | 97 Bk | 98 Cf | 99 Es | 100 Fm | 101 Md | 102 No | 103 Lr |
|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|

Notas:

Metales
 Metaloides
 No metales
 Gases nobles

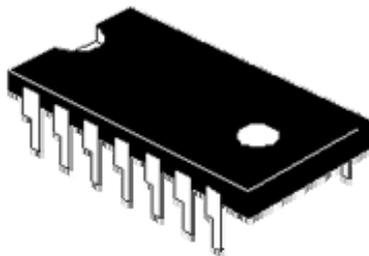
(1) Base en peso atómico carbono de 12 () indica el más estable o el de isótopo más conocido.

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) [SiO₂]** 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.

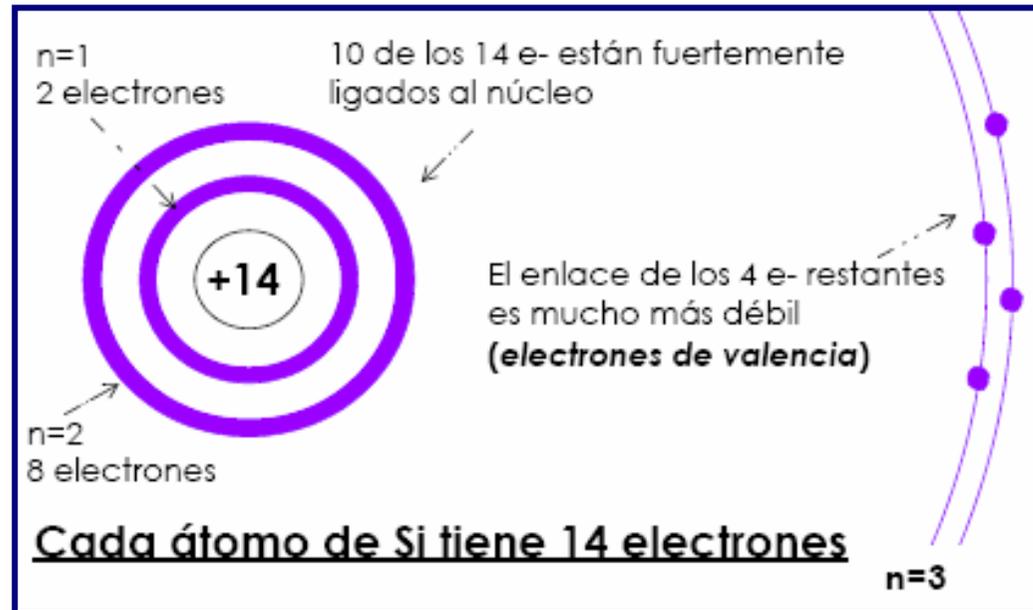


<http://www.politecnicocartagena.com>

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|------|-------|------|-----|------|-------|--------|------|-----|------|-------|-----|------|-------|------|-----|------|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | |
| I A | II A | III A | IV A | V A | VI A | VII A | VIII A | IX A | X A | XI A | XII A | I B | II B | III B | IV B | V B | VI B | 0 |
| H | Li | Be | B | C | N | O | F | Ne | Na | Mg | Al | Si | P | S | Cl | Ar | He | |
| Na | K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| Rb | Cs | Ba | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| Fr | Ra | | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn | |
| | | | 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)

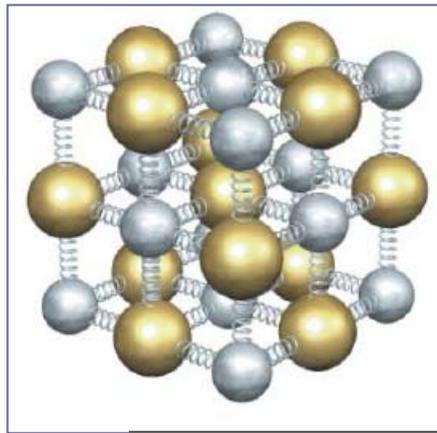


<http://www.politecnicocartagena.com>

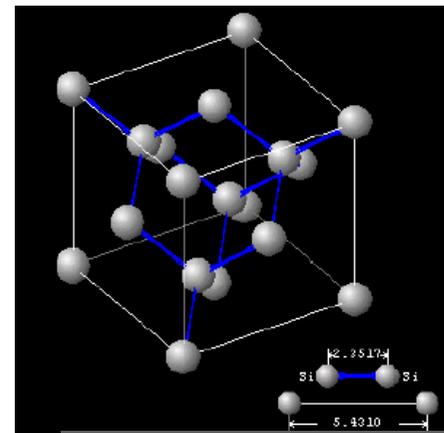
- Los dos primeros niveles (E_1 y E_2) acomodan: 2 y 8 electrones
 - Estos electrones están ligados al átomo y no pueden ser perturbados
- En el tercer nivel E_3 restan 4 electrones → Son los llamados electrones de valencia → Pueden ser fácilmente liberados de sus posiciones para formar enlaces.

