

Electrónica de Estado Sólido

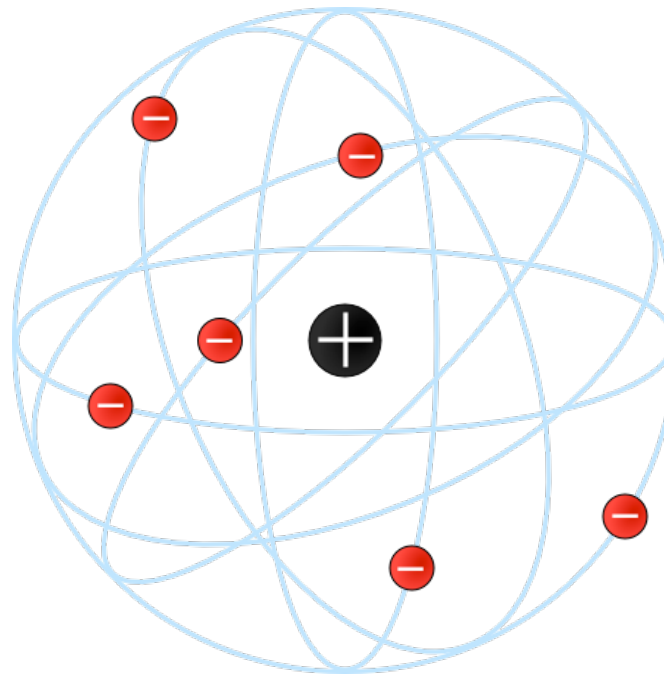
Tema 4

Contenidos

- ① Introducción
- ② Teoría de bandas
- ③ Electrones y huecos
- ④ Generación y recombinación
- ⑤ Tipos de semiconductores
- ⑥ Corriente en semiconductores

Modelo atómico de Rutherford

Los electrones, de carga negativa, orbitan entorno a un núcleo donde se concentra la carga positiva del átomo, siguiendo un modelo similar al gravitacional (e.g., el sistema solar) (Ernest Rutherford, 1911)



Pero...

- A. ¿Cómo se mantienen unidas todas las cargas positivas del núcleo?
- B. Según la electrodinámica clásica, una partícula con carga, acelerada perderá energía ¿Por qué no acaban colapsando los electrones sobre el núcleo?

(c) David López Vilariño, USC

Pero...

- A. ¿Cómo se mantienen unidas todas las cargas positivas del núcleo?
- B. Según la electrodinámica clásica, una partícula con carga, acelerada perderá energía ¿Por qué no acaban colapsando los electrones sobre el núcleo?

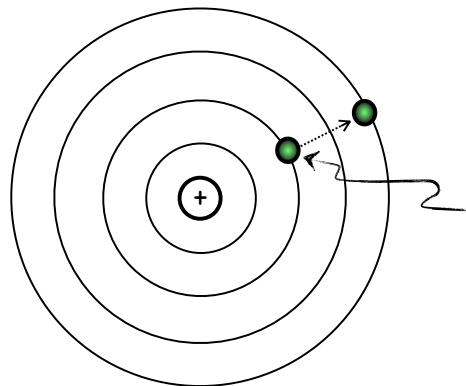
Solución

- A. Fuerza nuclear fuerte
- B. Modelo atómico de Bohr

Modelo atómico de Bohr

Los electrones giran alrededor del núcleo (como en el modelo de Rutherford) pero sólo en un número determinado de órbitas.

Un electrón puede pasar de una órbita a otra cediendo o ganando energía (en forma de luz) (Niels Bohr, 1913)



¿Qué tipo de luz se emite/absorbe?

¿Qué órbitas son posibles?

¿Qué tipo de luz se emite/absorbe?

La luz resultante tiene una frecuencia determinada según la siguiente ecuación:

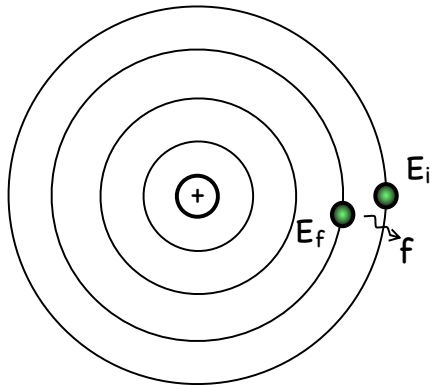
$$hf = E_i - E_f$$

$E_i > E_f$ se emite luz

$E_i < E_f$ se absorbe luz

$h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$: constante de Planck (Max Planck, 1900)

f : frecuencia de la luz



Definición de "luz":

1. (Visión "clásica") Onda electromagnética de frecuencia f (James Clerk Maxwell, 1861)
2. (Visión "cuántica") conjunto de "partículas" o cuantos, llamados fotones, cada uno con una energía $E = hf$ (Albert Einstein, 1905)

¿Qué órbitas son posibles?

