

Tema 7. Propiedades eléctricas de los materiales

1. Generalidades

- Portadores eléctricos y enlace atómico
- Teoría de bandas

2. Conductividad eléctrica

- Metales
- Aislantes (cerámicos) y polímeros
- Semiconductores

3. Aislantes y propiedades dieléctricas

- Aislamiento eléctrico
- Polarización y constante dieléctrica
- Piezoelectricidad y ferroelectricidad

Importancia de las propiedades eléctricas

- En materiales conductores, p.ej. metales (hilo de cobre), se precisa una alta conductividad eléctrica para transportar corriente eléctrica y energía sin pérdidas
- En materiales aislantes, p.ej. cerámicos o polímeros, se precisa una conductividad eléctrica muy baja (dielectricidad) para impedir la ruptura dieléctrica del material y los arcos eléctricos entre conductores
- En materiales semiconductores:
 - P.ej.: dispositivos fotoeléctricos. Se necesita optimizar sus propiedades eléctricas para que con ellos se puedan fabricar fuentes prácticas y eficientes de energías alternativas
 - P. ej. Transistores, circuitos lógicos, etc...El estudio y posterior mejora de sus propiedades eléctricas permite la fabricación de “chips” y ordenadores más rápidos y pequeños.

Los portadores eléctricos y el enlace atómico (I)

- La carga eléctrica (y su movimiento) es la responsable de las propiedades eléctricas de un material
- Tipos de cargas eléctricas móviles en un material: electrones, huecos (espacios dejados por los electrones) e iones
- Tipos de enlaces según los materiales:
 - Metálico: los electrones están compartidos por todos los núcleos atómicos del material (nube electrónica). Facilidad de movimiento.
 - Covalente: los electrones están compartidos por un par de átomos. Alto grado de localización electrónica y gran dificultad de movimiento por el material.
 - Iónico: iones positivos y negativos forman el material mediante fuertes interacciones electrostáticas, por tanto, los electrones tienen una gran dificultad de movimiento por el material.

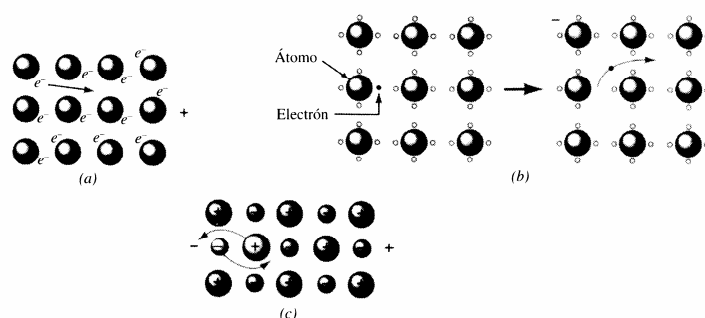
05/01/2005

Generalidades

3

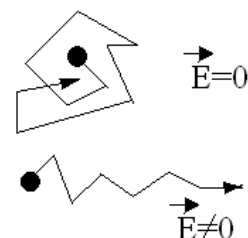
Los portadores eléctricos y el enlace atómico (II)

Movimiento de la carga eléctrica (según el tipo de enlace atómico)



Movimiento de la carga eléctrica en el interior de un material (modelo microscópico)

- En ausencia de un campo eléctrico externo: movimiento aleatorio (colisiones con el entorno) sin dirección espacial preferente $\langle \vec{v} \rangle = 0$
- En presencia de un campo eléctrico externo, E : la carga eléctrica se desplaza por el material por medio de colisiones con el entorno y en una dirección resultante paralela a E
 $\langle \vec{v} \rangle \neq 0$ $I \neq 0$ corriente eléctrica



05/01/2005

Generalidades

4

Modelo microscópico de la conducción eléctrica (I)

1. En su movimiento por el material, las cargas eléctricas colisionan con su entorno:
 - Red de núcleos atómicos y sus vibraciones (dependientes de la temperatura)
 - Imperfecciones de la red de núcleos: defectos puntuales (impurezas, vacantes), defectos de línea (dislocaciones) y defectos de superficie (fronteras de grano, límites de la muestra, maclas,...)
 - Resto de las cargas eléctricas
 -
2. Las colisiones se *resisten* al movimiento libre de la carga eléctrica y limitan su velocidad hasta cierto valor máximo, v_m
3. El tipo y número de colisiones depende, por tanto, de la estructura cristalina del material y de la temperatura. Propiedad intrínseca del material, *resistividad* eléctrica, ρ .

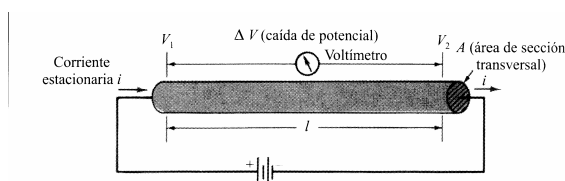
05/01/2005

Generalidades

5

Modelo microscópico de la conducción eléctrica (II)

1. Para un material de longitud l , sección A y resistividad eléctrica ρ , la resistencia eléctrica total que ofrece al movimiento de la corriente eléctrica es R
2. En cada colisión las cargas eléctricas pierden cierta energía cinética que debemos reponer si queremos mantener una corriente eléctrica constante, I . La energía necesaria para cada carga es ΔV (ley de Ohm):
3. La energía perdida por toda la corriente eléctrica I en un tiempo t se transfiere al material cuya temperatura se eleva y comienza a irradiar calor (efecto Joule)



$$\begin{aligned} 1) \quad R &= \rho \frac{l}{A} \\ 2) \quad \Delta V &= IR \\ 3) \quad E &= RI^2t \end{aligned}$$

05/01/2005

Generalidades

6

Modelo microscópico de la conducción eléctrica (III)

- Algunos parámetros útiles:

- Conductividad eléctrica, $\sigma = 1/\rho$
- La densidad de corriente eléctrica por unidad de área: $J = nqv_m$, o bien, $J = \sigma E$
- La movilidad de los portadores, $\mu = v_m/E$, o bien, $\mu = \sigma/nq$

Sin embargo, este modelo no explica las diferencias entre las propiedades eléctricas de los distintos metales (p.ej.)