- 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>

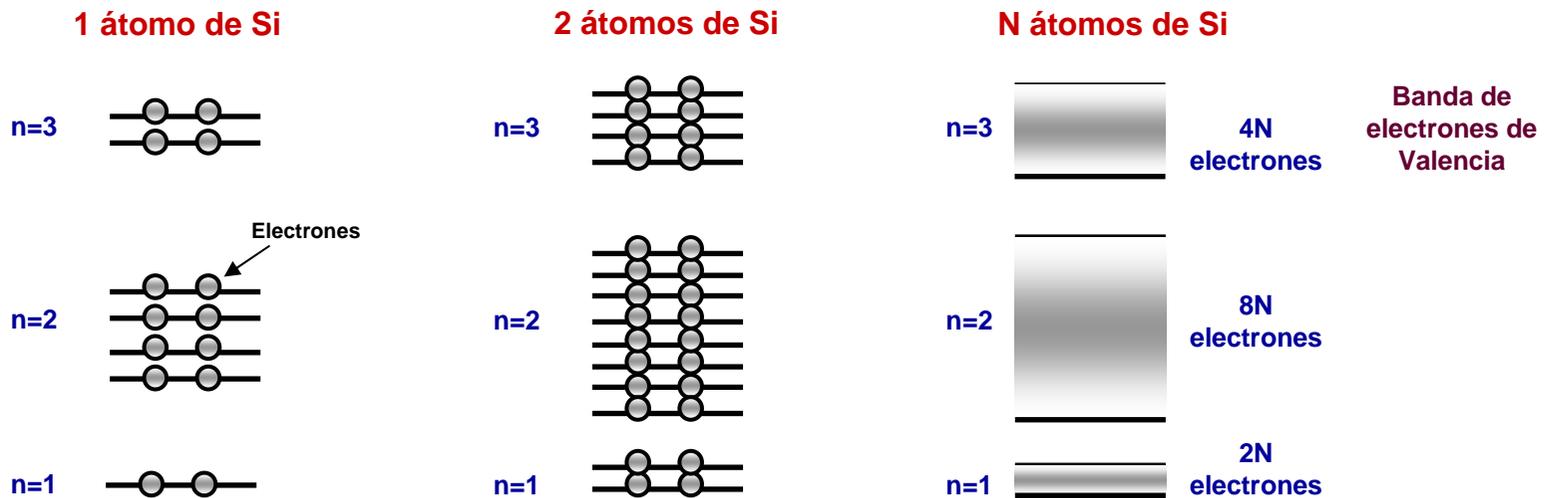


Cortesía de wie@acsu.buffalo.edu

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.