Para explicarlo necesitamos adentrarnos en la física cuántica:

Principio de incertidumbre de Heisenberg

Es imposible conocer al mismo tiempo y con exactitud la velocidad de una partícula y su localización. En concreto, estamos limitados por la siguiente expresión: (Werner Heisenberg, 1925)

$$\Delta x \cdot \Delta p = \frac{h}{2\pi}$$

$h=6,6 \times 10^{-34}$ J: constante de Planck

Δx : Incertidumbre en la posición

Δp : Incertidumbre en la cantidad de movimiento

Dualidad onda-partícula de De Broglie

Toda materia presenta características de las ondas como de las partículas en función del experimento (Louis Victor De Broglie, 1924)

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

λ : Longitud de onda

mv : masa y velocidad de la partícula

Ecuación de Schrödinger

Permite asociar la energía de un electrón con la función de probabilidad de su localización (función de onda) (Erwin Schrödinger, 1925)

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi(\vec{r},t) + V(\vec{r})\psi(\vec{r},t) = i\hbar\frac{\partial\psi(\vec{r},t)}{\partial t}$$

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$
 m : masa del electrón
 V : potencial electrostático

- 🌀 Las soluciones $\Psi(x,y,z,t)$ de la ecuación de Schrödinger se denominan orbitales
- 🌀 $|\Psi|^2$ representa la probabilidad de encontrar a un electrón en un punto del espacio
- 🌀 Cada orbital está caracterizado por cuatro números, que indican los estados energéticos permitidos para los electrones que giran entorno al núcleo del átomo

Números cuánticos

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$l = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

$$m = -l, \dots, -1, 0, 1, \dots, l$$

$$s = \pm 1/2$$

Números cuánticos

Número cuántico principal (n): Describe el tamaño del orbital. Cuanto mayor sea n mayor es el orbital

Puede tomar cualquier valor entero empezando en $n=1$

Número cuántico secundario o del momento angular (l): Describe la forma del orbital

Toma valores enteros desde 0 hasta $n-1$ (n es el número cuántico principal)

Por ejemplo, $n=3 \Rightarrow l=0,1,2$

Número cuántico magnético (m): Describe orientación espacial del orbital

Toma valores enteros desde $-l$ hasta l (l es el número cuántico secundario)

Por ejemplo, $l=3 \Rightarrow m=-3,-2,-1,0,1,2,3$

Número cuántico de spin (s): Se asocia a la dirección de giro de los electrones

Solo toma valores $+1/2$ o $-1/2$, para cada orbital

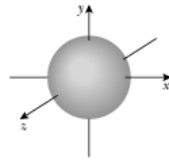
Principio de exclusión de Pauli

No puede haber dos electrones con sus cuatro número cuánticos idénticos. (Wolfgang Erns Pauli, 1925)

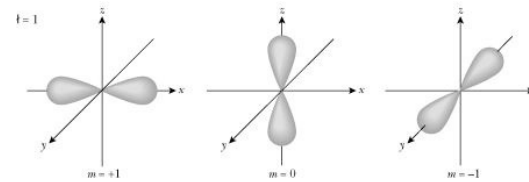
Números cuánticos

Por ejemplo con $n=4$, tenemos:

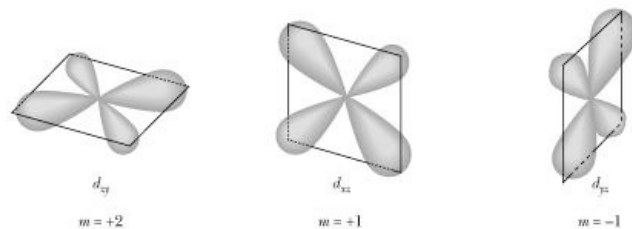
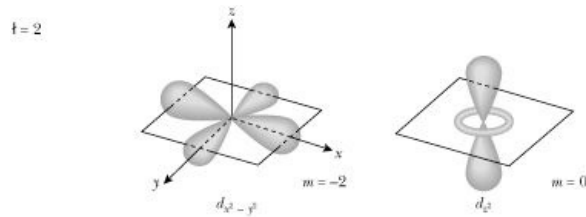
$l=0, m=0$ (orbitales s)