→ **TEORÍA DE BANDAS**

Material	Estructura electrónica	Conductividad ($\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)
Metales alcalinos:		
Na	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$	$2,13 \times 10^5$
K	$\dots\dots\dots 3s^2 3p^6 4s^1$	$1,64 \times 10^5$
Metales alcalinoferrrosos:		
Mg	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$	$2,25 \times 10^5$
Ca	$\dots\dots\dots 3s^2 3p^6 4s^2$	$3,16 \times 10^5$
Metales del grupo IIIA:		
Al	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$	$3,77 \times 10^5$
Ga	$\dots\dots\dots 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^1$	$0,66 \times 10^5$
Metales de transición:		
Fe	$\dots\dots\dots 3d^6 4s^2$	$1,00 \times 10^5$
Ni	$\dots\dots\dots 3d^8 4s^2$	$1,46 \times 10^5$
Metales de grupo IB:		
Cu	$\dots\dots\dots 3d^{10} 4s^1$	$5,98 \times 10^5$
Ag	$\dots\dots\dots 4d^{10} 5s^1$	$6,80 \times 10^5$
Au	$\dots\dots\dots 5d^{10} 6s^1$	$4,26 \times 10^5$
Materiales del grupo IV:		
C (diamante)	$1s^2 2s^2 2p^2$	$< 10^{-18}$
Si	$\dots\dots 3s^2 3p^2$	5×10^{-6}
Ge	$\dots\dots 3d^{10} 4s^2 4p^2$	0,02
Sn	$\dots\dots 4d^{10} 5s^2 5p^2$	$0,9 \times 10^5$
Polímeros:		
Polietileno		10^{-15}
Politetrafluoroetileno		10^{-18}
Poliestireno		10^{-17} a 10^{-19}
Epoxi		10^{-12} a 10^{-17}
Materiales cerámicos:		
Alúmina (Al_2O_3)		10^{-14}
Vidrio de sílice		10^{-17}
Nitruro de boro (BN)		10^{-13}
Carburo de silicio (SiC)		10^{-1} a 10^{-2}
Carburo de boro (B_4C)		1 a 2

Teoría de bandas en la conducción eléctrica (I)

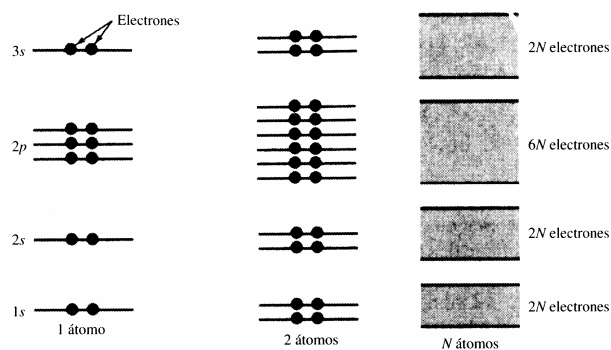
Niveles electrónicos en un átomo aislado

- Orbitales s, p, d, f: niveles de energía discretos y números cuánticos
- Ocupación de los orbitales: Principio de exclusión de Pauli (dos electrones en cada distinto nivel de energía)

Niveles electrónicos en un sólido

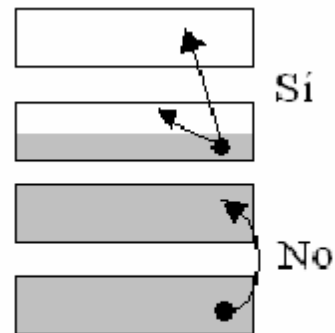
(unión de N átomos, donde N es del orden de 10^{23})

- Necesidad de superponer N orbitales s, N orbitales p, N orbitales d...
- Ocupación de los N orbitales: Principio de exclusión de Pauli (dos electrones en cada distinto nivel de energía).
- Los orbitales de cada átomo deben, por tanto, diferenciarse levemente de los de otro átomo para que el sólido pueda contener los 2N electrones
- Ensanchamiento de los orbitales en una banda (o rango de energías)



Teoría de bandas en la conducción eléctrica (II)

- Los electrones del sólido rellenan progresivamente las bandas de menor a mayor energía.
- Las bandas internas llenas **NO** colaboran al transporte de carga eléctrica pues no hay posibilidad de excitar un electrón a otro nivel vacío.
- La banda externa o última **SÍ** puede colaborar a las propiedades eléctricas del material:
 - Banda externa llena: los electrones pueden ser excitados a otra banda superior (necesariamente vacía)
 - Banda externa no llena: los electrones pueden ser excitados a niveles energéticos superiores (vacíos) de la misma banda o a otra banda superior (necesariamente vacía)



05/01/2005

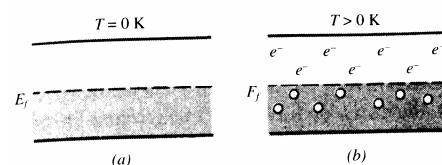
Generalidades

9

Teoría de bandas en la conducción eléctrica (III)

- La última banda de orbitales electrónicos de un sólido que contenga electrones se denomina *banda de valencia*
- La primera banda de orbitales electrónicos de un sólido que contenga niveles de energía vacíos (no ocupados) se denomina *banda de conducción*
- La energía del último nivel energético ocupado a $T=0$ K se denomina *energía de Fermi*
- Conducción eléctrica de carga: un aporte de energía adicional excita a los electrones de la banda de valencia hasta los niveles de la banda de conducción:

- La carga eléctrica podrá ser transportada por dichos electrones de la banda de conducción o por los huecos dejados en la banda de valencia (corriente eléctrica de electrones o huecos)
- La fuente de energía adicional puede ser la excitación térmica o la aplicación de un potencial eléctrico externo