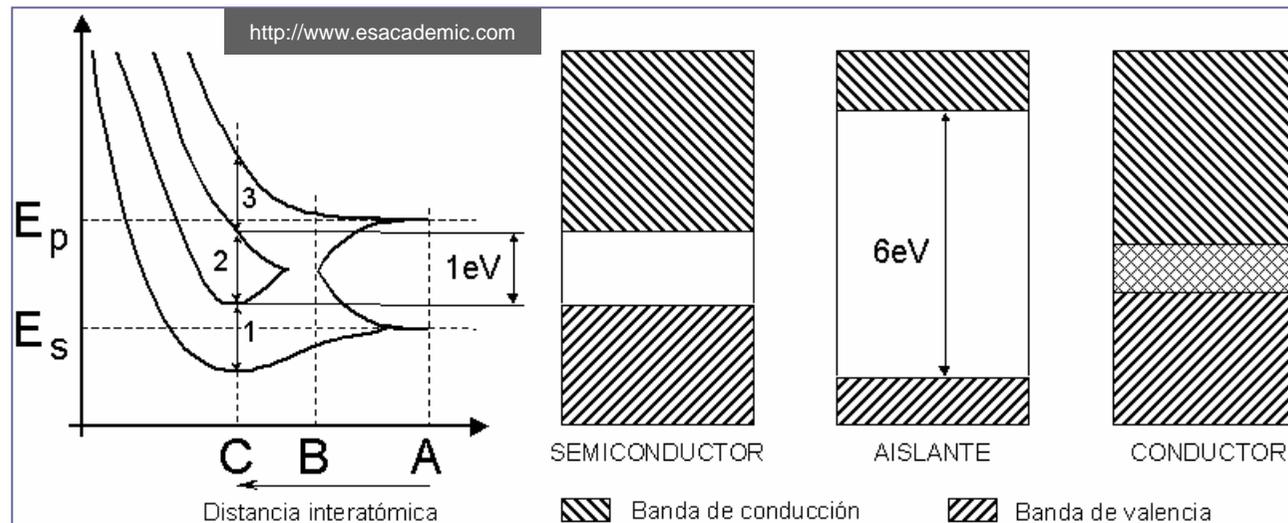


Modelo de bandas de energía: **Clasificación**

- 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





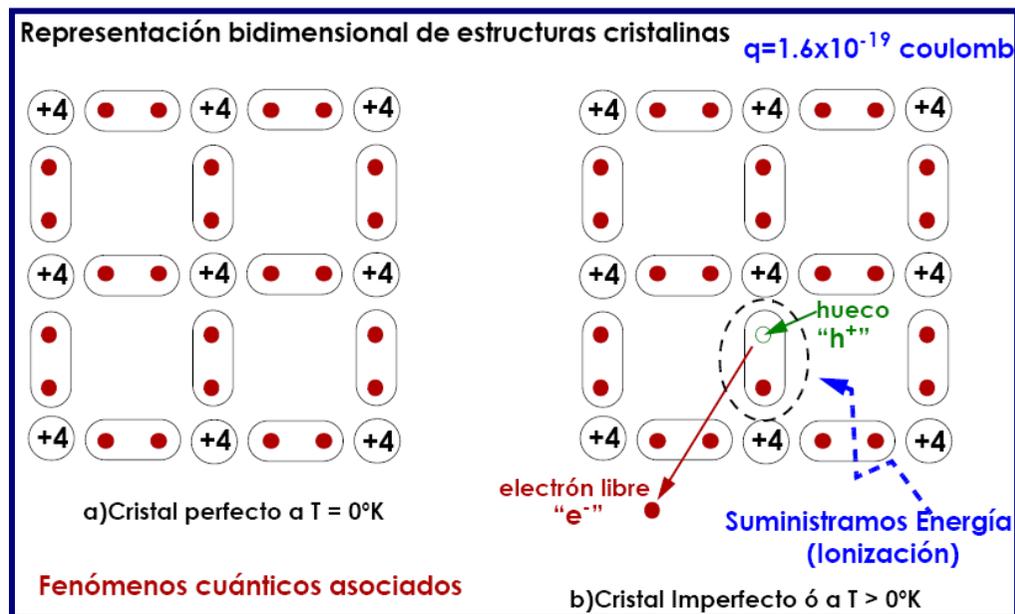
TEMA 1. SEMICONDUCTORES

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.



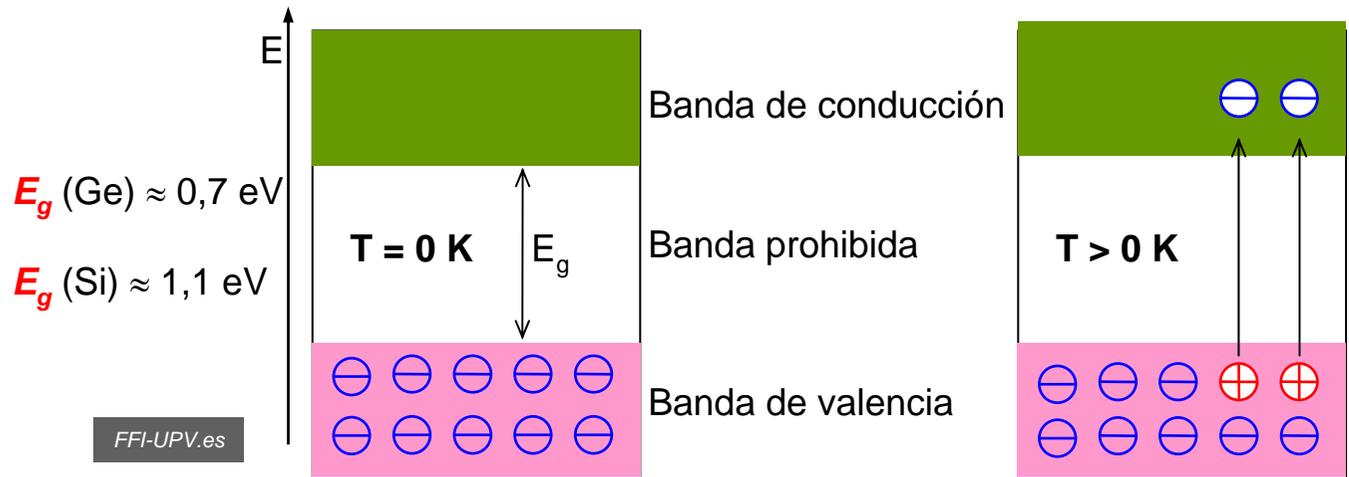
Representación
bidimensional de la
estructura cristalina
del Si

- 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^+)

TEMA 1. SEMICONDUCTORES

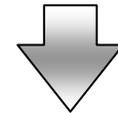
1.3. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

