

8. PROPIEDADES FISICAS

- Propiedades eléctricas
- Propiedades magnéticas
- Propiedades térmicas
- Propiedades ópticas

8.1 Propiedades Eléctricas

Comportamiento eléctrico {
- estructura del material
- procesamiento del material
- medio ambiente en el que se encuentra

Conductividad eléctrica

Ley de Ohm $V = I R$ (1)

Energía o potencia: $E = I V = I^2 R$ [w] (2)

V: voltaje (V)

I: corriente eléctrica (A)

R: resistencia eléctrica (Ω), depende del material.

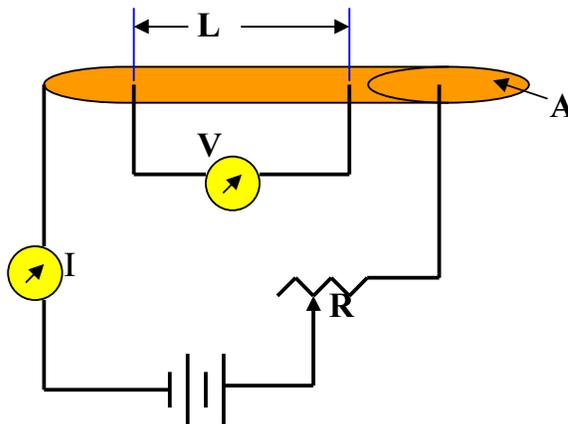
$$R = \rho(L/A) = (1/\sigma)(L/A) \quad (3)$$

L: longitud del conductor (cm)

A: sección transversal (cm^2)

ρ : resistividad eléctrica ($\Omega \text{ cm}$)

σ : conductividad eléctrica ($\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$)



De (1) y (3)

$$V = I \frac{L}{\sigma A} = \frac{I L}{A \sigma} \Rightarrow \frac{V}{L} = \frac{I}{A \sigma} \quad (4)$$

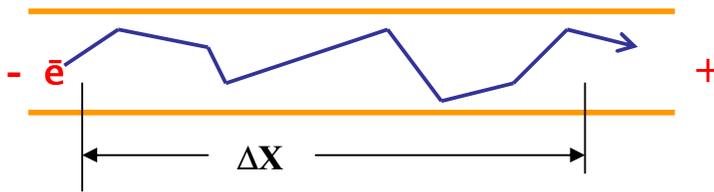
Si : *el campo eléctrico* $\xi = \frac{V}{L}$ *y la densidad de flujo* $J = \frac{I}{A}$

Ley de Ohm: $J = \sigma \xi = n q v$ (5)

n : N° portadores de carga por cm²

q: carga de portadores (e: 1.6x10⁻¹⁹ C)

v = ΔX/Δt (cm/s); velocidad promedio de portadores



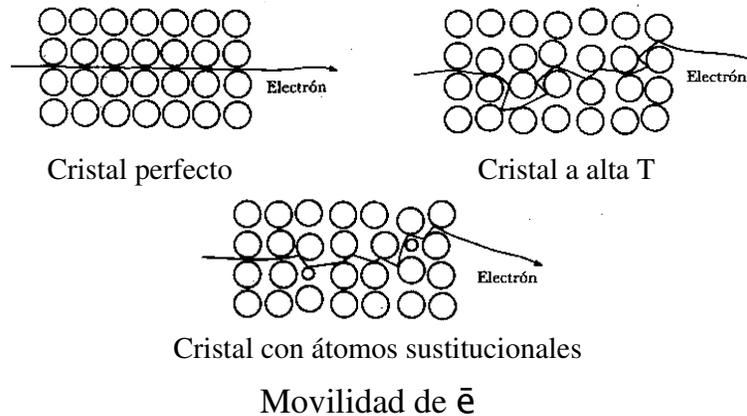
Si la movilidad de los portadores $\nu = v/\xi$ (cm²/s V)

$$\sigma = n q \nu$$

- La conductividad eléctrica está determinada por el número de portadores de carga (n) y por la movilidad de ellos (ν)
- Portadores de carga: electrones en conductores y semiconductores
iones en compuestos iónicos

Factores que afectan la movilidad (y por lo tanto la **conductividad** y la **resistividad**)

- movilidad térmica (temperatura)
- imperfecciones reticulares del material (defectos de red)
- deformación plástica que pueda sufrir el material.