05/01/2005

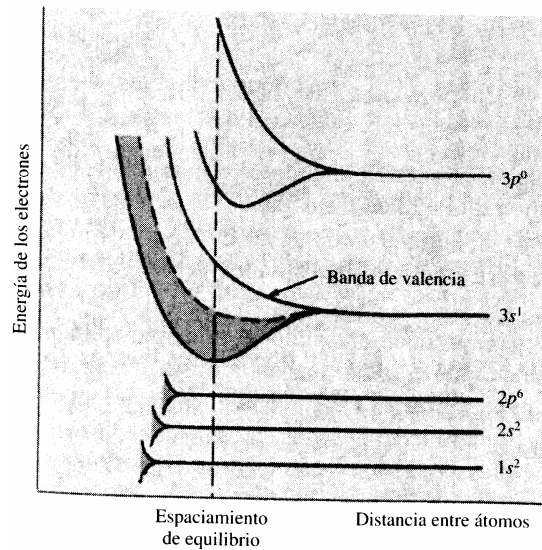
Generalidades

10

La conductividad eléctrica en los metales (I)

Estructura de bandas de los metales de la columna IA (tabla periódica), p.ej. el sodio

- En el caso del sodio, $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
- La última banda s está semillena (banda de valencia) y muy lejos de la siguiente banda p. Existe entre ellas una gran diferencia energética: *gap* de energía
- Sin embargo, los electrones (3s) son excitados muy fácilmente **dentro** de la misma banda a los niveles vacíos.
- La banda 3s es, simultáneamente, la banda de valencia y de conducción
- Alta conductividad eléctrica



05/01/2005

La conductividad eléctrica en los metales

11

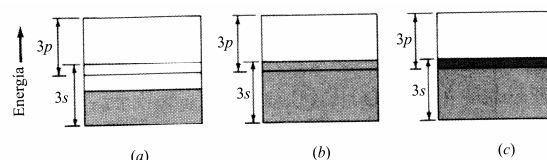
La conductividad eléctrica en los metales (II)

Estructura de bandas de los metales de la columna IIA (tabla periódica), p.ej. el magnesio

- En el caso del Magnesio, $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^0$
- La última banda s está llena y se solapa con la última banda p vacía (bandas de valencia y conducción mezcladas).
- Los electrones (3s) son excitados muy fácilmente a niveles vacíos superiores y muy cercanos (3p). Alta conductividad eléctrica

Estructura de bandas de los metales de la columna IIIA (tabla periódica), p.ej. el aluminio

- En el caso del Magnesio, $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
- La última banda s está llena y se solapa con la última banda p semillena (bandas de valencia y conducción mezcladas).
- Los electrones (3s y 3p) son excitados muy fácilmente a niveles vacíos superiores y muy cercanos (3p). Alta conductividad eléctrica.



05/01/2005

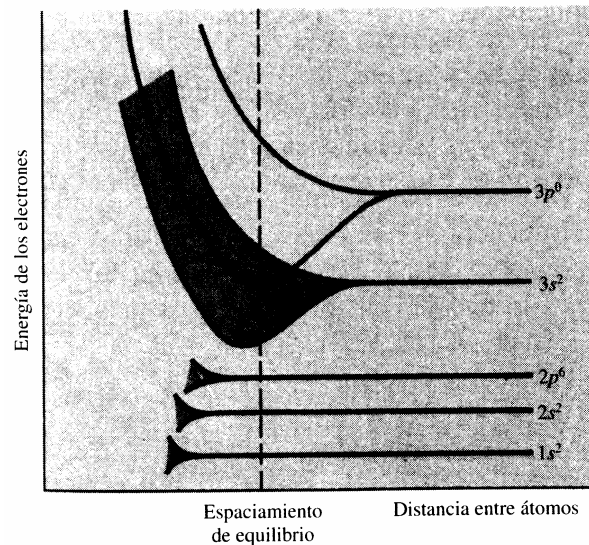
La conductividad eléctrica en los metales

12

La conductividad eléctrica en los metales (III)

Estructura de bandas de los metales de transición

- Columnas IIIB hasta VIIIB, (p.ej. desde el Sc hasta el Ni):
 - Banda d parcialmente ocupada
 - Solapamiento d-s
 - Interacciones magnéticas que dificultan la conductividad eléctrica (orbitales f)
- Columna IB: Cu, Ag y Au
 - Banda d llena: electrones d fuertemente ligados al núcleo
 - Banda s semillena: electrones s débilmente ligados al núcleo
 - No hay solapamiento d-s. LA conducción (alta) se debe a los electrones s.



05/01/2005

La conductividad eléctrica en los metales

13

La conductividad eléctrica en un metal con defectos

En un metal puro la conductividad eléctrica está determinada por su estructura de bandas. El valor de σ depende del número de portadores y de la movilidad de los mismos, μ .

El valor de μ depende a su vez de la velocidad de desplazamiento de las cargas eléctricas dentro del material.

En un metal real (con defectos) la movilidad y velocidad de las cargas eléctricas depende críticamente del número y tipo de defectos estructurales.

A mayor número de defectos, menor distancia entre colisiones, menor movilidad y menor conductividad eléctrica.

Factores que afectan a la conductividad eléctrica:

- La temperatura
- Las imperfecciones de la red cristalina
- El procesamiento y endurecimiento del material

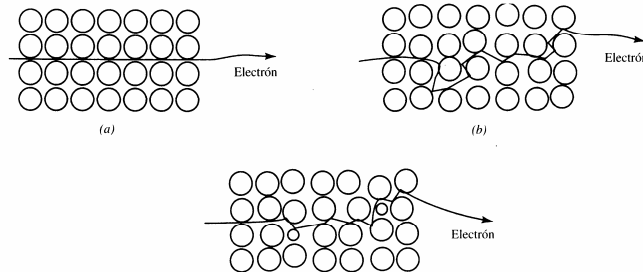
05/01/2005

La conductividad eléctrica en los metales

14

Factores que afectan a la conductividad eléctrica (I)

Los electrones se desplazan por el material como ondas electromagnéticas que “ajustan” su periodicidad a la de la red cristalina. Cualquier irregularidad en esta red cristalina provoca una dispersión (colisión) de dicha onda electrónica y, por tanto, una disminución de su movilidad y velocidad (disminución de la conductividad eléctrica).



- La temperatura

Un aumento de la temperatura del material supone un aumento de la energía de vibración de los átomos de la red cristalina. Los átomos oscilan en torno a sus posiciones de equilibrio y dispersan a las ondas electrónicas.

Disminución de la movilidad de los electrones y de la conductividad eléctrica.