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



FFI-UPV.es

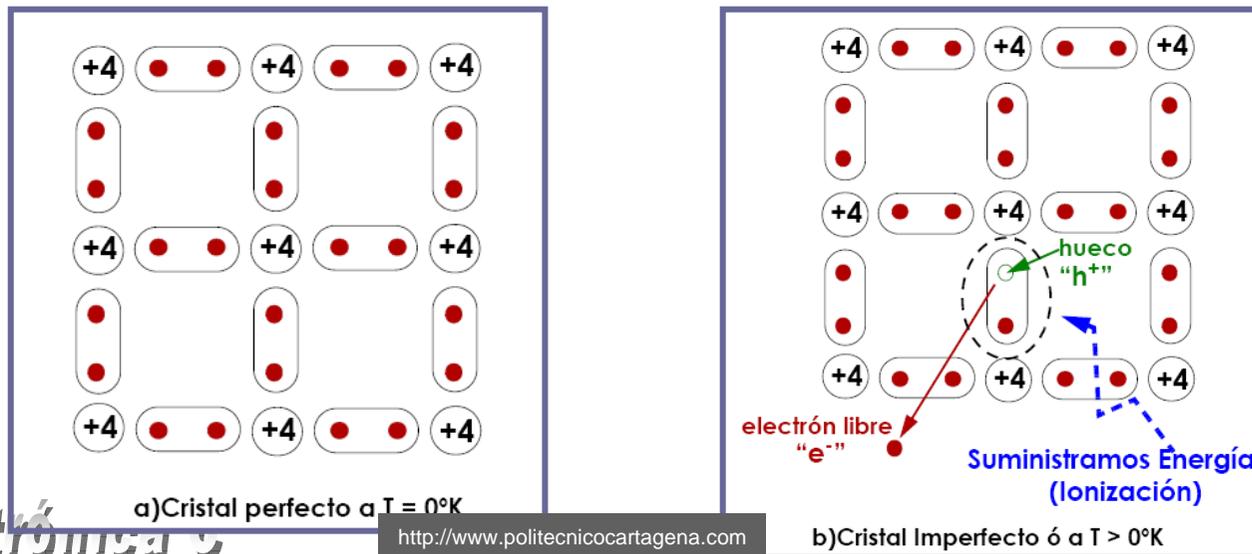
$$n = p = n_i$$



n : nº electrones/ m^3

p : nº electrones/ m^3

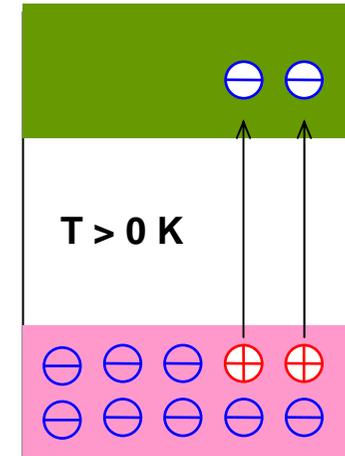
n_i : densidad intrínseca de portadores



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

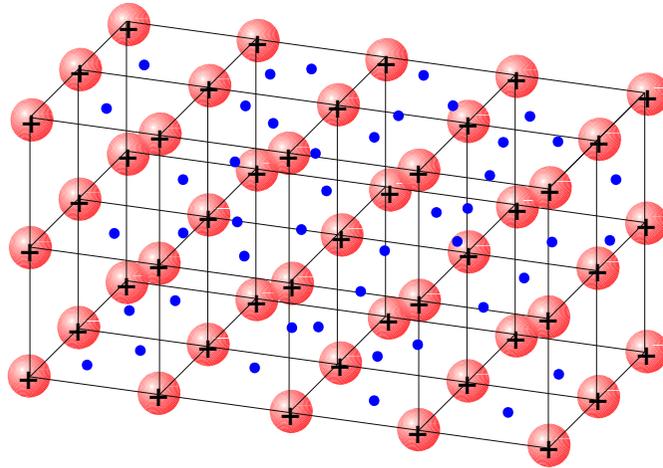
| T=300 K | GaAs | Si | Ge |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| n_i (port./cm ³) | 1.8·10 ⁶ | 1.5·10 ¹⁰ | 2.4·10 ¹³ |
| E_g : GAP (eV) | 1.42 | 1.12 | 0.66 |
| Conductividad (Ω ⁻¹ cm ⁻¹) | 2.4 10 ⁻⁹ | 4.5 10 ⁻⁶ | - |

