

TEMA 3: FÍSICA DE SEMICONDUCTORES

3.1.- Introducción a los semiconductores: conductores, aislantes y semiconductores

3.2.- Nociones de teoría de bandas. Semiconductores intrínsecos y extrínsecos. Semiconductores tipo n y p

3.3.- Generación y recombinación de portadores

Los materiales pueden clasificarse por sus propiedades físicas, como la **conductividad eléctrica (σ)** o su inverso, la **resistividad (ρ)**:

Material:	CONDUCTOR	SEMICONDUCTOR	AISLANTE
Resistividad típica ρ (Ω/cm)	$10^{-10} \sim 10^{-8}$	$10^{-6} \sim 10^6$	$10^{10} \sim 10^{20}$

Estas propiedades están relacionadas con:

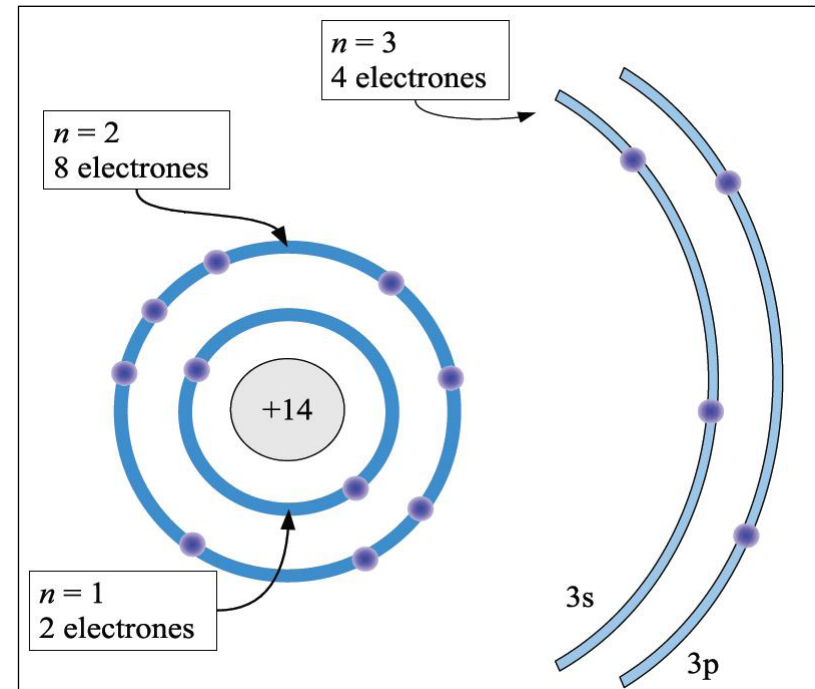
- La estructura electrónica de los átomos
- La interacción entre átomos cuando están próximos

• Estructura electrónica de los átomos

Z	Name	# of Electrons						Notation
		1	2		3			
		1s	2s	2p	3s	3p	3d	
1	H	1						$1s^1$
2	He	2						$1s^2$
3	Li	2	1					$1s^2 2s^1$
4	Be	2	2					$1s^2 2s^2$
5	B	2	2	1				$1s^2 2s^2 2p^1$
6	C	2	2	2				$1s^2 2s^2 2p^2$
7	N	2	2	3				$1s^2 2s^2 2p^3$
8	O	2	2	4				$1s^2 2s^2 2p^4$
9	F	2	2	5				$1s^2 2s^2 2p^5$
10	Ne	2	2	6				$1s^2 2s^2 2p^6$
11	Na	2	2	6	1			$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
12	Mg	2	2	6	2			$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$
13	Al	2	2	6	2	1		$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
14	Si	2	2	6	2	2		$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
15	P	2	2	6	2	3		$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
16	S	2	2	6	2	4		$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$
17	Cl	2	2	6	2	5		$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$
18	Ar	2	2	6	2	6		$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$

Ej.: Silicio

10 electrones interiores: $1s^2 2s^2 2p^6$
 4 electrones de valencia: $3s^2 3p^2$



Principio de exclusión de Pauli: no puede haber dos electrones con el mismo conjunto de números cuánticos (n , l , m y s)

TEMA 3: FÍSICA DE SEMICONDUCTORES. 3.1.- Introducción a los semiconductores

A mayor n , menor atracción de los electrones por el núcleo

- ⇒ Electrones de capas interiores, fuertemente ligados
- ⇒ Electrones de la última capa (e. de valencia) menos atraídos por el núcleo
Responsables del tipo de enlace entre átomos

- Tipos de enlace:

- E. iónico: cesión de e^- de val. de un átomo a otro. Los iones de distinto signo se atraen entre sí. Ej.: Cloruro sódico (Na: 1 e^- de valencia, Cl: 7 e^- de valencia)
- E. metálico: formado por átomos que presentan entre 1 y 3 e^- de valencia. La nube de electrones libres mantiene unidos los iones positivos. Ej: Sodio
- E. covalente: compartición de e^- de valencia entre átomos. Ej.: diamante, silicio

- Muchos materiales presentan enlaces de carácter mixto entre sus átomos

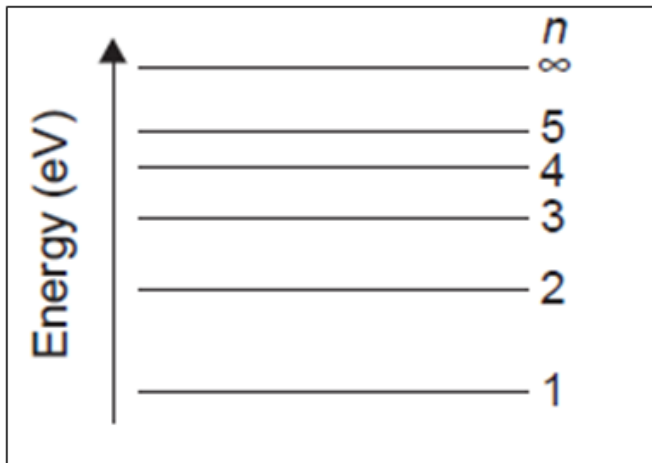
- La clasificación por el tipo de enlace sólo permite distinguir conductores y aislantes