Aumento lineal de la resistividad eléctrica con la temperatura.

$$\rho_T = \rho_r(1 + \alpha \Delta T)$$

Factores que afectan a la conductividad eléctrica (II)

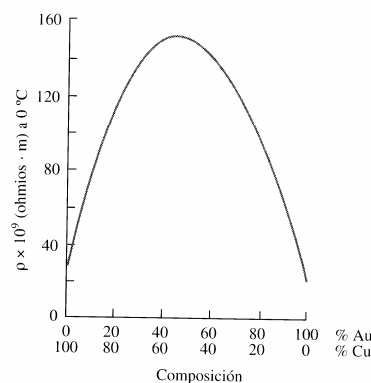
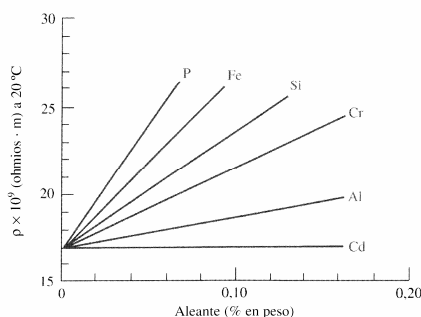
- Las imperfecciones de la red

Los defectos reticulares (vacantes, impurezas, dislocaciones, fronteras de grano,...) son irregularidades de la red cristalina y, por tanto, dispersan las ondas electrónicas.

Aumento de la resistividad del material: dependiente del número de imperfecciones e independiente de la temperatura

Ejemplo: resistividad, ρ_D , debida a una fracción atómica de átomos de solución sólida o de impurezas presentes en el material, x .

$$\rho_D = b(1-x)x$$



Factores que afectan a la conductividad eléctrica (III)

- El procesamiento y endurecimiento de un material

Todos los mecanismos de procesamiento de un material destinados a aumentar su resistencia mecánica se basan en la creación de irregularidades cristalinas en el material. Por tanto, todos estos métodos de procesamiento aumentan a su vez la resistividad eléctrica.

- Endurecimiento por solución sólida: introducción de impurezas o vacantes
- Endurecimiento por dispersión o envejecimiento: introducción de precipitados en el material
- Endurecimiento por deformación en frío: creación de dislocaciones
- Endurecimiento por control del tamaño de grano: creación o aumento de fronteras de grano

Los métodos de endurecimiento del material son más o menos perjudiciales para la conductividad eléctrica del material según sean las distancias entre las irregularidades introducidas: distancias pequeñas, menor movilidad de los electrones y mayor resistividad eléctrica

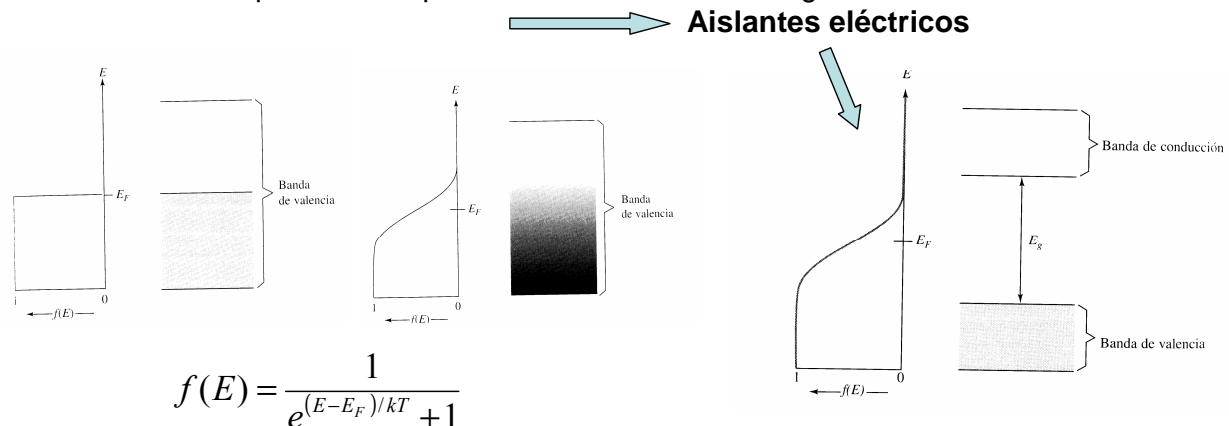
Los métodos de reblandecimiento de los materiales (templados) disminuyen las irregularidades internas del material y mejoran sus propiedades eléctricas conductoras

La conductividad eléctrica en cerámicos y polímeros (I)

- Estructura de bandas en los materiales aislantes (cerámicos y polímeros)

Fuertes enlaces covalente o iónicos

La banda de valencia está llena y muy alejada energéticamente de la banda de conducción. El *gap* es tan grande que los electrones no pueden ser excitados para el transporte o conducción de la carga eléctrica.



La conductividad eléctrica en cerámicos y polímeros (II)

- Conducción en materiales iónicos (cerámicos)
 - Medio alternativo de transporte de carga eléctrica: difusión o movimiento de iones
 - La movilidad de los iones es varios órdenes de magnitud menor que la de los electrones: $\mu_i = ZqD/kT$
 - Conductividad eléctrica iónica es muy pequeña: $\sigma_i = nZq\mu_i$
 - Las impurezas y vacantes aumentan la conductividad iónica
 - a) Las impurezas pueden también difundirse y ayudar al movimiento de los iones (o de la corriente eléctrica)
 - b) Las vacantes son necesarias para la difusión substitucional de los iones
 - El aumento de la temperatura favorece la difusión y, por tanto, la conductividad iónica

05/01/2005

La conductividad eléctrica en cerámicos y polímeros

19

La conductividad eléctrica en cerámicos y polímeros (III)

- Conducción en polímeros

Habitualmente son materiales aislantes, p.ej. los plásticos

Métodos para la reducción de la resistividad eléctrica en un polímero:

 1. Adición de compuestos iónicos, precipitados o impurezas en la matriz polimérica:
 - Los iones migran a la superficie del polímero, atraen la humedad y ésta disipa la electricidad estática (materiales protectores para las descargas eléctricas)
 - Polímeros con fibras de carbono recubiertas de níquel / Polímeros con una mezcla híbrida de fibras metálicas y de carbono, vidrio o aramidas: materiales con elevada rigidez y conductividad eléctrica, materiales de protección contra la radiación electromagnética
 2. Fabricación de polímeros con una buena conductividad eléctrica inherente:
 - Dopado de polímeros con impurezas con exceso/defecto de electrones: la carga eléctrica se desplaza saltando de un átomo a otro de la cadena
 - Proceso de ligadura cruzada de las cadenas poliméricas: la carga eléctrica se mueve fácilmente de una cadena a otra