FFI-UPV.es

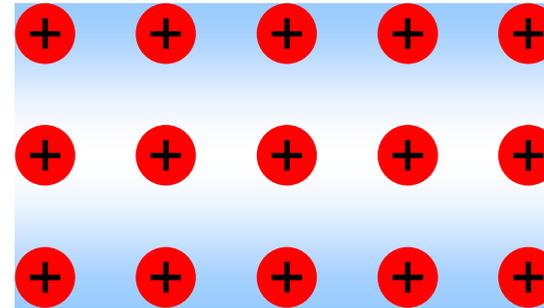


1.3. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

■ Estructura de un metal



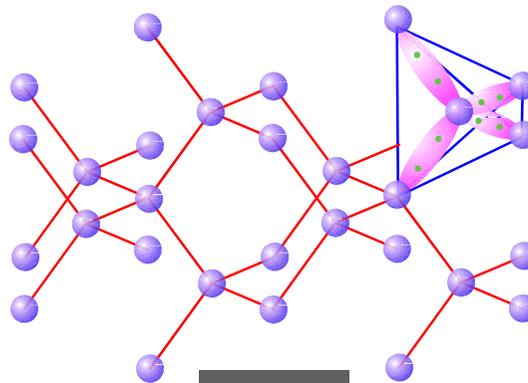
FFI-UPV.es



$\approx 10^{23}$ e⁻ libres/cm³

FFI-UPV.es

■ Estructura de un semiconductor



FFI-UPV.es

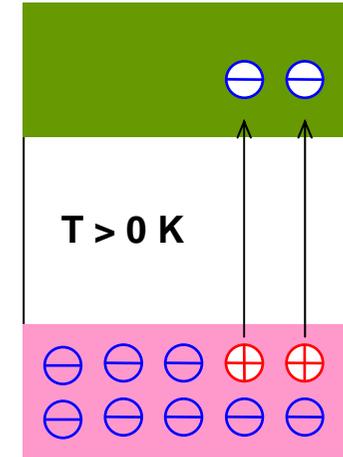
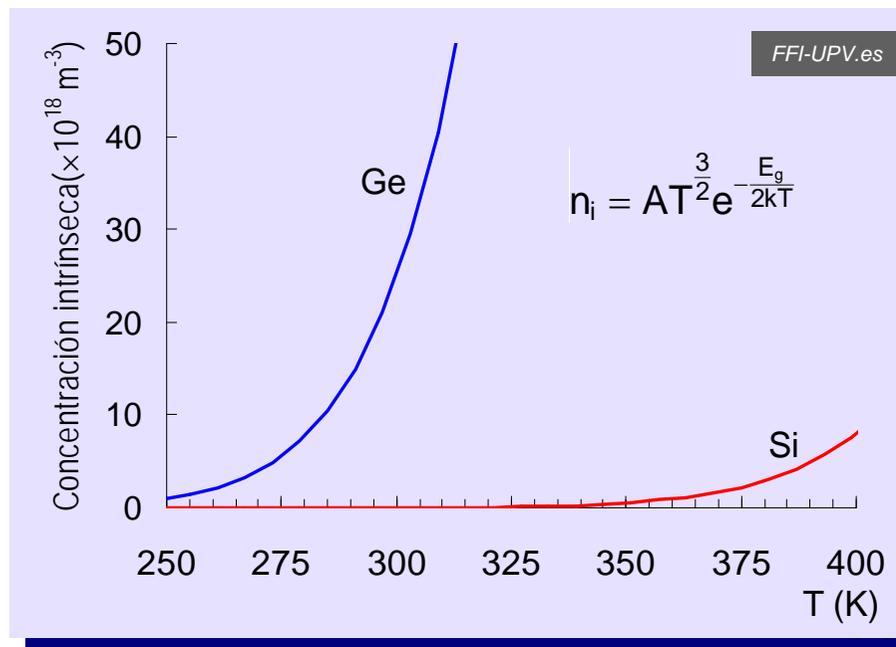
$\approx 10^{13}$ e⁻ libres/cm³

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**:

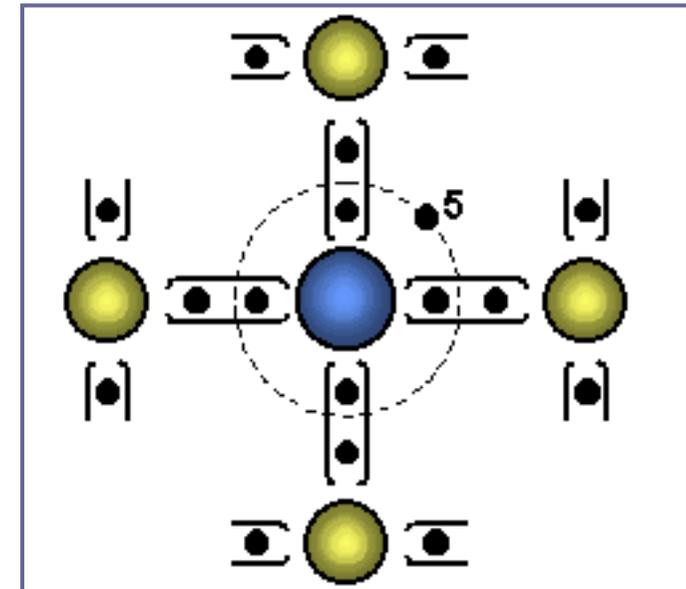
- En la práctica **nos interesa controlar la concentración de portadores** en un semiconductor (***n*** o ***p***).
- De este modo se pueden modificar las propiedades eléctricas: **conductividad**
- Para ello se **procede al proceso de DOPADO**:
 - Un **pequeño porcentaje de átomos del SC intrínseco 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>

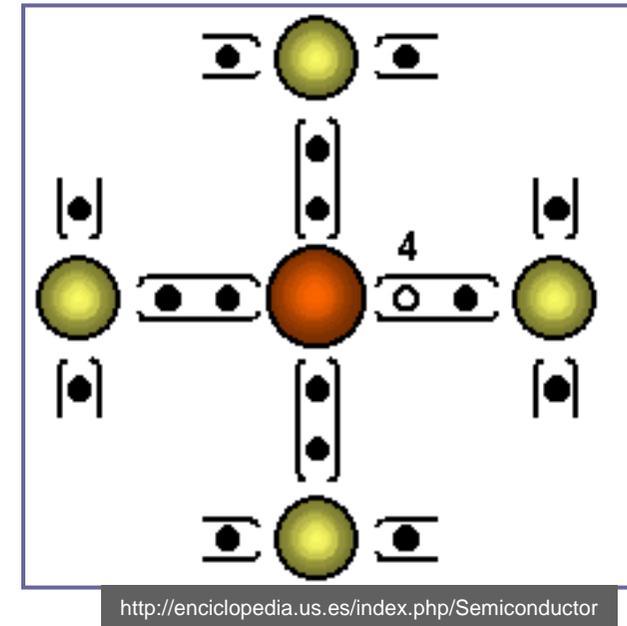
$n \gg p$

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

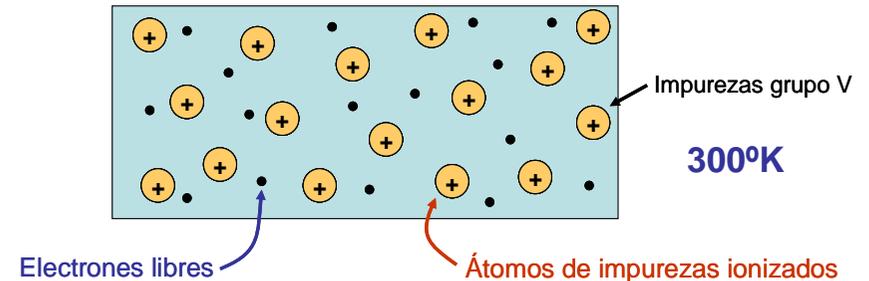
1.3. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