- **Interacción entre niveles de energía electrónicos de átomos próximos**

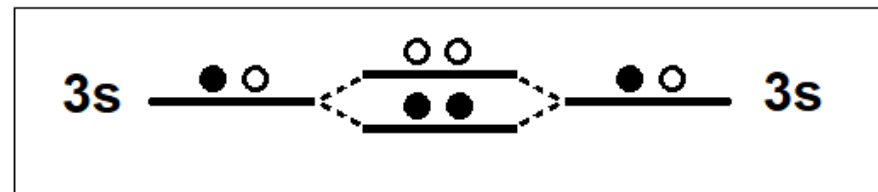
Para entender la diferencia entre aislantes, conductores y semiconductores es necesario conocer cómo se ven afectados los niveles (orbitales) de los electrones de valencia de los átomos individuales cuando se acercan entre sí:

- Dos átomos idénticos. Ej.: Sodio: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$

Niveles en el átomo aislado



Niveles de energía de dos átomos próximos

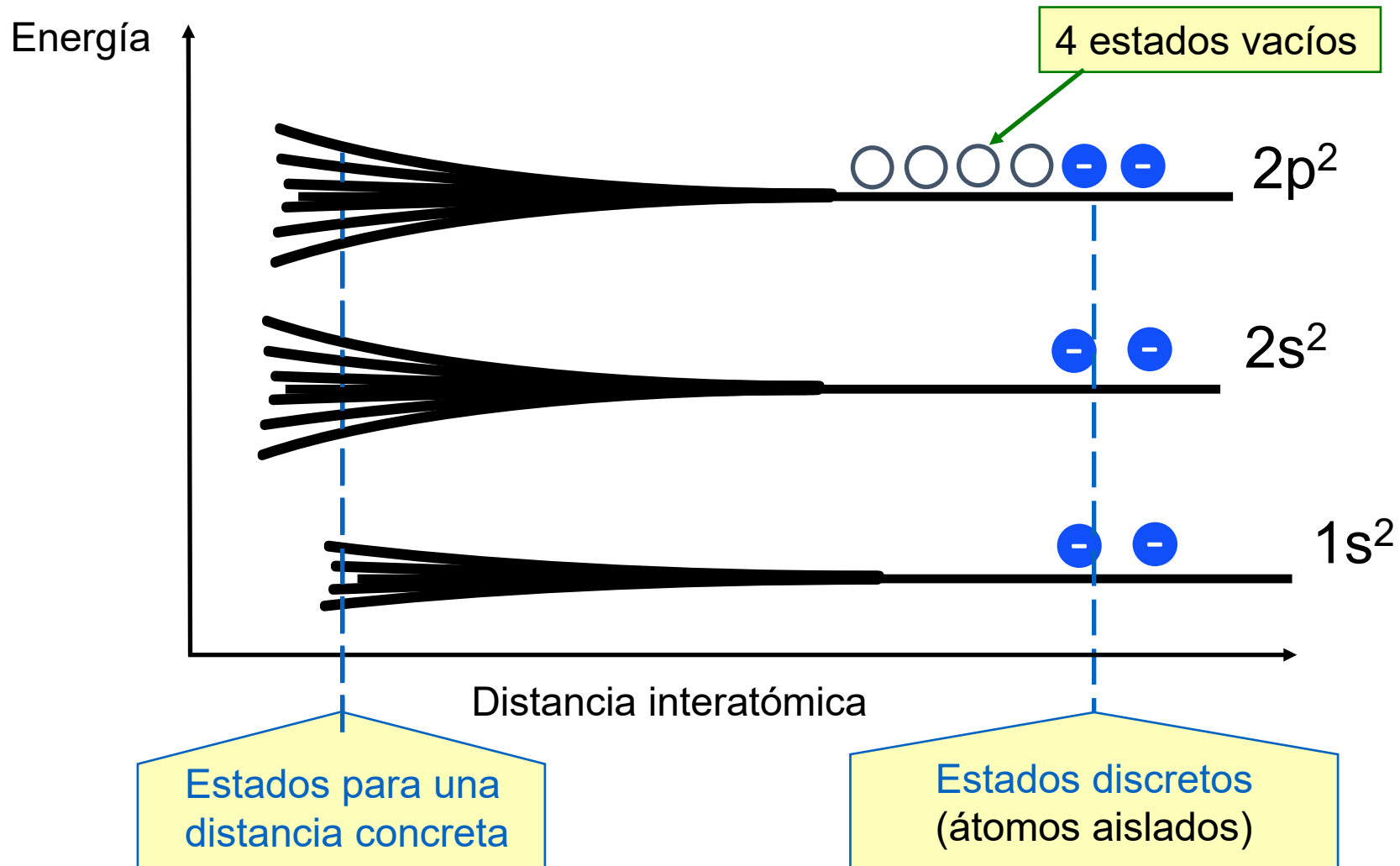


- A medida que se aproximan, más interfieren entre sí los electrones más externos (P^0 de exclusión de Pauli)

- Los nuevos niveles de energía no pertenecen a ninguno de los átomos, sino a ambos en conjunto. Los electrones ocupan normalmente el nivel de menor energía