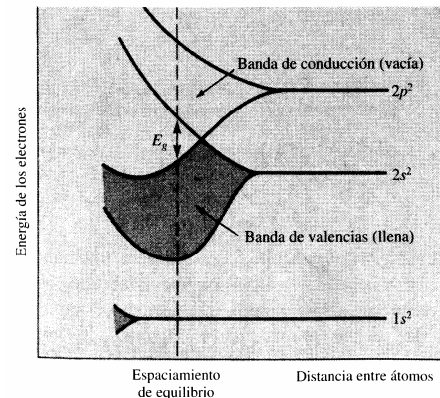
05/01/2005

La conductividad eléctrica en cerámicos y polímeros

20

La conductividad eléctrica en semiconductores (I)

- Estructura de bandas en materiales semiconductores: C, Si, Ge y Sn (columna IVA)
 - Dos** electrones en los últimos orbitales s y otros **dos** en los últimos orbitales p ($ns^2 np^2$)
 - Hibridación s-p en cada átomo: se forman cuatro orbitales para ocho electrones (dos llenos y dos vacíos)
 - En el material se forman dos bandas, una con $4N$ niveles energéticos llenos (banda de valencia) y otra con $4N$ niveles energéticos vacíos (banda de conducción)
 - Diferencia de energía entre ambas bandas es el *gap* de energía semiconductor, E_g .



Metal	Estructura electrónica	Conductividad eléctrica (ohms ⁻¹ · cm ⁻¹)	Gap de energía (eV)	Movilidad de los electrones (cm²/V · s)	Movilidad de los huecos (cm²/V · s)
C (diamante)	$1s^2 2s^2 p^2$	$< 10^{-18}$	5,4	1.800	1.400
Si	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$	5×10^{-6}	1,107	1.900	500
Ge	$4s^2 4p^2$	0,02	0,67	3.800	1.820
Sn	$5s^2 5p^2$	$0,9 \times 10^5$	0,08	2.500	2.400

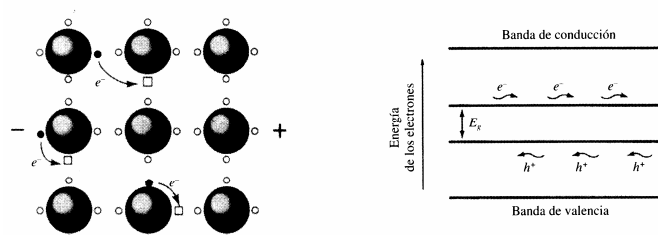
05/01/2005

La conductividad eléctrica en semiconductores

21

La conductividad eléctrica en semiconductores (II)

- La conducción eléctrica en los semiconductores intrínsecos, Si y Ge
 - Un aporte de energía térmica o una diferencia de potencial externa es suficiente para que un número n_e de electrones de la banda de valencia salte el pequeño *gap* semiconductor y llegue a la banda de conducción.
 - En la banda de valencia se formará (o quedará) un número idéntico de huecos n_h
 - En esta situación, la carga eléctrica es transportada por los n_e electrones (corriente eléctrica negativa) y los n_h huecos (corriente eléctrica positiva)
 - La conductividad eléctrica será: $\sigma = n_e q \mu_e + n_h q \mu_h = nq(\mu_e + \mu_h)$



05/01/2005

La conductividad eléctrica en semiconductores

22

La conducción eléctrica en los semiconductores intrínsecos, Si y Ge (continuación)

- Efecto de la temperatura o la diferencia de potencial

Al aumentar el aporte energético, aumenta el número de electrones que pueden superar el *gap* semiconductor y, por tanto la conductividad eléctrica de un material semiconductor intrínseco

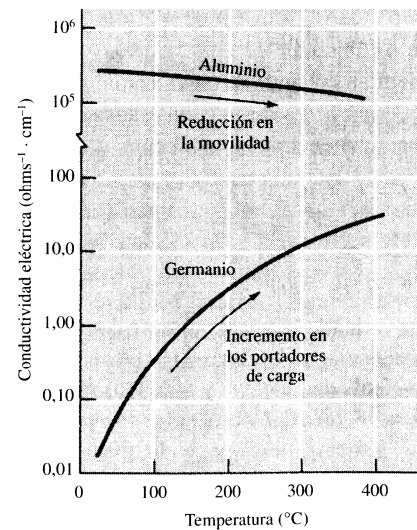
El número de electrones (o huecos) que a una temperatura dada, T , supera la barrera energética del *gap* es (según una ley tipo Arrhenius):

$$n_e = n_h = n_0 \exp(-E_g/2kT)$$

La conductividad del semiconductor intrínseco será:

$$\sigma = n_0 q (\mu_e + \mu_h) \exp(-E_g/2kT)$$

¡Aumenta con la temperatura!



La conducción eléctrica en los semiconductores extrínsecos

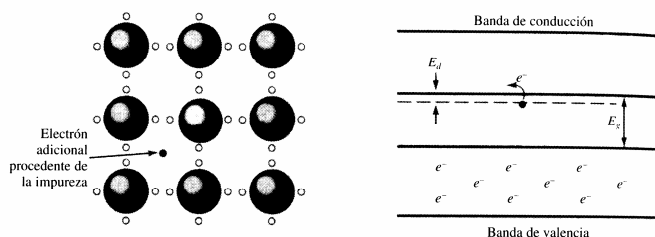
Los semiconductores extrínsecos son semiconductores intrínsecos (Si o Ge) con un pequeño contenido de impurezas:

- Impurezas con exceso de electrones respecto al Si o al Ge, p.ej. los elementos de la columna VA con cinco electrones, N, P, As y Sb
- Impurezas con defecto de electrones respecto al Si o al Ge, p.ej. los elementos de la columna IIIA con tres electrones, B, Al y Ga

El electrón o hueco en exceso está débilmente ligado al núcleo de la impureza y, por tanto, puede ser excitado muy fácilmente.