■ 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**

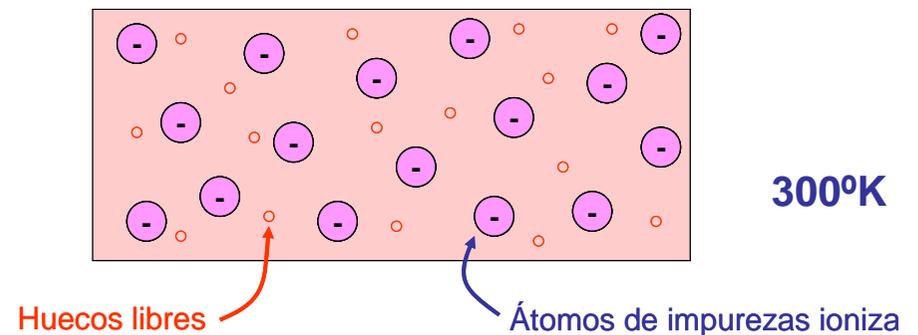


<http://www.politecnicocartagena.com>

□ 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}

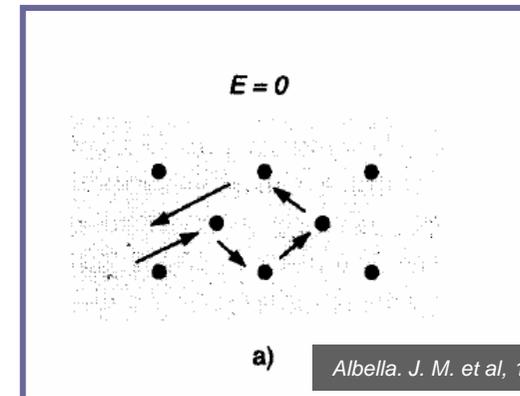
$$\frac{1}{2} m^* v_{th}^2 = \frac{3}{2} K_B T$$

- 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)

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

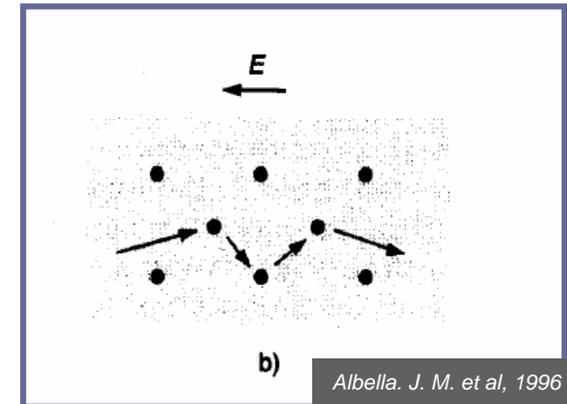
$$\vec{v}_{dn} = -\frac{e\tau_n}{m_n^*} \vec{E} = -\mu_n \vec{E}$$

m_n^* : masa efectiva de electrones

τ_n : tiempo medio entre choques

μ_n : movilidad de electrones

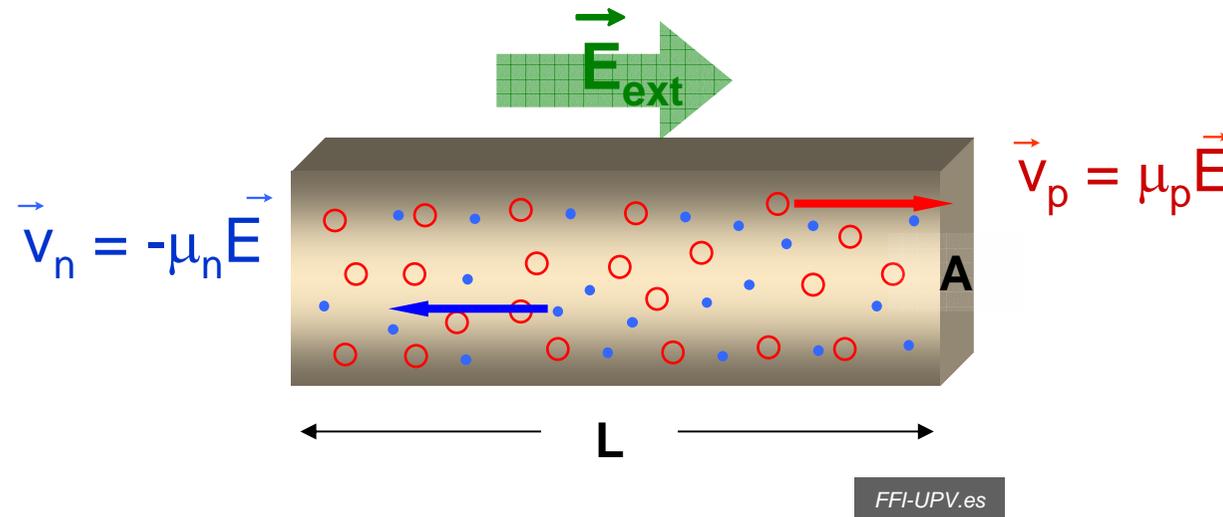
- Los valores: m^* , τ , μ son propios de cada tipo de portador y del semiconductor.
- En general $m_p^* > m_n^*$, y $\tau_n = \tau_p \rightarrow v_{dn} > v_{dp}$