TEMA 3: FÍSICA DE SEMICONDUCTORES. 3.1.- Introducción a los semiconductores

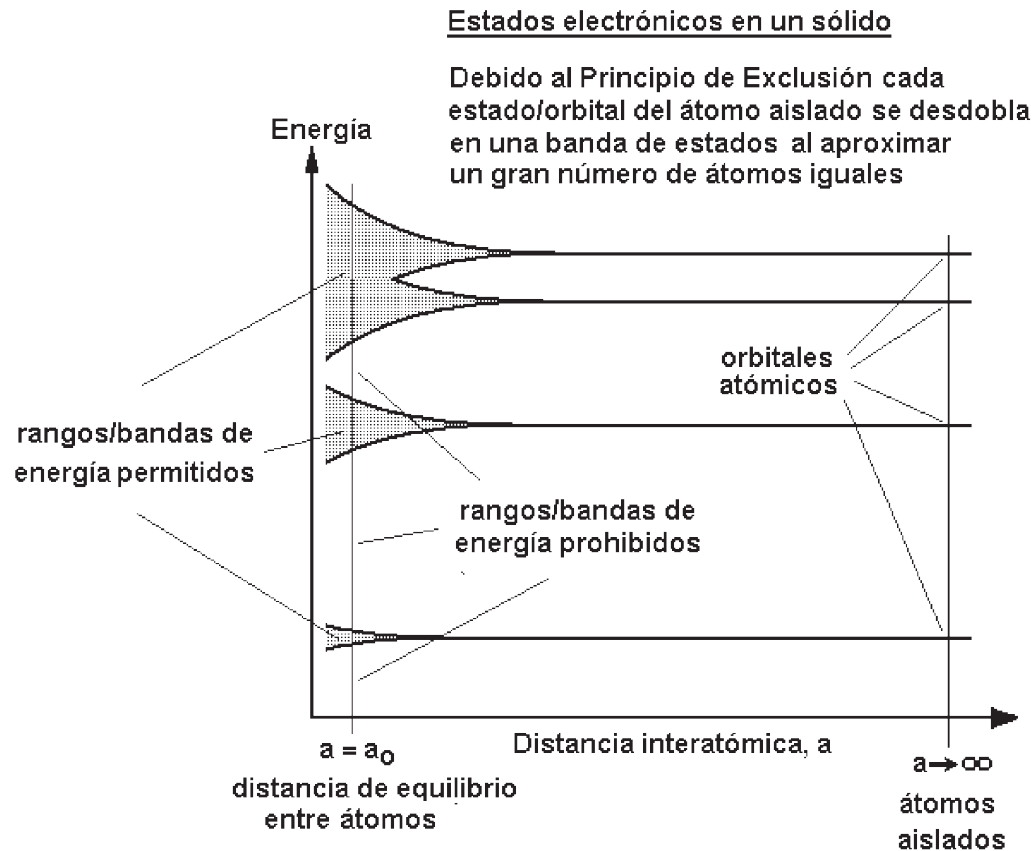
- Varios átomos idénticos. Ej.: Carbono: $1s^2 2s^2 2p^2$



- Al acercar N átomos, a partir de cada nivel atómico se generan N niveles próximos
- En un material macroscópico, $N \sim 10^{24}!!! \Rightarrow$ niveles adyacentes con energías muy próximas

TEMA 3: FÍSICA DE SEMICONDUCTORES. 3.1.- Introducción a los semiconductores

• N átomos idénticos $\sim 10^{24}$: **Bandas de energía**



- Un orbital ocupado da lugar a una banda llena de electrones
- Un orbital desocupado da lugar a una banda vacía de electrones
- Un orbital parcialmente ocupado (p. ej. en átomos de la 1ª columna, dos estados con la misma energía y diferente spin, ocupado sólo uno de ellos) da lugar a una banda parcialmente llena
- Una banda completamente llena de electrones no contribuye a la conducción de corriente: hay tantos electrones con velocidad en una dirección como en la opuesta, y no hay más estados a los que los electrones puedan ser acelerados

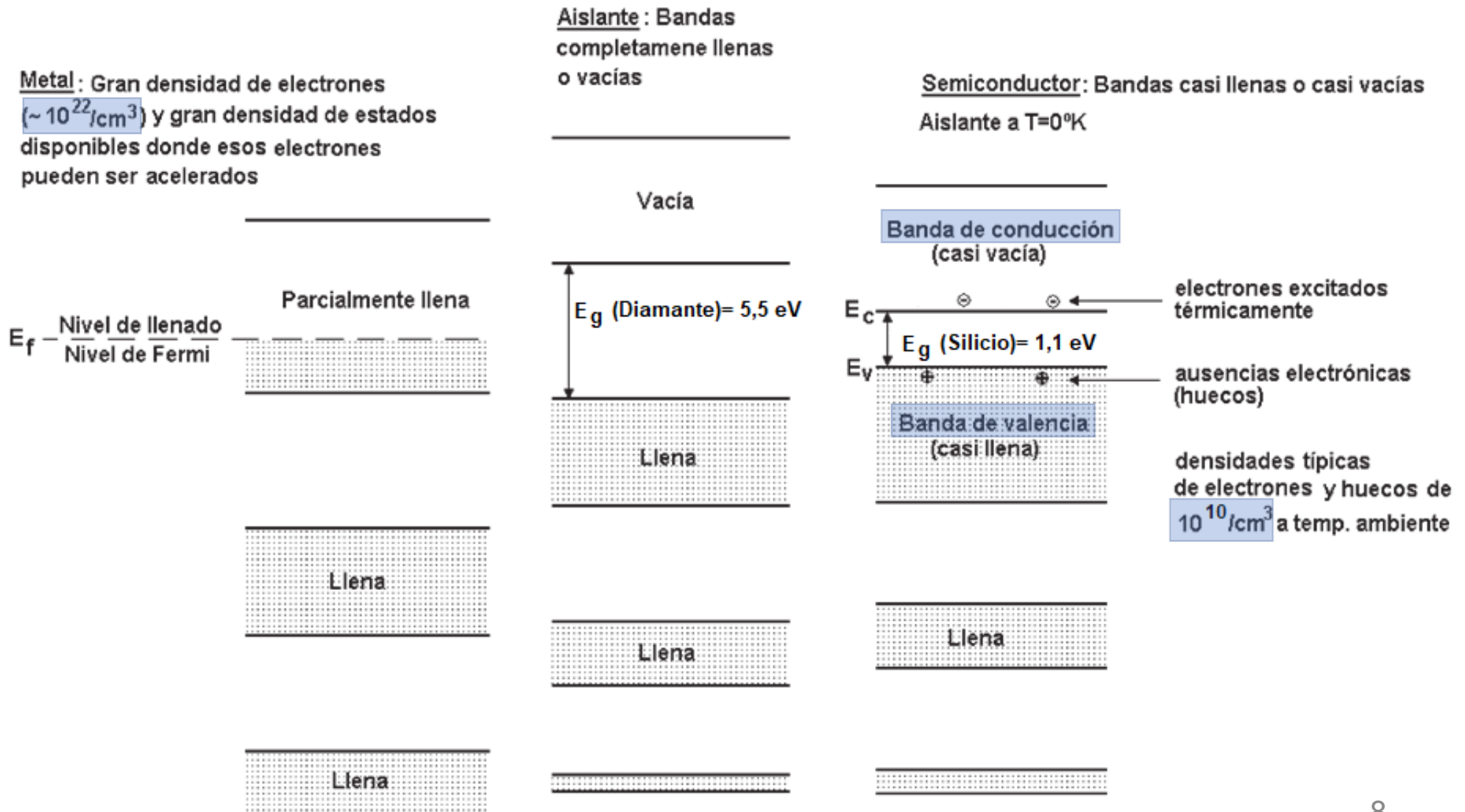
- Los electrones de niveles de energías más profundos se ven mucho menos afectados y están completamente llenos