Resistividad total ρ :

$$\rho = \rho_T + \rho_s + \rho_d \quad (6)$$

ρ_T : contribución debido a las vibraciones térmicas

ρ_s : contribución debido a los defectos de red

ρ_d : contribución debido a la deformación plástica

Influencia de la temperatura

- **Conductividad σ disminuye con T:** disminuye la movilidad de los electrones producto de la mayor vibración de los átomos.
- **⇒ Resistividad ρ_T aumenta con T**

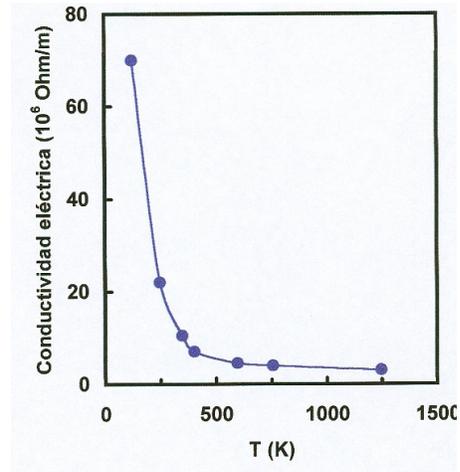
$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (7)$$

ρ_0 : resistividad a temperatura ambiente (T_a)

ΔT : ($T - T_a$); T: temperatura del material

α : coeficiente térmico de resistividad

Conductividad eléctrica del Ni
En función de la temperatura



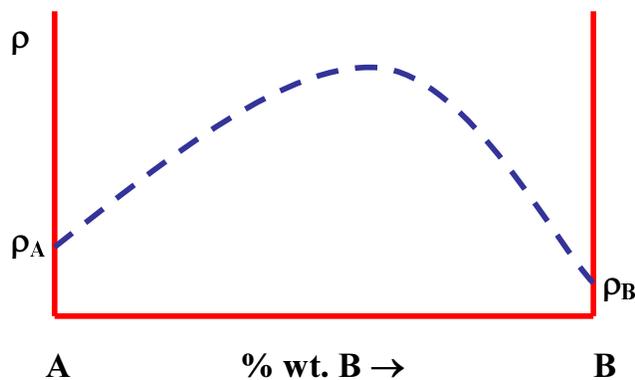
Influencia de los defectos de red

- **Conductividad σ disminuye con los defectos de red:** los defectos dispersan los electrones reduciendo la movilidad de los portadores.
- **⇒ Resistividad ρ_s aumenta con los defectos**

$$\rho_s = \beta (1 - c) c \quad (8)$$

β : coeficiente de resistividad por defectos

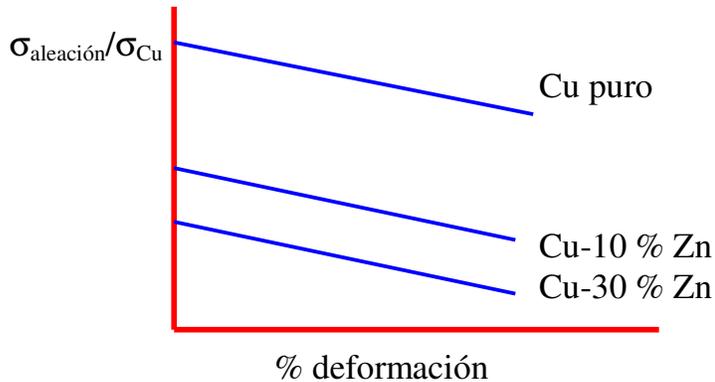
c : fracción de átomos de soluto o impurezas en la solución sólida.



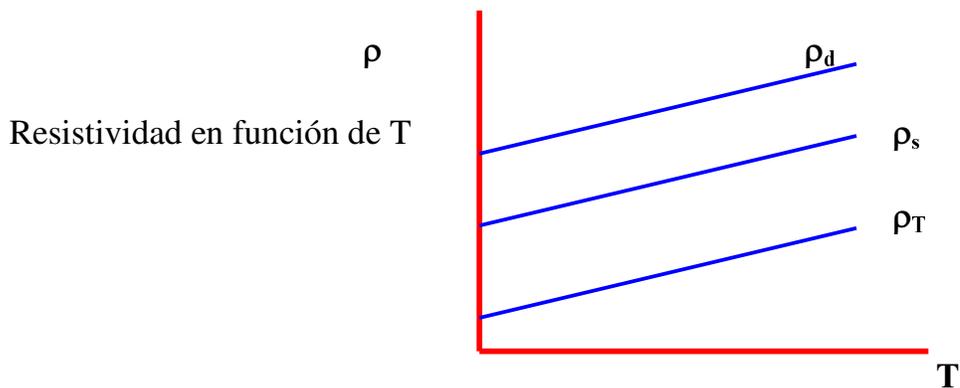
Contribución de la concentración de soluto en la resistividad, en un sistema de solubilidad total.