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° 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

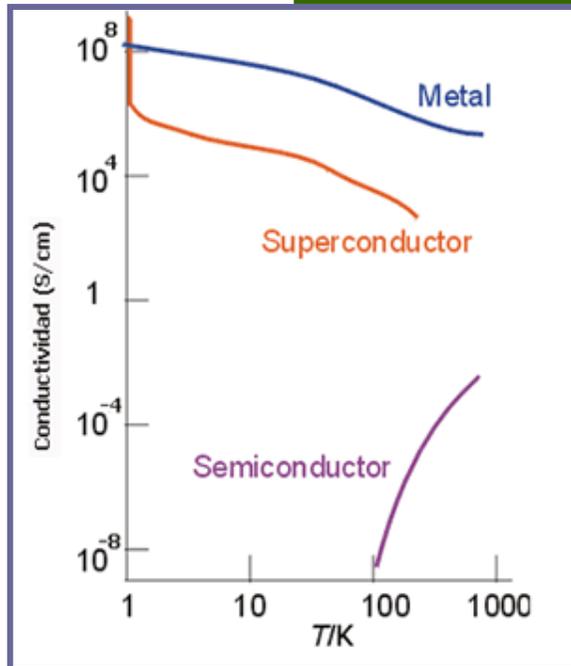
Corrientes de deriva/arrastre/desplazamiento en SC

- 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

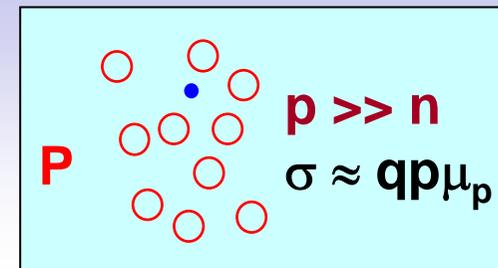
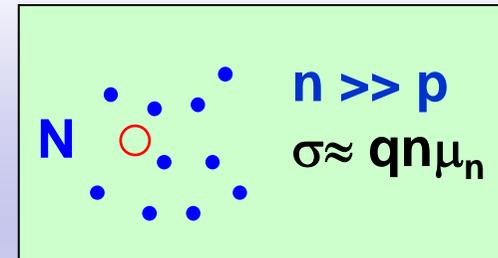
$$p = n = n_i$$

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

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

Extrínsecos

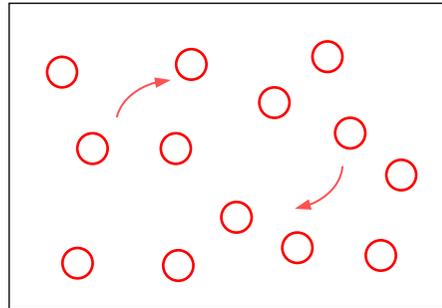
FFI-UPV.es



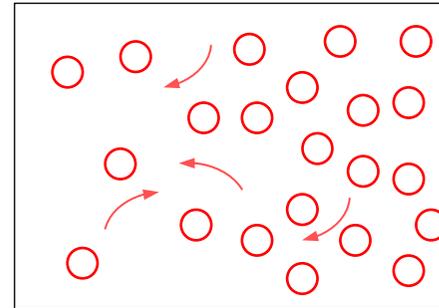
1.5. TRANSPORTE DE PORTADORES EN UN SEMICONDUCTOR

■ 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**.

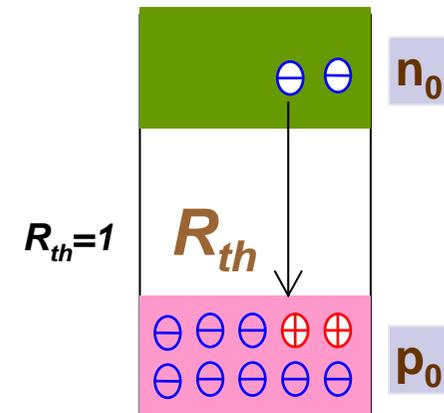
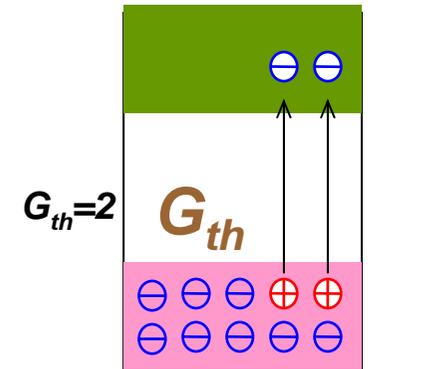
□ Este fenómeno se caracteriza por un número : R_{th}
(número de pares **recombinados** por unidad de volumen y de tiempo)