Estructura de bandas de un semiconductor extrínseco con impurezas donoras (con exceso de electrones), llamado *tipo n*

El electrón *extra* sólo debe superar un *gap* muy pequeño, E_d para acceder a la banda de conducción.



La conducción eléctrica en los semiconductores extrínsecos (continuación)

- Estructura de bandas de un semiconductor extrínseco con impurezas aceptoras (con defecto de electrones o exceso de huecos), llamado *tipo p*
El hueco *extra* sólo debe superar un *gap* muy pequeño, E_a para acceder a la banda de valencia.

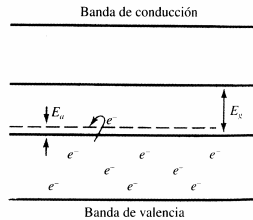
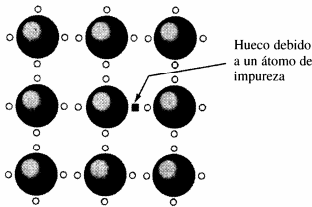


TABLA 18.7. Niveles de energía de donantes y aceptores en eV en silicio y germanio «dopado» con distintas impurezas.

Dopante	Silicio		Germanio	
	E_d	E_a	E_d	E_a
P	0,045		0,0120	
As	0,049		0,0127	
Sb	0,039		0,0096	
B		0,045		0,0104
Al		0,057		0,0102
Ga		0,065		0,0108
In		0,160		0,0112

Las impurezas añaden al semiconductor intrínseco un nivel de energía adicional el que se sitúan los electrones o huecos *extras*:

- muy cerca de la banda de conducción (electrones de las impurezas donoras)
- muy cerca a la banda de valencia (huecos de las impurezas aceptoras)

La conducción eléctrica en los semiconductores extrínsecos (continuación)

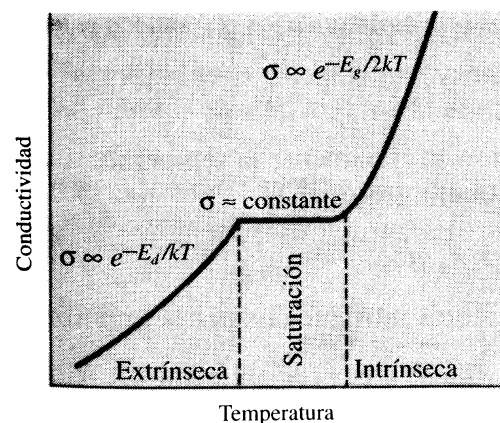
- Efecto de la temperatura o la diferencia de potencial
Un aporte energético puede ahora excitar: a) electrones de las impurezas (muy fácilmente, *gap* pequeño) y b) electrones del semiconductor intrínseco (difícilmente, *gap* grande)

El número de electrones o huecos excitados a una temperatura T será:

$$n_{\text{total}} = n_{\text{impurezas}} + n_{\text{intrínseco}} = n'_0 \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) + 2n_0 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

Dado que $E_g \gg E_d$, a temperaturas no muy altas los electrones o huecos excitados provendrán mayoritariamente de las impurezas y, por tanto, n_{total} es aproximadamente $n_{\text{impurezas}}$.

$$\sigma \approx n_{\text{impurezas}} q \mu_e = q \mu_e n'_0 \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right)$$



La conducción eléctrica en los compuestos semiconductores

Semiconductores estequiométricos: formados con elementos de estructuras cristalinas y de bandas muy similares al Si y al Ge.

Ejemplos clásicos: compuestos formados con elementos de la columna IIIA (ns^2np^1) y VA (ns^2np^3)

Hibridación de los orbitales s-p (cuatro por átomo) y formación de dos bandas en todo el material con 4N orbitales disponibles cada una de ellas: la de valencia llena y la de conducción vacía.

Existencia de *gap* en el compuesto semiconductor

Posibilidad de dopar (tipo n o p) al compuesto semiconductor

Altas movilidades de los portadores de carga en estos compuestos, alta conductividad eléctrica

TABLA 18.8. *Gap* de energía y movilidades a compuestos semiconductores

Compuesto	Brecha de energía (eV)	Movilidad de electrones ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)	Movilidad de huecos ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)
ZnS	3,54	180	5
GaP	2,24	300	100
GaAs	1,35	8.800	400
GaSb	0,67	4.000	1.400
InSb	0,165	78.000	750
InAs	0,36	33.000	460
ZnO	3,2	180	
CdS	2,42	400	
PbS	0,37	600	600

Del *Handbook of Chemistry and Physics*, 56.^a ed., CRC Press, 1975.

05/01/2005

La conducción eléctrica en semiconductores

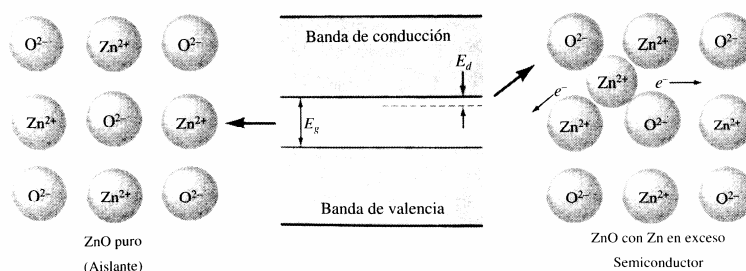
27

La conducción eléctrica en los compuestos semiconductores (continuación)

Semiconductores no estequiométricos o imperfectos: compuestos iónicos que tienen un exceso de aniones(-) (produciendo un semiconductor tipo p) o cationes(+) (produciendo uno tipo n)

Habitualmente óxidos y sulfuros

1. Ejemplo: ZnO (aislante) con exceso de Zn. Los átomos extra de Zn se ionizan (Zn^{2+}) y quedan libres los electrones. Semiconductor tipo n (exceso de electrones)
2. Ejemplo: FeO (aislante) donde se substituyen tres iones Fe^{2+} por dos iones Fe^{3+} . Creación de una vacante en el material aceptora de electrones. Semiconductor tipo p (defecto de electrones)