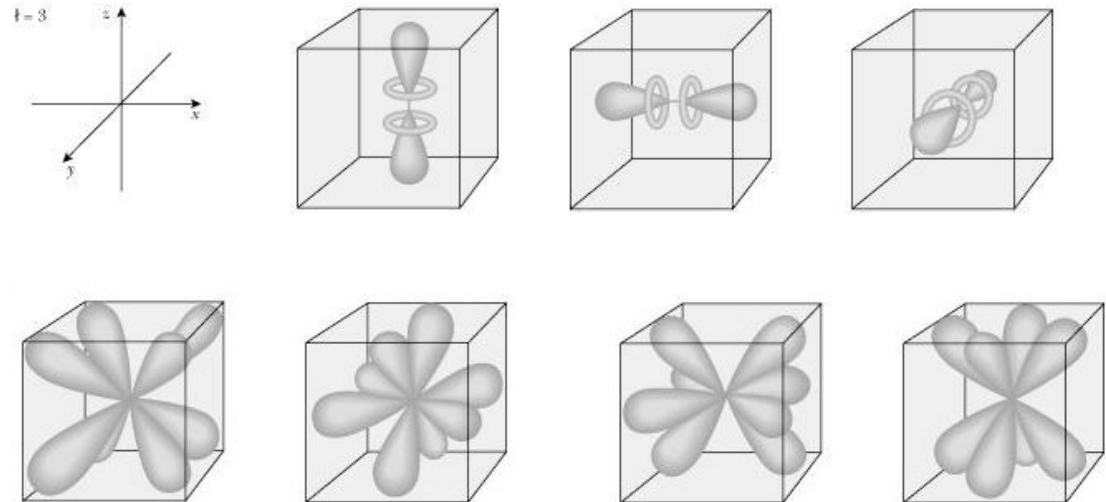
$l=1, m=-1,0,1$ (orbitales p)



$l=2, m=-2,-1,0,1,2$ (orbitales d)



$l=3, m=-3,-2,-1,0,1,2,3$ (orbitales f)