Influencia de la deformación plástica

- Deformación plástica \Rightarrow implica aumento de las dislocaciones \Rightarrow implica dispersión de los electrones \Rightarrow disminuye la movilidad de los electrones \Rightarrow aumenta la resistividad ρ_d .



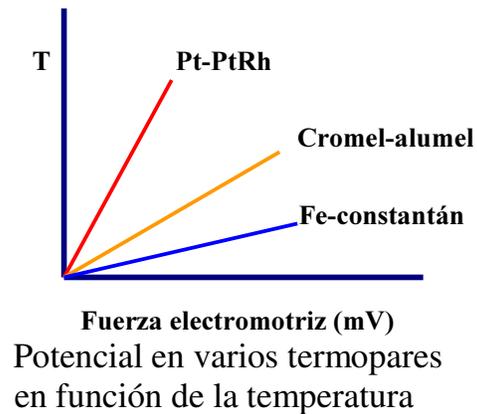
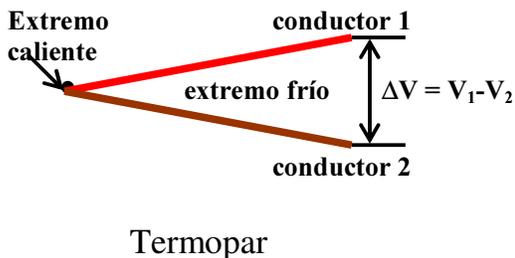
Efecto de la concentración de soluto y deformación en frío sobre la conductividad eléctrica del Cu



- La pendiente a la curva corresponde al coeficiente térmico α .
- Los defectos de red y la deformación incrementan la resistividad en forma independiente de la temperatura.

Termopares

- La distribución de los electrones varía con la temperatura (a temperaturas más altas los electrones ocupan niveles de energías mayores)
- Si sólo se calienta un extremo de un conductor, el gran número de electrones excitados en el extremo caliente se mueve hacia el extremo frío, produciendo una diferencia de potencial entre ambos extremos.
- Si se unen dos conductores de diferente material por un extremo y se calienta, el flujo de electrones de ambos materiales es diferente; la diferencia de potencial que se produce entre ambos varía con la temperatura, conformando un termopar o termocupla.



Superconductividad

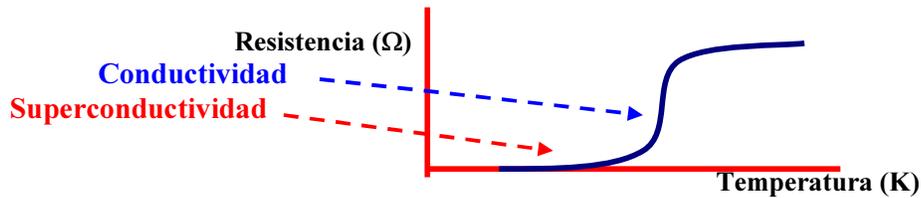
- Algunos cristales enfriados a muy baja temperatura se comportan como superconductores (la resistencia eléctrica es cero y por lo tanto la corriente fluye indefinidamente)
- El cambio de conductividad a superconductividad ocurre a una temperatura menor o igual que la crítica T_c , o a un campo magnético crítico H_c .
- El campo magnético crítico (H_c) se relaciona con la temperatura:

$$H_c = H_0 [1 - (T/T_c)^2]$$

H_0 : campo crítico a 0 K (oersteds, Oe)