- La distancia de equilibrio entre átomos a_0 es propia de cada material

TEMA 3: FÍSICA DE SEMICONDUCTORES. 3.1.- Introducción a los semiconductores

• Metales, aislantes y semiconductores

El concepto de banda de energía nos permite distinguir tres casos, dependiendo de la anchura de la banda de energía prohibida que “ven” los electrones más externos:



⇒ Otro posible criterio para clasificar los materiales: la energía de la banda prohibida o energía del “gap”:

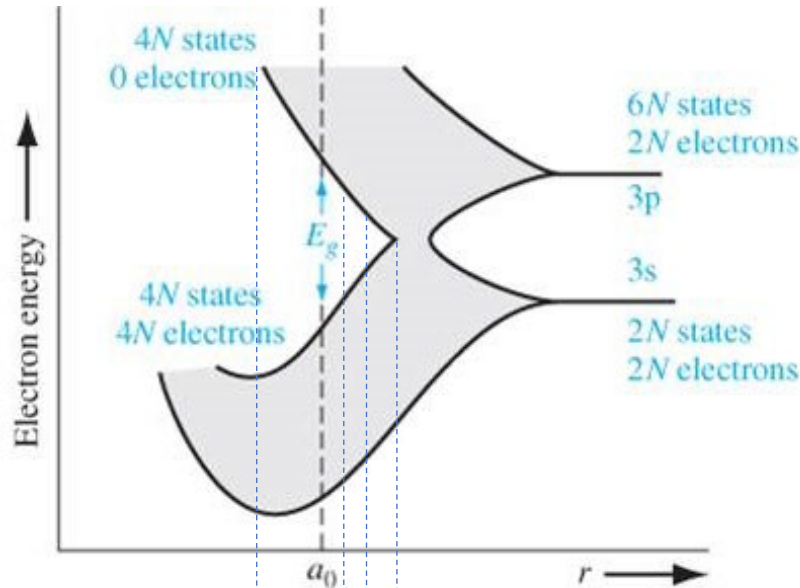
Material:	CONDUCTOR	SEMICONDUCTOR	AISLANTE
Energía del gap E_g (eV):	No tiene	~0,5-2	~5-10

Además, aparece un nuevo concepto relacionado: la energía de Fermi, **E_F**:

- En un metal, la energía de Fermi es la mayor energía que pueden tener los electrones
- En los semiconductores también se define la energía de Fermi, como se verá más adelante

• Materiales con mismos electrones de valencia

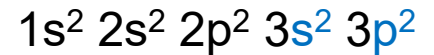
Una misma configuración electrónica externa puede resultar en materiales de distinto tipo:



Carbono (aislante):



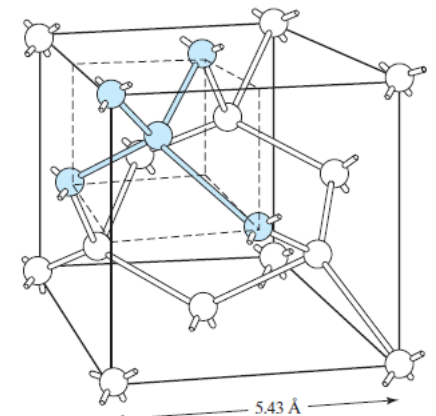
Silicio (semiconductor):



- Los orbitales s y p de la última capa se mezclan inicialmente en $2N+6N = 8N$ estados sp, que dan lugar a $4N+4N$ estados semi-ocupados agrupados en dos bandas separadas.
- En ambos casos, cada átomo está enlazado con otros cuatro de forma covalente.

C Si Sn
Ge

	C	Si	Ge	Sn
Constante de red (Å)	(3,565)	(5,43)	(5,65)	(6,46)
Longitud de enlace (Å)	1,54	2,33	2,43	2,80
Energía del gap a T=300K (eV)	5,47	1,12	0,66	-
Id. a T=0K (eV)	5,48	1,17	0,74	0,082



- Semiconductores intrínsecos y extrínsecos**

Un semiconductor intrínseco es aquel que no tiene impurezas. Puede tener un solo tipo de átomos o varios:

- Semiconductores elementales:** germanio (Ge), silicio (Si)

- Compuestos IV:** SiC, SiGe

- Compuestos III-V:**

- Binarios:** GaAs, GaP, GaSb, GaN, AlAs, AlP, AlSb, InAs, InP, InSb
- Ternarios:** GaAsP, AlGaAs
- Cuaternarios:** InGaAsP