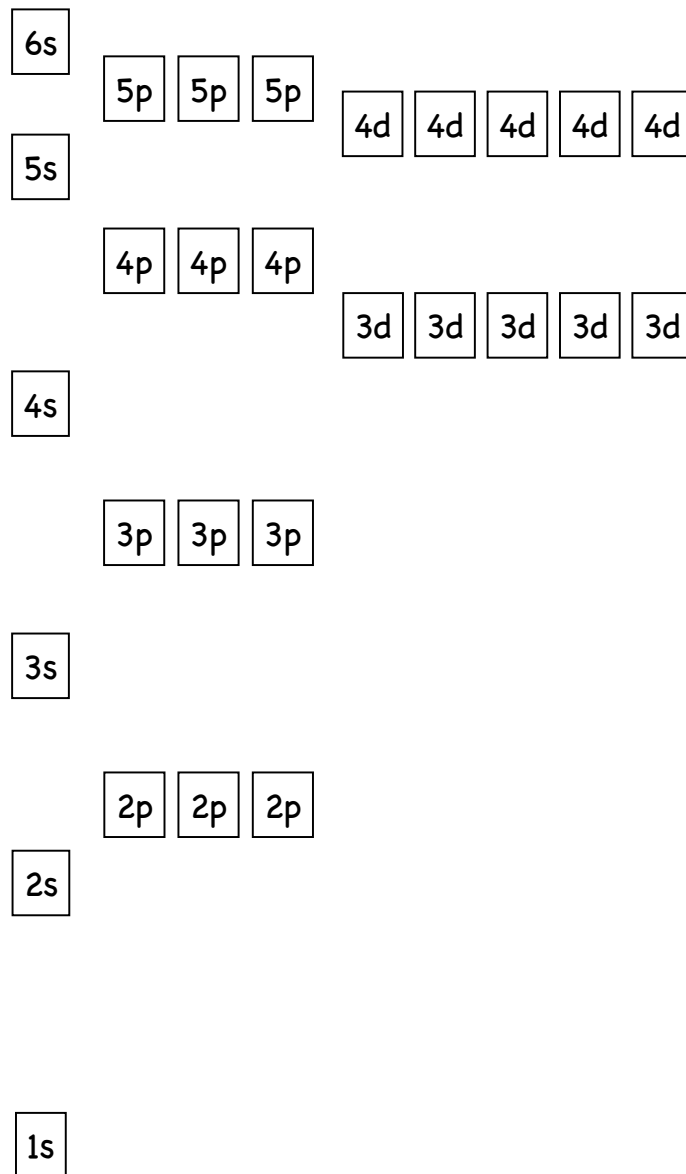


Las energías de las subcapas con el mismo número cuántico son similares

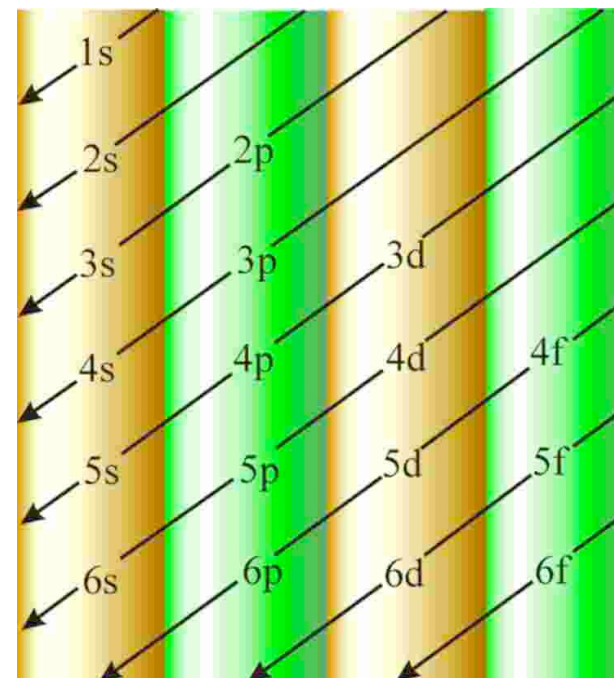
Por ejemplo, con $l=2$ las 5 subcapas tipo d (llamadas 2d) presentan el mismo nivel energético, aproximadamente

(c) David López Vilariño, USC

E ↑



4f 4f 4f 4f 4f 4f 4f



Distribución de orbitales de algunos elementos de interés

Número atómico	Elemento	Orbitales
1	H	1s ¹
2	He	1s ²
3	Li	1s ² 2s ¹
5	B	1s ² 2s ² 2p ¹
6	C	1s ² 2s ² 2p ²
7	N	1s ² 2s ² 2p ³
8	O	1s ² 2s ² 2p ⁴
9	F	1s ² 2s ² 2p ⁵
10	Ne	1s ² 2s ² 2p ⁶
11	Na	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ¹
13	Al	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ¹
14	Si	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ²
15	P	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ³
16	S	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁴
17	Cl	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁵
18	Ar	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶
19	K	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 4s ¹
20	Ca	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 4s ²
21	Sc	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 3d ¹ 4s ²
28	Ni	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 3d ⁸ 4s ²
31	Ga	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹
32	Ge	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 3d ¹⁰ 4s ² 4p ²
33	As	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³

La tendencia natural de los elementos químicos es completar su capa de exterior. Esto se da en los denominados gases nobles. El resto tenderán a asociarse para completar su última capa

Enlace iónico:

En este tipo de enlace, uno de los elementos cede sus electrones en la última capa, que los recoge otro para completar a su vez su última capa

Por ejemplo. El sodio (Na) cede un electrón al cloro (Cl), quedando de este modo formados los iones positivos Na^+ y los iones negativos Cl^- que se unen para constituir el compuesto NaCl

Enlace covalente:

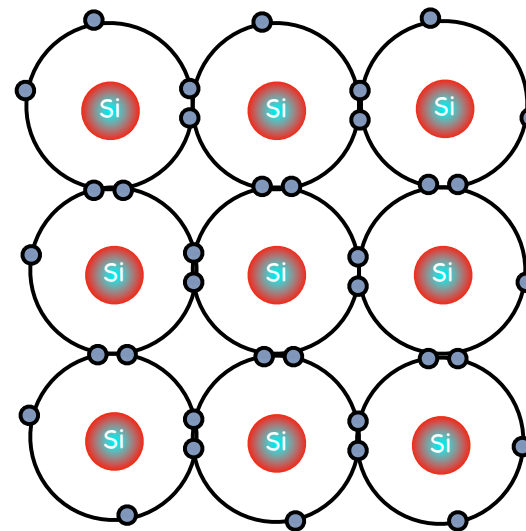
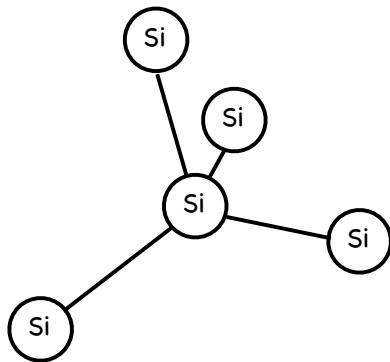
A diferencia de lo que ocurre con el enlace iónico, en el enlace de tipo covalente, los elementos en cuestión, comparten electrones para completar sus capas externas

Por ejemplo. Un átomo de cloro (Cl) necesita un electrón más para completar su última capa. Si se enlaza con otro átomo de cloro compartiendo un electrón cada uno, pueden completar sus respectivas capas (compuesto Cl_2)

En el caso del silicio ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$)