T_c : temperatura crítica

T: temperatura a H_c



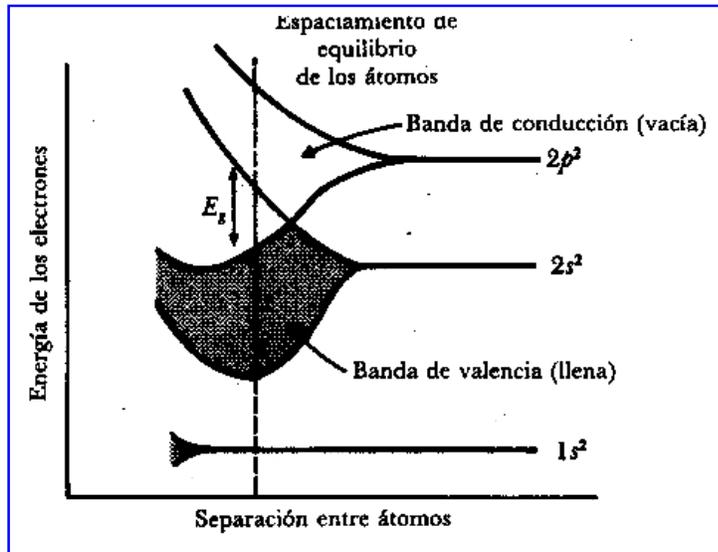
Aislantes y semiconductores

- Algunos elementos (C, Si, Ge, Sn -grupo IV A) tienen 2 electrones en su último acimutal p (puede tener hasta 6), y valencia 4.
- Su acimutal p no está completamente llena, \Rightarrow se espera una alta conductividad.
- Esto no ocurre porque estos elementos tienen enlaces covalentes, y por lo tanto los electrones de los acimutales s y p están rígidamente unidos a los átomos.

Ejemplo: diamante (C): $1s^2 2s^2 2p^2$ Valencia = 4 electrones

- Si se juntan N átomos \Rightarrow 2s y 2p interactúan y producen 2 bandas
- Cada una de estas bandas puede contener $4N$ electrones.
- Solo hay $4N$ electrones disponibles

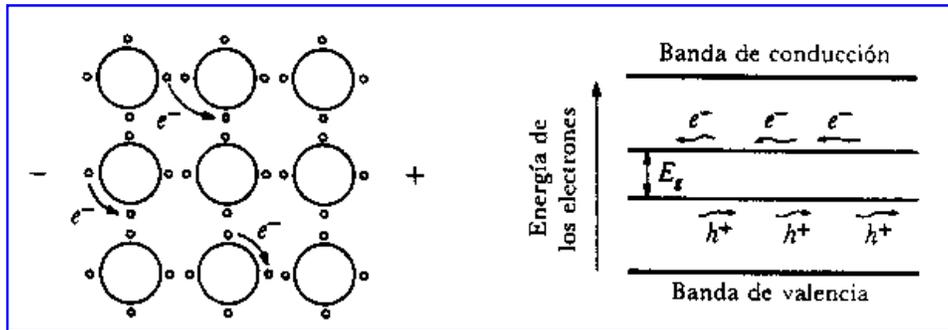
Banda de valencia, de conducción y brecha E_g para el diamante.



- Banda inferior (de valencia) se llena completamente
- Banda superior (de conducción) se encuentra vacía
- Entre ambas bandas existe una banda de energía E_g que separa a los electrones de la banda de conducción.
- Dependiendo de la magnitud de E_g , el material se comportará como un aislante (diamante, $E_g=5.4$ eV) o como un semiconductor (Silicio, $E_g=1.11$ eV; Ge, $E_g=0.67$ eV; Sn, $E_g=0.08$ eV).

Semiconductor intrínseco

- Los materiales tienen una banda E_g pequeña (Silicio, $E_g=1.11$ V; Ge, $E_g=0,67$ eV).
- Los electrones pueden pasar de la banda de valencia a la de conducción, dejando niveles vacíos o huecos en la banda de valencia.



Semiconductor intrínseco.

- Al aplicar un voltaje, los electrones se mueven en la banda de conducción hacia el terminal positivo y los huecos se mueven en la banda de valencia hacia el negativo.
- La conductividad queda determinada por el N° de pares electrón-hueco:

$$\sigma = n_e q \mu_e + n_h q \mu_h$$

n_e : N° de electrones en la banda de conducción

n_h : N° de huecos en la banda de valencia

q : carga de cada portador

$\mu_{e,h}$: movilidad de los electrones y huecos

- Para un semiconductor intrínseco: $n = n_e = n_h$

$$\sigma = n q (\mu_e + \mu_h)$$

- A mayor temperatura, mayor probabilidad de que un electrón pase a la banda de conducción $\Rightarrow n$ depende de T y de E_g : $n = n_o \exp(-E_g/kT)$