05/01/2005

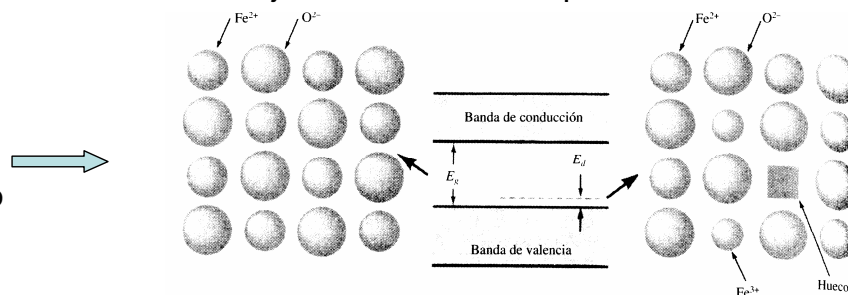
La conducción eléctrica en semiconductores

28

Aplicaciones de los semiconductores (dispositivos eléctricos) (I)

- Termistores: basados en la fuerte dependencia térmica de la conductividad eléctrica de los semiconductores
 - Ejemplos: termómetros, alarmas contra incendio (un aumento brusco de la temperatura provoca una gran variación de corriente eléctrica en el termistor, lo que permite activar la alarma)
- Transductores (medidores) de presión: al aplicarse presión sobre un semiconductor, sus átomos y sus estructura de bandas se comprimen, disminuyendo el *gap* semiconductor. Esto hace que la conductividad y la corriente eléctrica aumenten bajo la acción de una presión mecánica

Ejemplo de semiconductor no estequiométrico o imperfecto



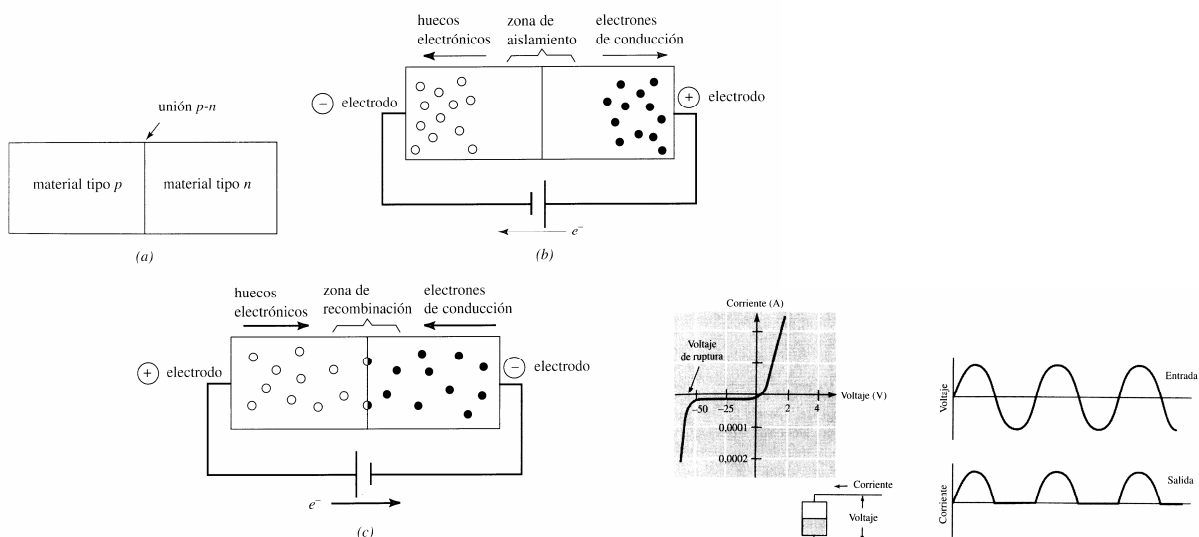
05/01/2005

La conducción eléctrica en semiconductores

29

Aplicaciones de los semiconductores (dispositivos eléctricos) (II)

- Diodos o dispositivos de unión p-n: rectificadores de corriente



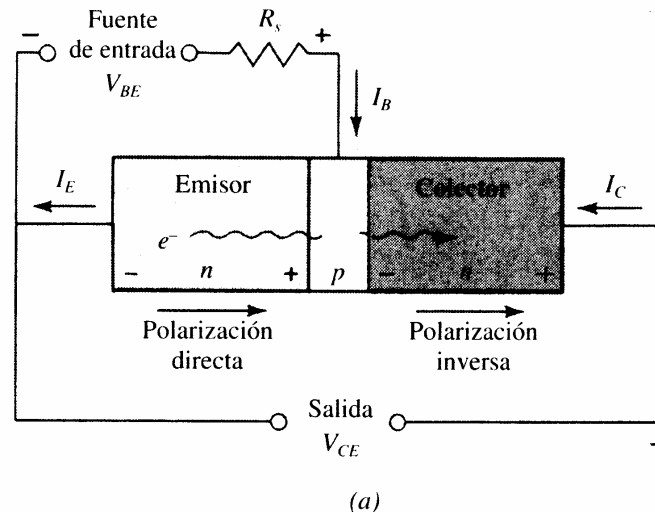
05/01/2005

La conducción eléctrica en semiconductores

30

Aplicaciones de los semiconductores (dispositivos eléctricos) (III)

- Transistores o uniones n-p-n/p-n-p: amplificación de corriente, puertas o dispositivos lógicos (circuitos integrados, *chips* de memoria, microprocesadores,...)



05/01/2005

La conducción eléctrica en semiconductores

31

Aislantes y propiedades dieléctricas

- Aislamiento eléctrico

En un gran número de aplicaciones eléctricas y electrónicas se necesitan materiales que impidan el paso de corriente eléctrica o la aislen: aislantes cerámicos y plásticos (polímeros).

Alta resistencia eléctrica y muy baja conductividad eléctrica.

Gap energético entre las bandas de conducción y de valencia muy grande.

Comportamiento dieléctrico.

Bajo altos campos o voltajes eléctricos, un material dieléctrico puede perder su capacidad para impedir el paso de corriente eléctrica entre dos conductores, *ruptura dieléctrica*.