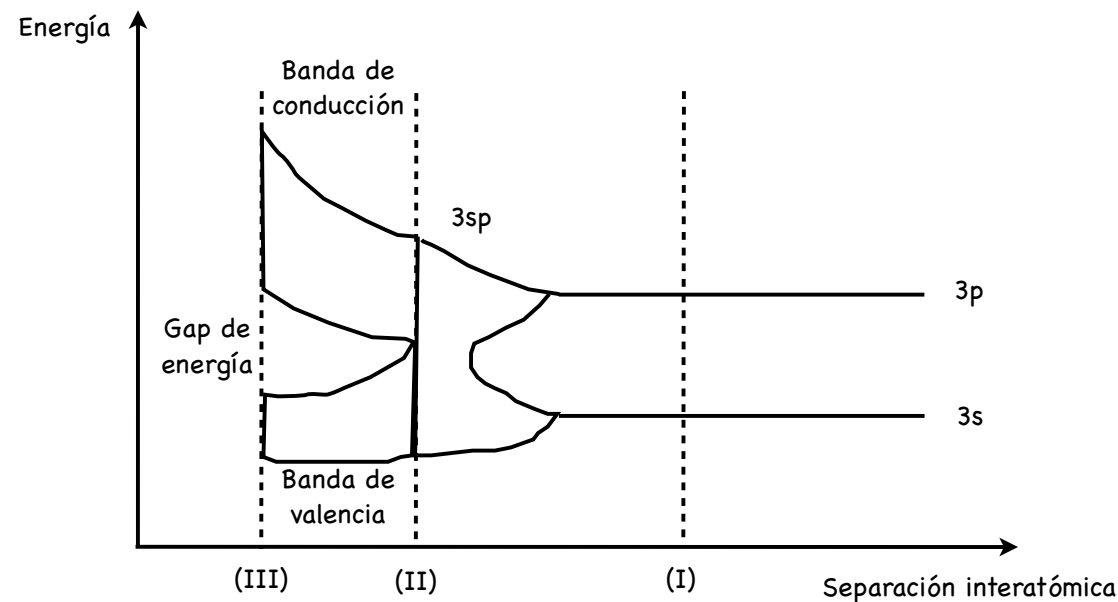
El silicio presenta dos electrones en su última capa. Necesita 4 más para completar dicha capa

Solución: Compartir sus cuatro electrones externos (los dos en 3s y los dos en 3p) con otros cuatro átomos de silicio



Teoría de bandas

- (I) Si los átomos de silicio están alejados, la estructura de bandas no se ve afectada
- (II) Al aproximarse los átomos, la estructura de bandas se deforma, dando lugar a niveles híbridos 3sp
- (III) Cuando los átomos alcanzan su posición estable dentro de la red, las nuevas bandas se separan, dando lugar a dos nuevas:
- Banda de valencia: Aloja a los electrones del enlace
 - Banda de conducción: Disociación de la banda original, que se extiende por toda la red

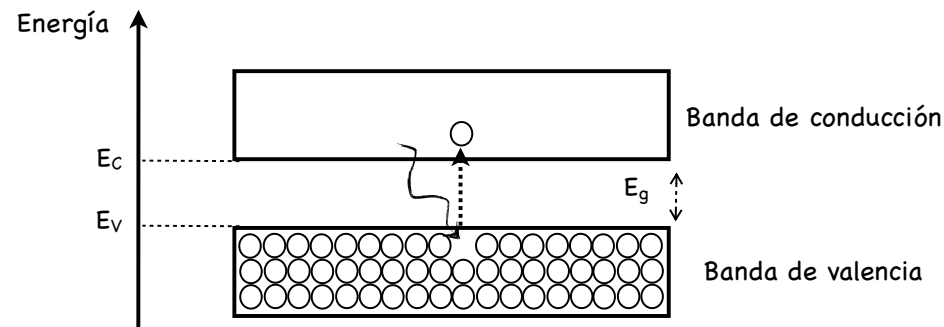


Teoría de bandas

Tanto la banda de conducción como la banda de valencia se extienden por todo el material resultante de los enlaces

Los electrones se alojan inicialmente en las bandas de menor energía (banda de valencia)

Los electrones pueden 'saltar' a la banda de conducción si reciben un aporte de energía superior al de la banda prohibida (el 'gap' de energías)