- **Metal:** a mayor T, menor σ (menor movilidad de los portadores)

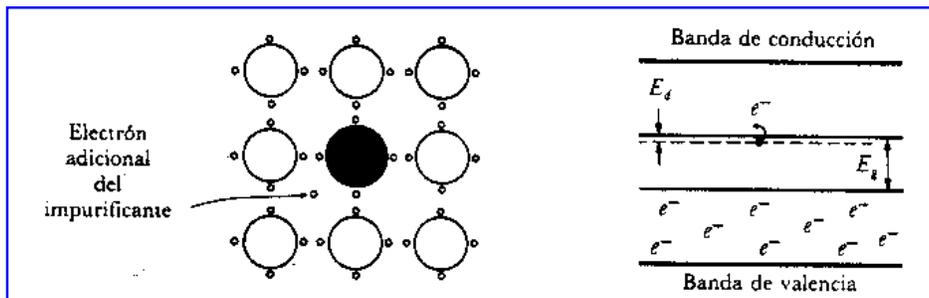
- **Semiconductor:** a mayor T, mayor σ (mayor cantidad de portadores)

Semiconductor extrínseco

- Semiconductor extrínseco es un semiconductor intrínseco al cual se agregan átomos de impureza (impurificante o dopante).
- La conductividad depende de la cantidad de átomos de impurezas que contengan estos materiales semiconductores.

Semiconductor tipo n

- Cuando se agrega una impureza con valencia mayor que el material
- Ejemplo: se agrega Sb (valencia 5) al Si (valencia 4).
- El electrón adicional necesita una pequeña energía E_d para entrar a la banda de conducción, sin la creación de huecos.



Semiconductor extrínseco tipo n.

- **Temperaturas bajas:** **semiconductor extrínseco**, pocos electrones y huecos ($n = n_{od} \exp(-E_d/kT)$)

$$\sigma \propto \exp(-E_d/kT)$$

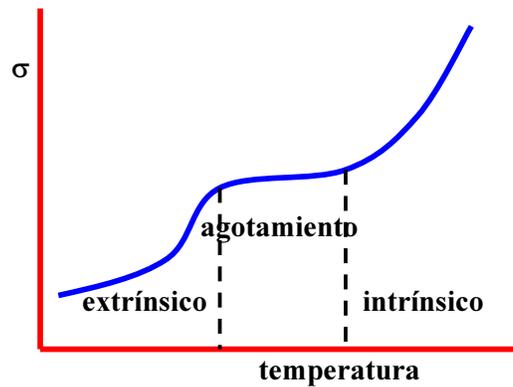
- **Temperaturas intermedias:** la totalidad de los electrones del donador (impureza) entran a la banda de valencia → agotamiento

$$\sigma \approx \text{constante}$$

- **Temperaturas altas:** **semiconductor intrínseco**, se generan electrones y huecos intrínsecos (agotamiento del donante) y se tiene semiconducción intrínseca.

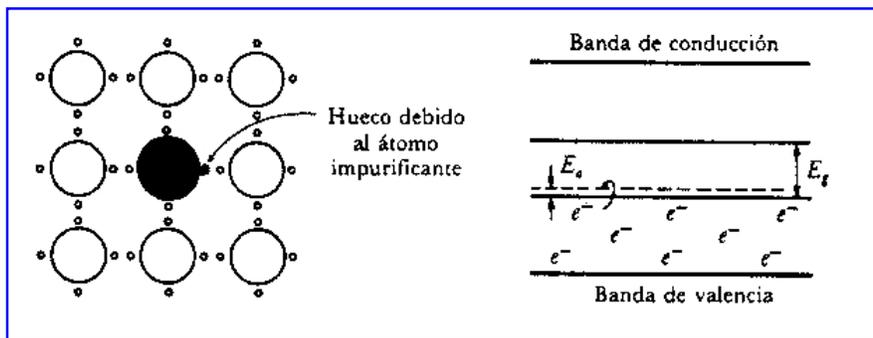
$$\sigma \propto \exp(-E_g/kT)$$

Efecto de la temperatura sobre la conductividad σ de un semiconductor extrínseco.



Semiconductor tipo p

- Cuando se agrega una impureza con valencia menor que el material
- Ejemplo: se agrega Ga (valencia 3) al Si (valencia 4).