Espesor del dieléctrico muy pequeña, d

Campo o voltaje eléctrico aplicado excesivo, V

Por tanto, un aislante eléctrico debe ser material dieléctrico con una resistencia dieléctrica alta:

$$\text{Resistencia dieléctrica} = \epsilon_{\max} = \left(\frac{V}{d} \right)_{\max}$$

05/01/2005

Aislantes y propiedades dieléctricas

32

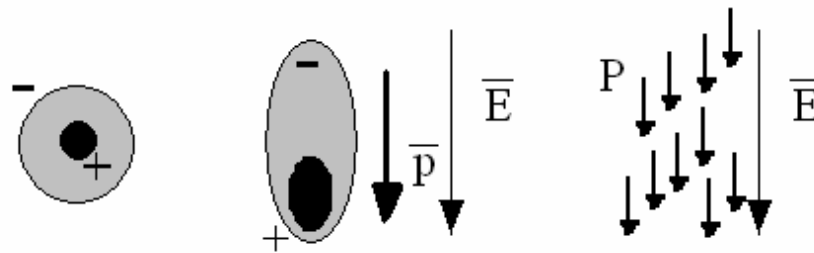
Polarización y constante dieléctrica (I)

- Polarización

En un material dieléctrico, los electrones están fuertemente ligados a sus respectivos núcleos atómicos sin poder abandonar sus posiciones de equilibrio.

Al aplicar un campo eléctrico externo, cada átomo del dieléctrico se distorsiona levemente: su nube electrónica se desplaza una distancia muy pequeña respecto a su posición inicial, igual que su núcleo de carga positiva lo hace en sentido contrario. El resultado es un átomo deformado con un polo de carga positivo y otro negativo, *dipolo eléctrico*, $p=q \cdot d$.

El resultado final en todo el material es la formación de Z dipolos por unidad de volumen, *polarización* del dieléctrico, $P=Z \cdot q \cdot d$



05/01/2005

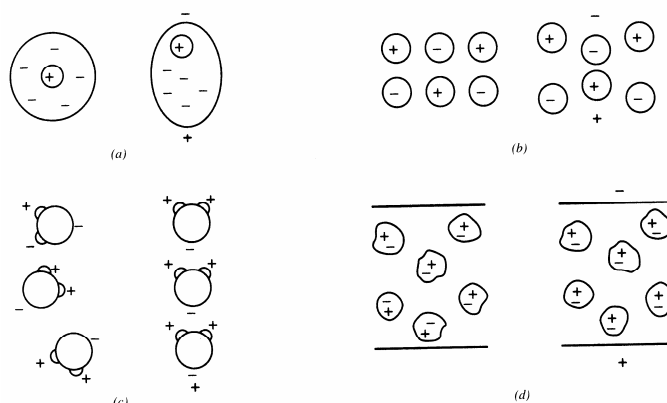
Aislantes y propiedades dieléctricas

33

Polarización y constante dieléctrica (II)

- Tipos de polarización

- Electrónica
- Iónica
- Molecular



- Dependencia de la polarización de un material dieléctrico

- Constante dieléctrica del material, ϵ
- Campo eléctrico externo, E
- Temperatura (desorden térmico)

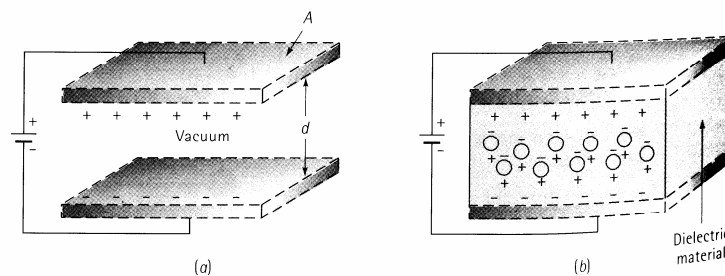
05/01/2005

Aislantes y propiedades dieléctricas

34

Polarización y constante dieléctrica (III)

- Aplicación: acumulación de carga eléctrica en los condensadores dieléctricos
 - Cualquier material o asociación de materiales metálicos puede acumular carga eléctrica en sus superficies. Condensador.
 - La inclusión de un material dieléctrico aumenta el nivel de carga almacenado en el condensador e impide su descarga (alta resistencia dieléctrica y eléctrica).
 - $C = \epsilon \cdot (A/d)$
 - Asociación de materiales metálicos separados por un dieléctrico: *condensador dieléctrico*. Aplicaciones: almacén de carga o energía, atenuador de oscilaciones eléctricas en la red...



05/01/2005

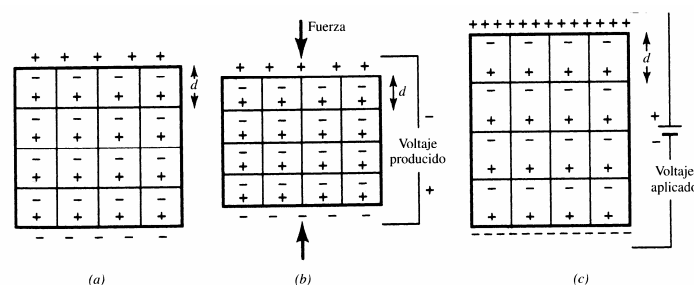
Aislantes y propiedades dieléctricas

35

Piezoelectricidad

Propiedad de algunos materiales dieléctricos basada en la estrecha relación entre su estructura cristalina y la polarización.

- Al aplicar una diferencia de potencial, el material se polariza, sus átomos y moléculas se distorsionan y el material en su conjunto cambia de tamaño: *electrostricción*
- Al aplicar una presión sobre el material dieléctrico, éste se contrae, sus átomos y moléculas cambian de tamaño y se forman dipolos eléctricos. Esta polarización produce, a su vez, una diferencia de potencial entre los extremos del material: *Piezoelectricidad*



Nota: La piroelectricidad es un fenómeno análogo pero causado por el calentamiento del material dieléctrico

05/01/2005

Aislantes y propiedades dieléctricas

36

Ferroelectricidad

Normalmente, al retirar el campo eléctrico de un material polarizado una parte o todos de sus dipolos formados desaparecen debido al desorden térmico.

En los *materiales ferroeléctricos*, el ordenamiento de los dipolos es tan intenso que un gran número de ellos permanece orientados incluso después de retirar el campo eléctrico externo.