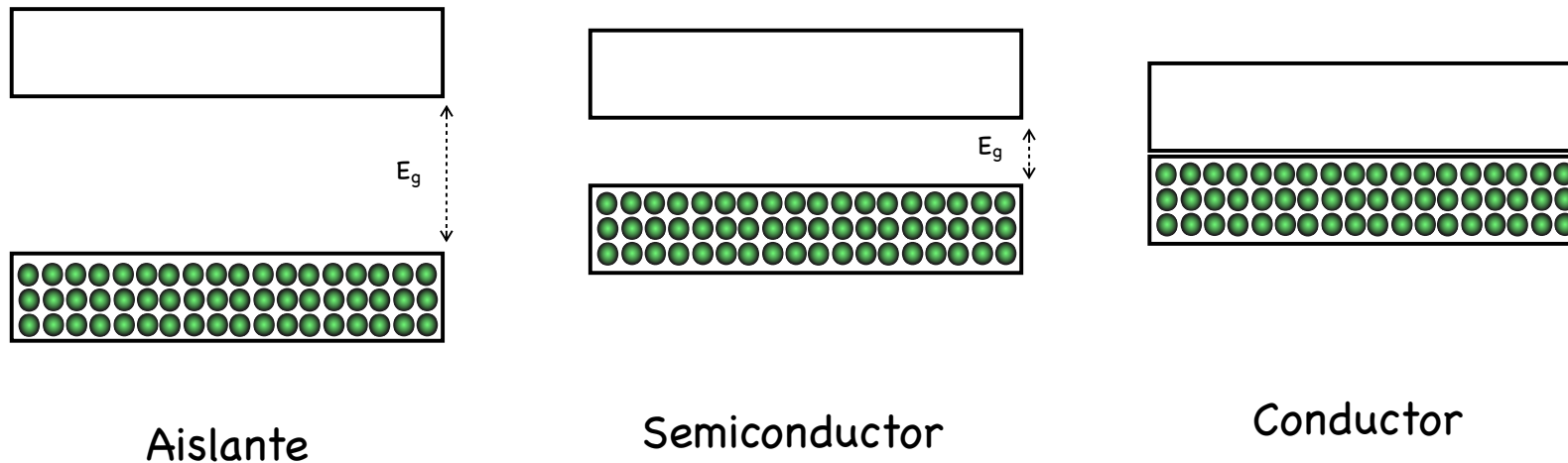
Una vez que un electrón salta a la banda de conducción se podrá mover libremente por el material, en presencia de un campo eléctrico (o potencial) \Rightarrow corriente eléctrica

Si el material tiene todos sus estados energéticos de la banda de valencia ocupados y la banda de conducción vacía, no conducirá corriente

Si además, el gap de energías entre bandas es elevado (5eV o más), se tratará de un material aislante

Si el gap de energías entre bandas es pequeño o incluso nulo, los electrones podrán saltar a la banda de conducción fácilmente. Se tratará de un material conductor

Si el gap de energías entre bandas es alrededor de 1eV, los electrones podrán pasar a la banda de conducción con aportes energéticos pequeños. Se tratará de un material semiconductor

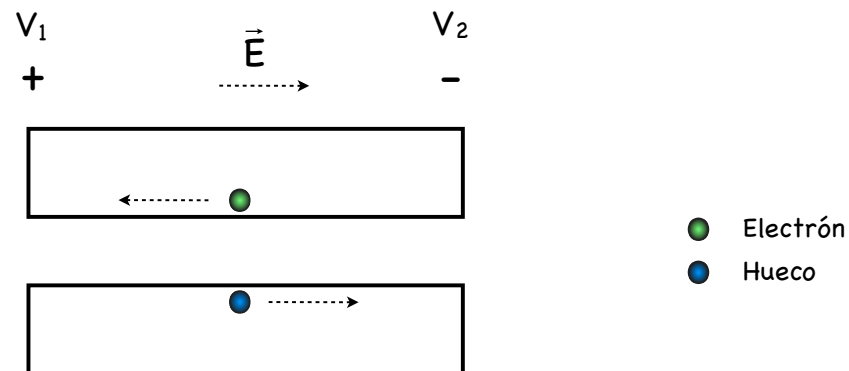


Electrones y huecos

Si un electrón pasa de la banda de valencia a la banda de conducción, dejará en ésta un 'hueco'. Esta ausencia de carga negativa se puede ver como un aporte de carga positiva

Por lo tanto tendremos dos tipos de portadores de carga:

- Portadores de carga negativa, electrones (e^-)
- Portadores de carga positiva, huecos (h^+)



Generación y recombinación

Generación: es el proceso por el cual un electrón situado en la banda de valencia, absorbe energía suficiente para superar el 'gap' de energías y alcanzar la banda de conducción

- En el proceso de generación se produce un hueco en la banda de valencia en el estado abandonado por el electrón

- Las fuentes principales de generación de carga son:

Generación térmica: Originada por la agitación de la propia red cristalina

Fotogeneración: Originada por la transferencia de energía fotónica (luz)

Recombinación: Es el proceso por el cual un electrón y un hueco se aniquilan. Esto sucede cuando un electrón de la banda de conducción ocupa un estado libre en la banda de valencia, liberando el exceso de energía

- En el proceso de recombinación se elimina también un hueco en la banda de valencia al mismo tiempo que se elimina el electrón de la banda de conducción