Semiconductor tipo p. Se crea un hueco en la banda de valencia

- Faltan electrones para completar el enlace covalente, creándose huecos en la banda de valencia, el cual puede ser llenado por electrones provenientes de otros lugares en la banda
 - Para crear un hueco en la banda de valencia, un electrón debe ganar la energía E_a
 - El hueco se mueve y transfiere la carga
- **Temperaturas bajas:** **semiconductor extrínseco**, pocos electrones y huecos ($n = n_{oa} \exp(-E_a/kT)$)
 - **Temperaturas intermedias:** saturación de aceptadores
 - **Temperaturas altas:** **semiconductor intrínseco**, se generan electrones y huecos intrínsecos y se tiene semiconducción intrínseca.

Conductividad de los materiales iónicos

- En los materiales iónicos la banda de energía es demasiado grande y los electrones no alcanzan la banda de conducción (aislante)
- La conducción sólo puede ocurrir por el movimiento de los iones.

La movilidad μ es:

$$\mu = Z_i q D_i / kT$$

Z_i : valencia del ión

q : carga

D_i : coeficiente de difusión del ión

T : temperatura

k : constante de Boltzmann

La conductividad es:

$$\sigma = n Z_i q \mu$$

n : N° de portadores

- La movilidad de los iones es mucho menor que la de los electrones → la conductividad es muy pequeña.
- Las impurezas y las vacancias incrementan la conductividad.
- El aumento de temperatura incrementa la conductividad (aumenta la velocidad de difusión).

Dipolos y polarización

- Dipolos son grupos de átomos que presentan cargas desequilibradas.
- Polarización (**P**): alineamiento de dipolos dentro del material frente a la aplicación de un campo eléctrico.

$$\mathbf{P} = \mathbf{Z} q \mathbf{d} \text{ (C/m}^2\text{)}$$

Z : N° de centros de carga que se desplazan por m^3

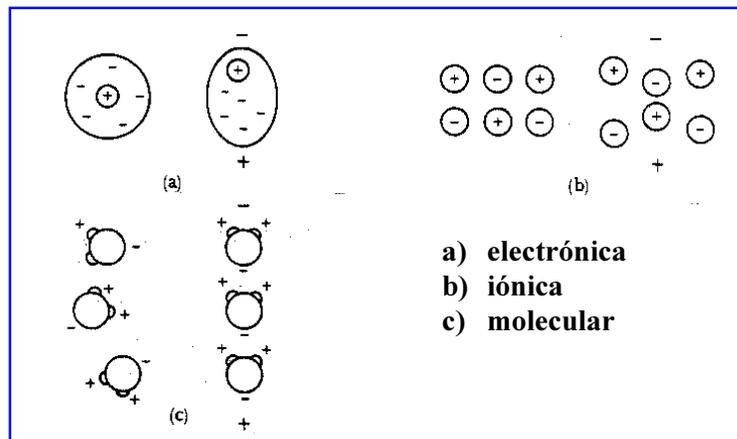
q : carga electrónica (C)

d : desplazamiento entre los extremos positivo y negativo del dipolo (m).

➤ Mecanismos de polarización (más importantes):

- a) **Electrónica**: el campo distorsiona el ordenamiento electrónico de un átomo.
- b) **Iónica**: los enlaces entre los iones están deformados elásticamente por el campo. Dependiendo de la dirección del campo, los cationes y los aniones se acercan o se apartan.
- c) **Molecular** (orientación): los dipolos giran hasta alinearse en un campo. Cuando se anula el campo los dipolos pueden permanecer alineados (polarización permanente).

Mecanismos de polarización



Materiales dieléctricos

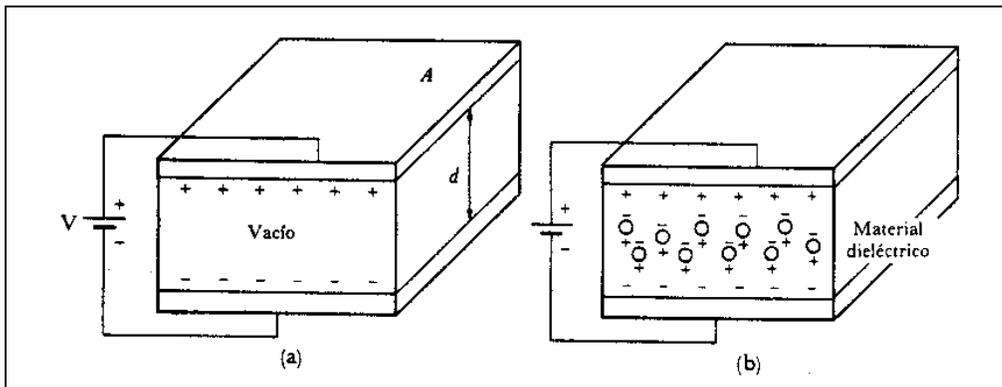
➤ Son aquellos que tienen una gran banda de energía entre las bandas de valencia y conducción, presentando una alta resistividad eléctrica.