- Compuestos II-VI:** ZnS, ZnSe, ZnTe, ZnO, CdS, CdSe, CdTe

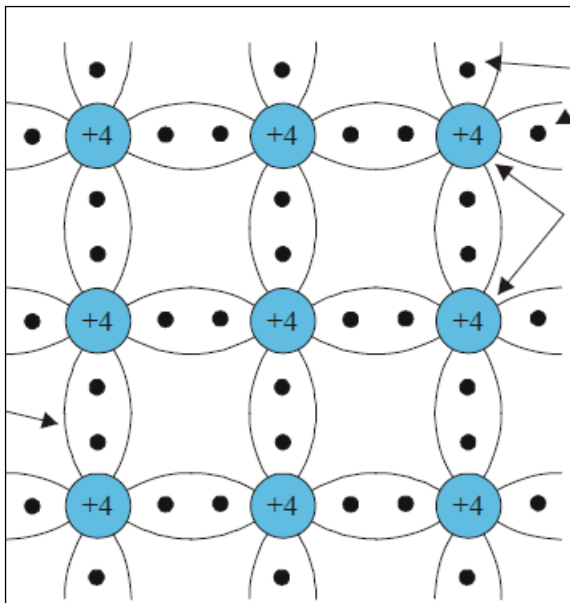
	13	14	15	16
	IIIA	IVA	VA	VIA
	5 B Boro 10.811	6 C Carbono 12.0107	7 N Nitrógeno 14.00674	8 O Oxígeno 15.9994
12 IIB	13 Al Aluminio 26.981538	14 Si Silicio 28.0855	15 P Fósforo 30.973761	16 S Azufre 32.066
30 Zn Zinc 65.409	31 Ga Galio 69.723	32 Ge Germanio 72.64	33 As Arsénico 74.92160	34 Se Selenio 78.96
48 Cd Cadmio 112.411	49 In Indio 114.818	50 Sn Estaño 118.710	51 Sb Antimonio 121.760	52 Te Teluro 127.60

- **Semiconductores intrínsecos**

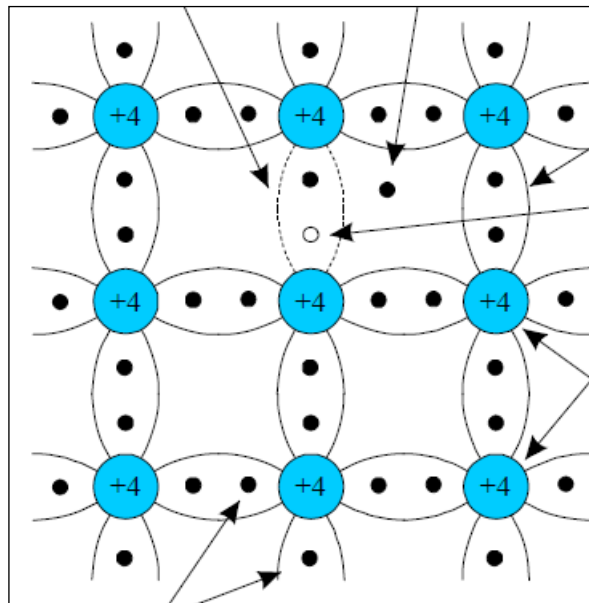
Son aislantes a bajas temperaturas, al no haber apenas enlaces rotos térmicamente

- Ej.: Silicio $1s^2 2s^2 2p^2 3s^2 3p^2$

(Por sencillez, sólo se representan los electrones de valencia, y se explicita la carga positiva correspondiente del núcleo que requiere los compensa)



Temperaturas bajas



Temperaturas elevadas

Portadores de carga:
huecos y electrones

$$n_0 = p_0 = n_i$$
$$= A \cdot T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right)$$

Los huecos que aparecen por efecto de la temperatura pueden pasar a ser ocupados por electrones de valencia próximos

- **Semiconductores extrínsecos**

Se fabrican introduciendo determinadas impurezas, que pueden ser donantes o aceptoras

- **Semiconductores tipo n:** impurezas donantes

- Ej.: Silicio $1s^2 2s^2 2p^2 3s^2 3p^2$ dopado con fósforo $1s^2 2s^2 2p^2 3s^2 3p^3$

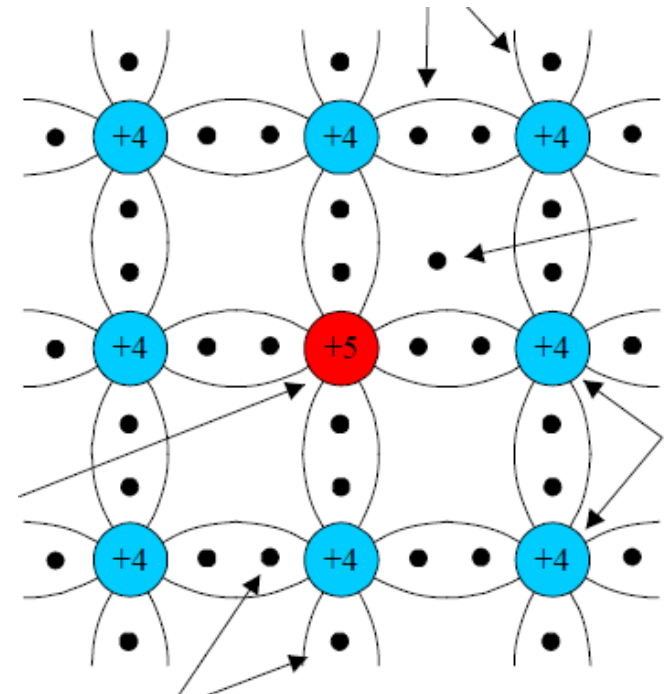
Cada átomo de impureza donante aporta un electrón libre extra:

- Concentración de portadores:

$$n = n_i + N_D ; p = n_i$$

$$\Rightarrow \text{Si } N_D \gg n_i, n \approx N_D \text{ y } n \gg p$$

e- libres: mayoritarios; huecos: minoritarios



- El material sigue siendo neutro

- Controlando N_D se puede controlar la resistividad del semiconductor

- **Semiconductores extrínsecos**

Se fabrican introduciendo determinadas impurezas, que pueden ser donantes o aceptoras

- **Semiconductores tipo p:** impurezas aceptoras

- Ej.: Silicio $1s^2 2s^2 2p^2 3s^2 3p^2$ dopado con boro $1s^2 2s^2 2p^1$

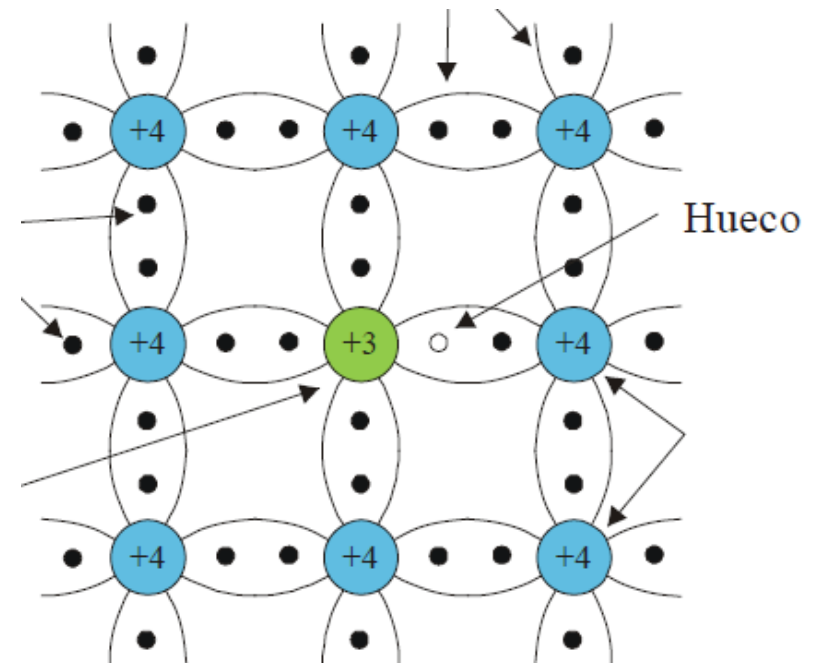
Cada átomo de impureza aceptora aporta un hueco de electrón extra:

- Concentración de portadores:

$$p = n_i + N_A ; n = n_i$$

$$\Rightarrow \text{Si } N_A \gg n_i, p \approx N_A \text{ y } p \gg n$$

huecos: mayoritarios; e- libres: minoritarios

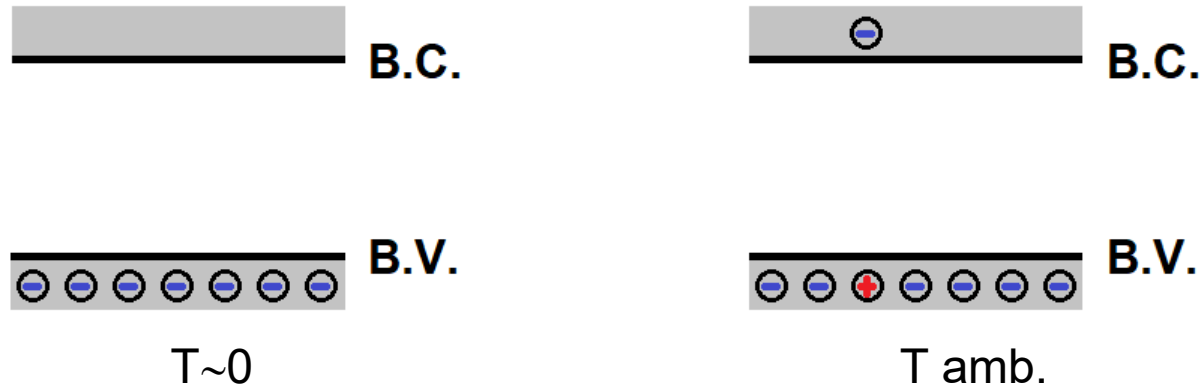


- El material sigue siendo neutro

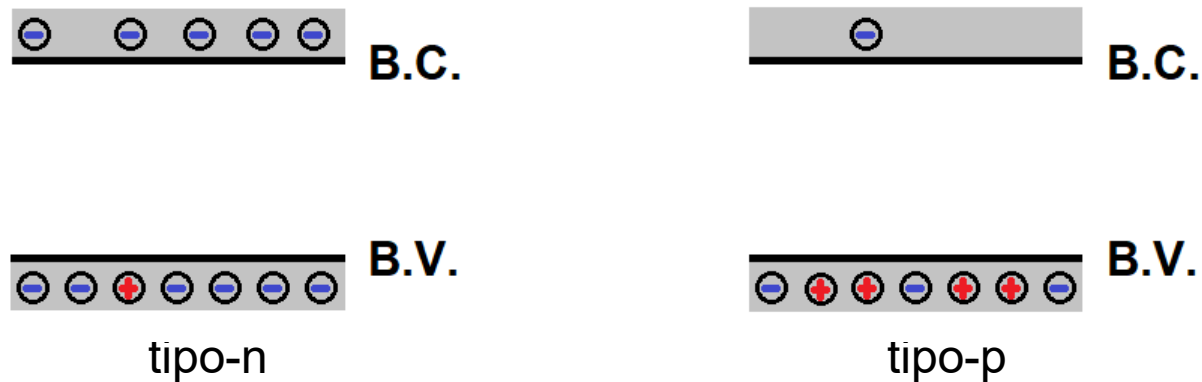
• Controlando N_A se puede controlar la resistividad/conductividad del semiconductor, pues las vacantes que se generan también contribuyen a la conducción al aplicar un campo eléctrico al material

- **Diagramas de energía en semiconductores. Nivel de Fermi**

Esquemáticamente, mediante diagramas de energía simplificados:



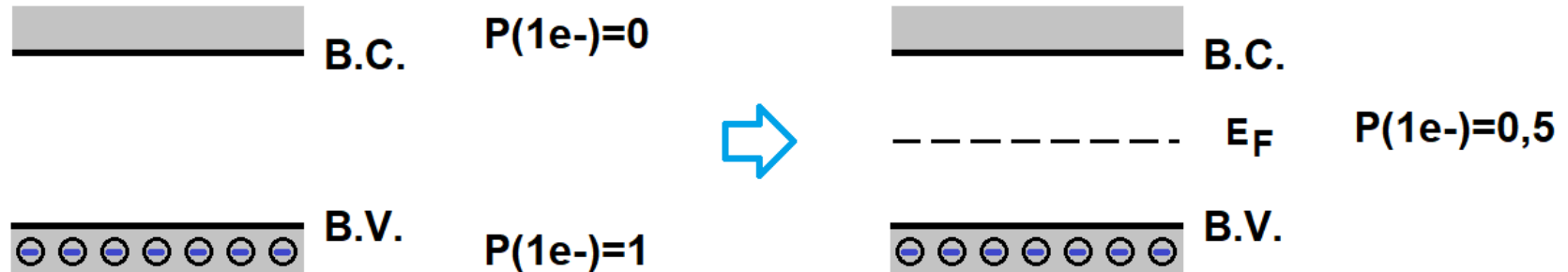
Semiconductor intrínseco



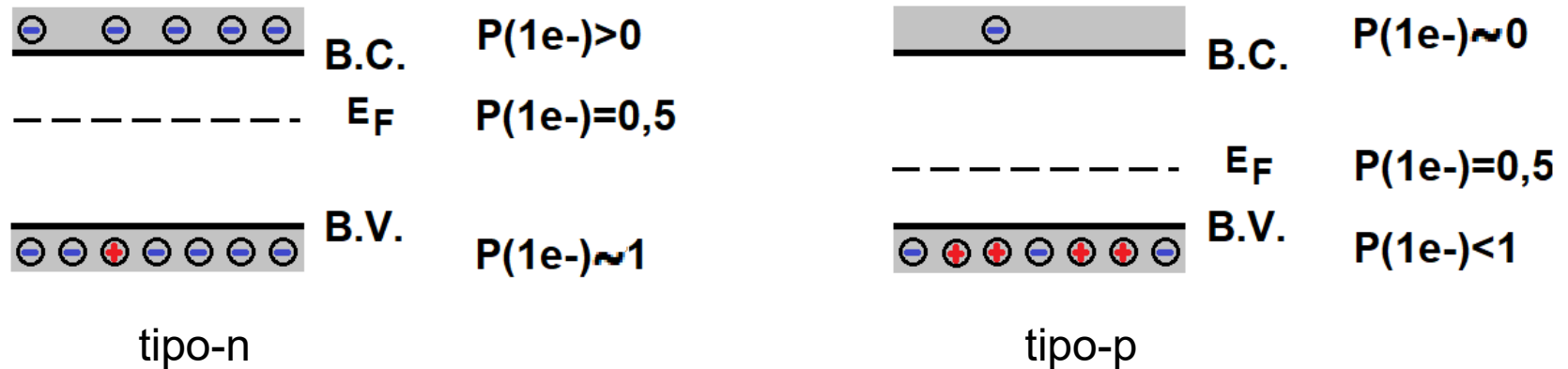
Semiconductores extrínsecos (T amb.)

- Diagramas de energía en semiconductores. Nivel de Fermi**

Energía de Fermi: aquella a la que la probabilidad de encontrar un e^- es de 0,5



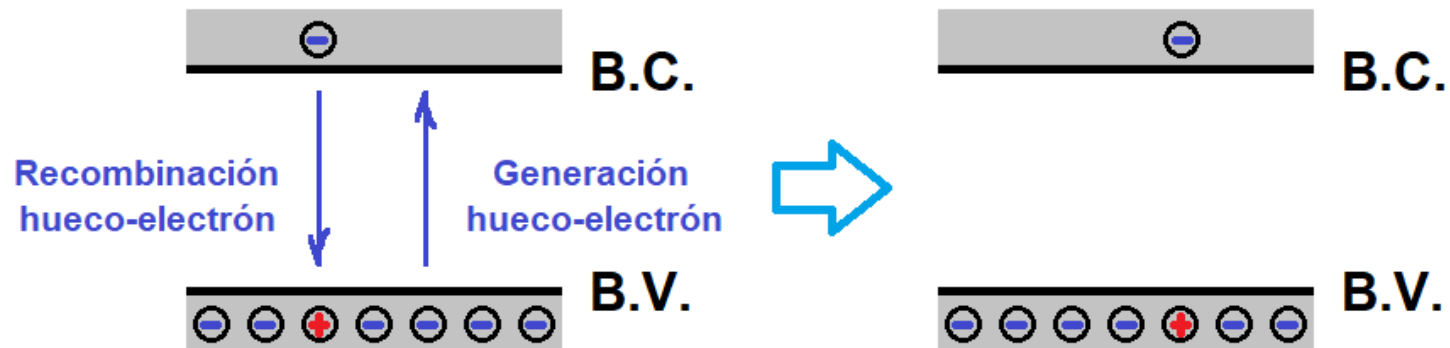
Semiconductor intrínseco ($T \sim 0$)



Semiconductores extrínsecos ($T \text{ amb.}$)