- La energía liberada es en forma de:

Calor: absorbido por la propia red cristalina

Radiación: en forma de fotón de frecuencia $f=E/h$, donde 'E' representa la cantidad de energía liberada y 'h' la constante de Planck

Tipos de semiconductores

$$\begin{aligned} n_i &= 2 \cdot 10^6 \text{ e/cm}^3 \text{ (GaAs)} \\ n_i &= 10^{10} \text{ e/cm}^3 \text{ (Si)} \\ n_i &= 2 \cdot 10^{13} \text{ e/cm}^3 \text{ (Ge)} \end{aligned} \quad (\text{para } T=300\text{K})$$

Semiconductores intrínsecos: La concentración de electrones en la banda de conducción (n) y la de huecos en la banda de valencia (p) es la misma. $n=p=n_i$

- Los electrones de la banda de conducción y los huecos de la banda de valencia se producen por procesos de generación (principalmente térmica)
- Un semiconductor intrínseco se comporta como aislante a bajas temperaturas

Semiconductores extrínsecos: La concentración de electrones en la banda de conducción (n) y la de huecos en la banda de valencia (p) no es la misma. $n \neq p$

Sin embargo, se cumple siempre que

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

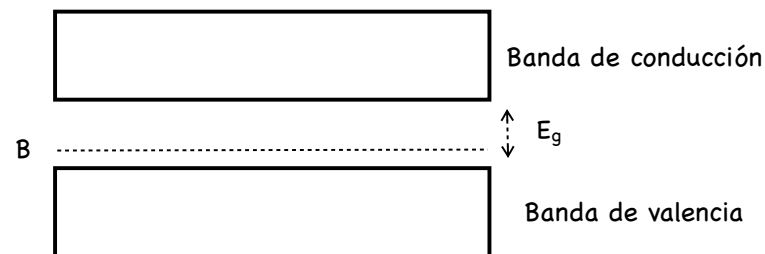
$n_i \equiv$ concentración intrínseca

Los semiconductores extrínsecos pueden ser de dos tipos:

- Semiconductor tipo P:** La concentración de portadores de carga positiva (huecos) es notablemente superior a la de portadores de carga negativa (electrones). $p \gg n$
- Semiconductor tipo N:** La concentración de portadores de carga negativa (electrones) es notablemente superior a la de portadores de carga positiva (huecos). $n \gg p$

Semiconductores tipo P

- Se introducen átomos con un electrón menos que los átomos del material semiconductor (por ejemplo el silicio). Un elemento habitual como impureza aceptadora es el boro (B)
- Esto origina estados energéticos en la banda de energías prohibidas
- Un electrón podría saltar a uno de esos estados energéticos producidos por el boro, quedando atrapado en el gap de energías
- Por lo tanto el electrón genera un hueco en la banda de valencia pero no alcanza la banda de conducción. Eso significa que la única contribución de carga es la del hueco



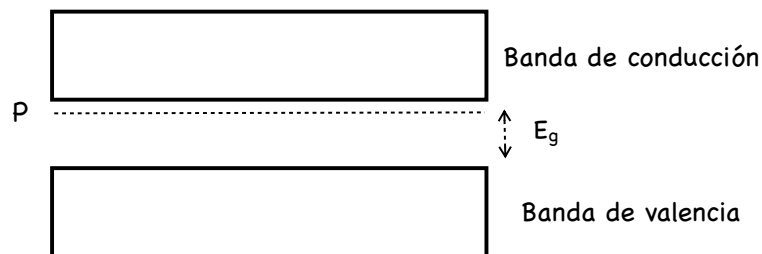
- Si N_A es la concentración de átomos aceptadoras, la concentración neta de huecos será $p \approx N_A$, y la de electrones: $n = n_i^2 / N_A$

Número atómico	Elemento	Orbitales
5	B	$1s^2 2s^2 2p^1$
14	Si	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
15	P	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
31	Ga	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^1$
32	Ge	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$
33	As	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^3$

- El enlace con el átomo de boro presenta una vacante que puede ser ocupada con un aporte pequeño de energía, dando lugar a una vacante en una enlace de silicio que se puede propagar por la red (hueco)