■ 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**:

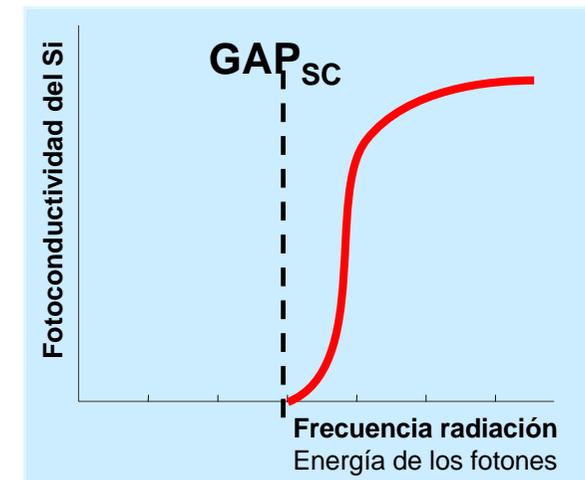
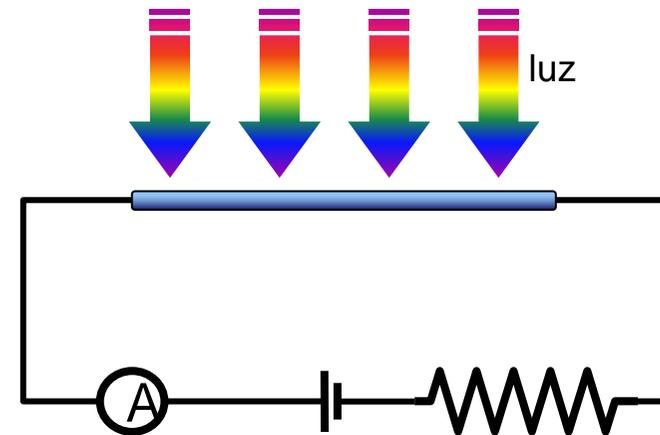
- EJEMPLO → **INYECCION OPTICA**

- 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
 ν : 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)

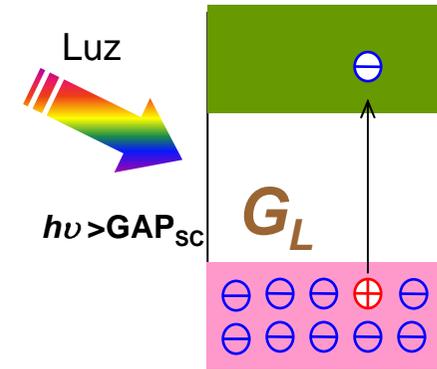
□ En situaciones de **NO equilibrio térmico**: **Inyección óptica**

- 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

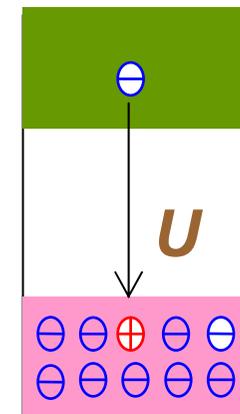


FFI-UPV.es

□ 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*

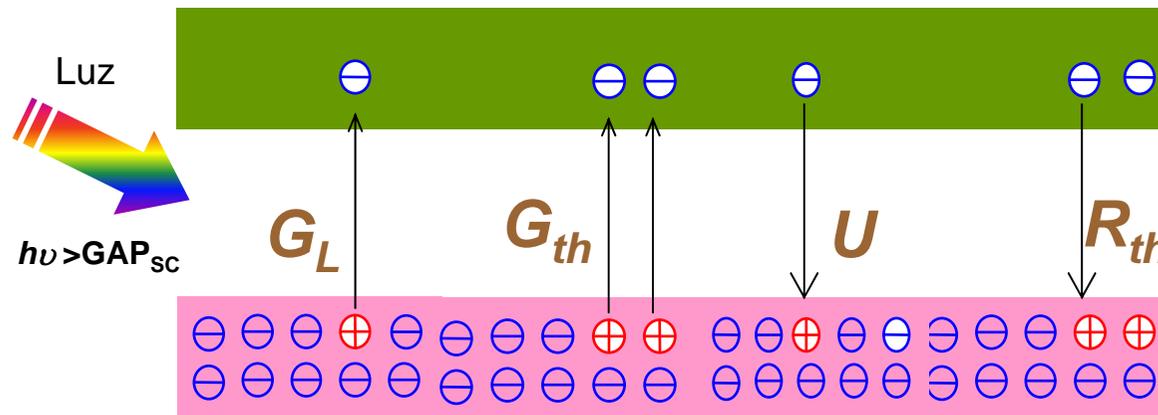
- El número de portadores generados GLOBAL por foto-conductividad se puede expresar como:

$$\Delta n = G_L \tau$$

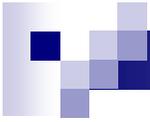
$$\Delta p = G_L \tau$$

G_L : número de portadores que se generan/ (m³ s)
 τ : 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/Semiconductor>
- 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.quimicaweb.net/grupo_trabajo_fyq3/tema4/imagenes/Bohratommodel.png