- **Interacción entre electrones y huecos**

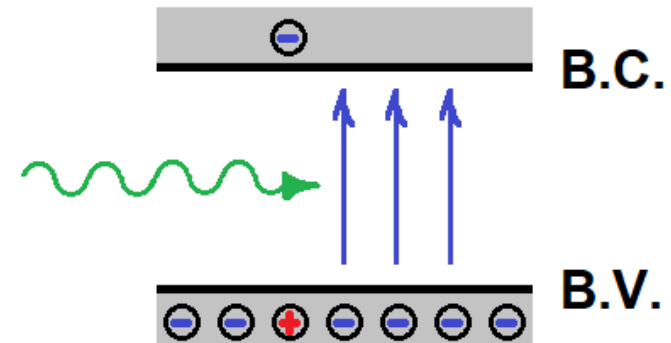
- **Generación**: creación de huecos y electrones de conducción
- **Recombinación**: combinación (aniquilación) de huecos con electrones de conducción



- Son procesos continuos y simultáneos, de carácter aleatorio
- La concentración de electrones de conducción y huecos se mantiene constante en el tiempo, siempre que la temperatura no cambie

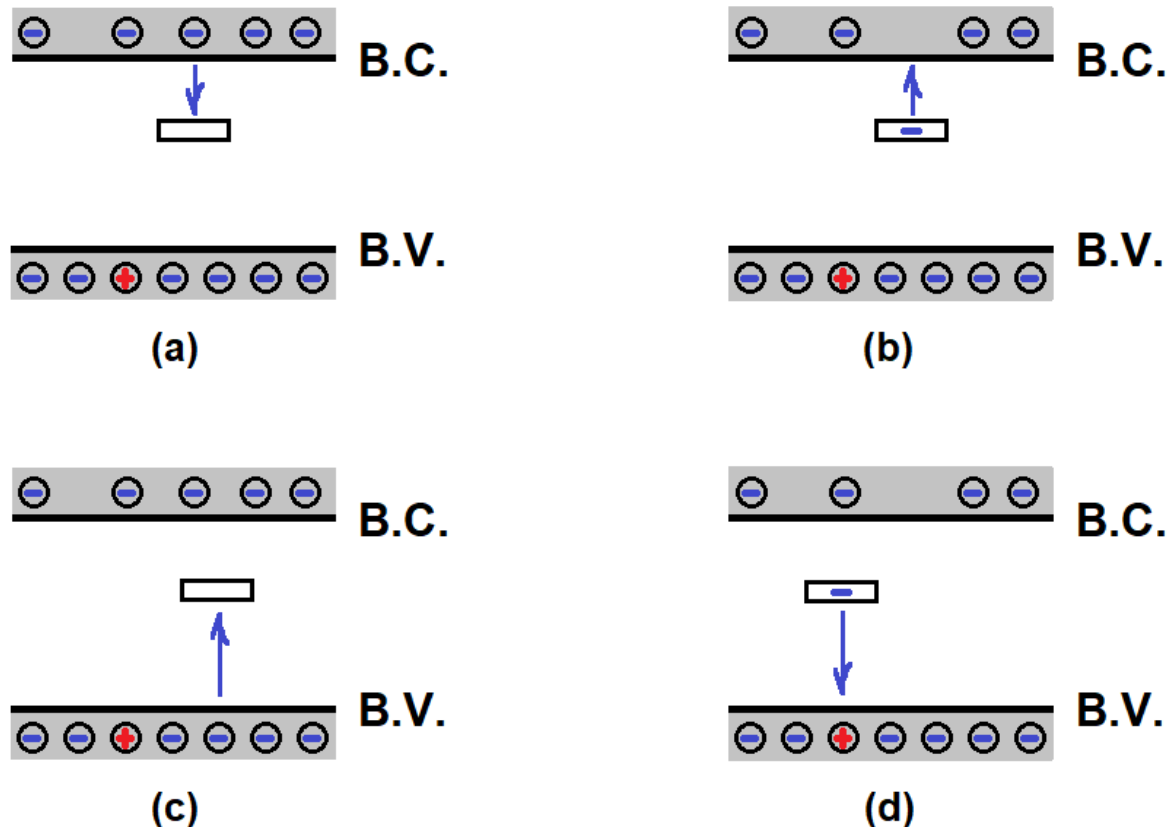
Algunos procesos que alteran el equilibrio:

- *Fotones*: exceso de creación de pares h-e
- *Calentamiento térmico*



- Otros procesos de generación y recombinación con niveles intermedios**

- Los defectos y las impurezas introducen estados de E permitidos en el gap
- Algunos procesos de generación y recombinación involucran a estos estados:



- (a) Captura de un e- de conducción por una trampa inicialmente neutra
(b) Emisión de un e- a la B.C. por una trampa inicialmente cargada (ej.: impureza donante)
(c) Captura de un e- de la B.V. por una trampa inicialmente neutra (ej.: impureza aceptora)
(d) Emisión de un e- a la B.V. por una trampa inicialmente cargada

TEMA 3: FÍSICA DE SEMICONDUCTORES

- **Algunas conclusiones importantes:**

- ♣ Un semiconductor intrínseco como el Silicio (5×10^{22} átomos/cm³) presenta a temp. ambiente unos 10^{10} e- de conducción/cm³, muy inferior a la de un metal ($\sim 10^{22}$ e-/cm³)
- ♣ Si el semiconductor se dopa con 1 impureza donante/ 10^6 átomos de Si, a temperatura ambiente presentará $\sim 10^{22}/10^6 = 10^{16}$ e- en la banda de conducción (portadores mayoritarios) y seguirá siendo neutro
- ♣ Si el semiconductor se dopa con 1 impureza aceptora/ 10^6 átomos de Si, a temperatura ambiente presentará $\sim 10^{22}/10^6 = 10^{16}$ huecos de e- en la banda de valencia (portadores mayoritarios) y seguirá siendo neutro
- ♣ La energía de Fermi es un indicador del desbalance entre electrones y huecos en un semiconductor
- ♣ Continuamente electrones y huecos se están recombinando y generando, aunque la concentración de electrones y huecos en el equilibrio no cambie en el tiempo
- ♣ Pueden aniquilarse o generarse electrones en la B.C. por efecto de los niveles de trampas o de impurezas. Pueden aniquilarse o generarse huecos en la B.V. por efecto de los niveles de trampas o de impurezas