Semiconductores tipo N

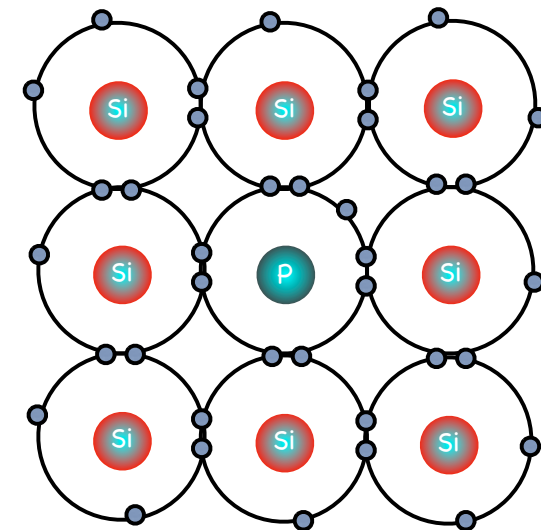
- Se introducen átomos con un electrón más que el elemento que constituye el semiconductor (de nuevo, consideraremos silicio). Un elemento habitual como impureza donadora es el fósforo (P)
- Esto origina estados energéticos en la banda de energías prohibidas
- El electrón adicional que proporciona el fósforo podría saltar a la banda de conducción con un pequeño aporte de energía
- Por lo tanto tendremos un electrón en la banda de conducción sin generar ningún hueco en la banda de valencia



- Si N_D es la concentración de átomos donadores, la concentración neta de electrones será $n \approx N_D$, y la de huecos: $p = n_i^2 / N_D$

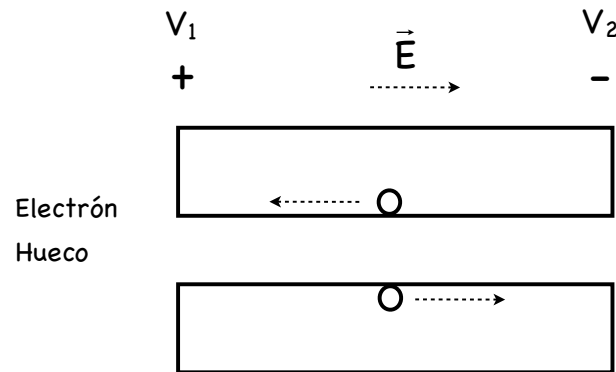
Número atómico	Elemento	Orbitales
5	B	$1s^2 2s^2 2p^1$
14	Si	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
15	P	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
31	Ga	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^1$
32	Ge	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$
33	As	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^3$

- El enlace con el átomo de fósforo combina cuatro de sus electrones más externos, dejando el quinto sin enlazar. Este electrón sobrante se puede mover por la red cristalina con total libertad



Corriente en semiconductores

Corriente de arrastre: Los portadores de carga negativa (electrones) y los portadores de carga positiva (huecos) se ven afectados por la presencia de un campo eléctrico o una diferencia de potencial, dando lugar a una corriente eléctrica (corriente de arrastre o de deriva)



Material	Gap de energías (eV)	Movilidad electrones ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	Movilidad de huecos ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)
Silicio (Si)	1,12	1350	480
Germanio (Ge)	0,67	3900	1900
Arseniuro de Galio (GaAs)	1,43	8500	400

Esta corriente eléctrica viene determinada por las siguientes expresiones:

$$J_n = \sigma_n E, \quad J_p = \sigma_p E$$

$\sigma_{n,p}$: conductividad de electrones y huecos

O expresado de otro modo:

$$J_n = qn\mu_n E, \quad J_p = qp\mu_p E$$

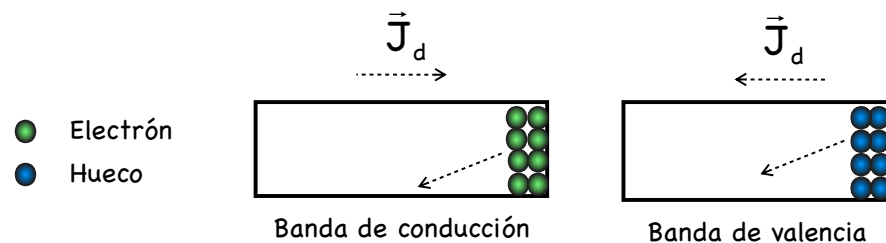
$\mu_{n,p}$: movilidad de electrones y huecos

n, p : concentración de electrones y huecos

Corriente en semiconductores

Corriente de difusión: Las partículas tienden a distribuirse como consecuencia de su movimiento errático de origen térmico, emigrando, a escala macroscópica, desde regiones de alta densidad, hacia regiones de baja concentración.

Este fenómeno de difusión afecta a todas las partículas, cargadas o no. Obviamente, los portadores de carga afectados por la difusión generarán corriente, que se denomina corriente de difusión



$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}, \quad J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

En el caso del silicio: $D_n=34 \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_p=12 \text{ cm}^2/\text{s}$

La corriente de huecos va en el sentido de disminución de la concentración.

La corriente de electrones va en sentido contrario

Relación de Einstein: $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$ $V_T = KT/q$: potencial térmico ($\approx 25\text{mV}$ @ 300K)