Aplicaciones de los materiales dieléctricos:

- Aislantes: impiden la transferencia de carga en un circuito eléctrico
- Capacitores: almacenan carga eléctrica $Q = C V$

V: voltaje entre las placas del capacitor

C: capacitancia $C = \epsilon A / d$ (ϵ es la permitividad dieléctrica, capacidad del material para polarizarse y almacenar carga; A es el área de cada placa; d es la distancia entre placas).



Capacitador. (a) Placas conductoras en vacío entre ellas (12 unidades de carga). (b) Si se coloca un dieléctrico entre las placas, éste se polariza y almacena carga adicional (22 unidades de carga).

8.2 Propiedades Magnéticas

- Las propiedades magnéticas de un material se refieren a la interacción de su estructura y microestructura frente al campo magnético.
- **Momentos magnéticos (magnetón de Bohr): efectividad del campo magnético asociado a un electrón. Cada electrón en un átomo tiene dos momentos magnéticos.**

Relaciones fundamentales

- Densidad de flujo o inducción magnética **B** (gauss)

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

μ_0 : permeabilidad magnética en el vacío (gauss/oersteds)

μ : permeabilidad magnética del material situado en el campo

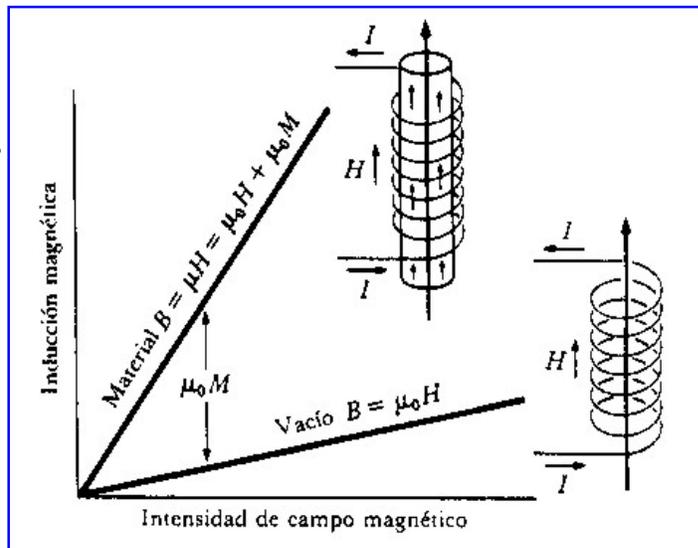
H: (= N I) intensidad del campo magnético (oersteds)

- Magnetización **M**: incremento en la inducción magnética debido al material del núcleo

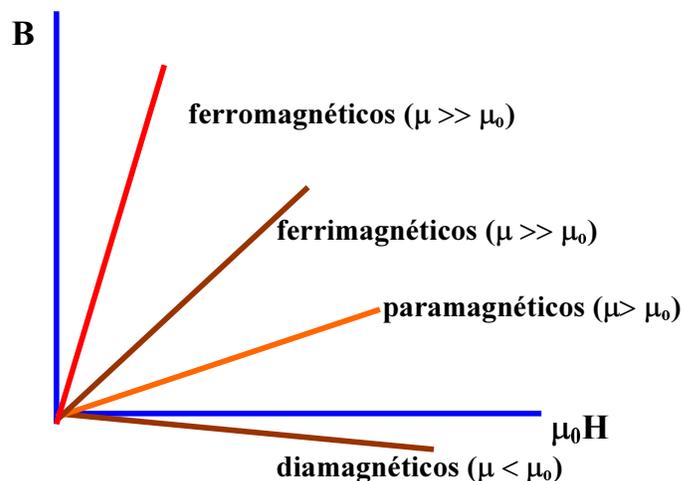
$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \approx \mu_0 \mathbf{M}$$

La corriente I pasa por una bobina de N vueltas y establece el campo magnético H, con una inducción magnética B.

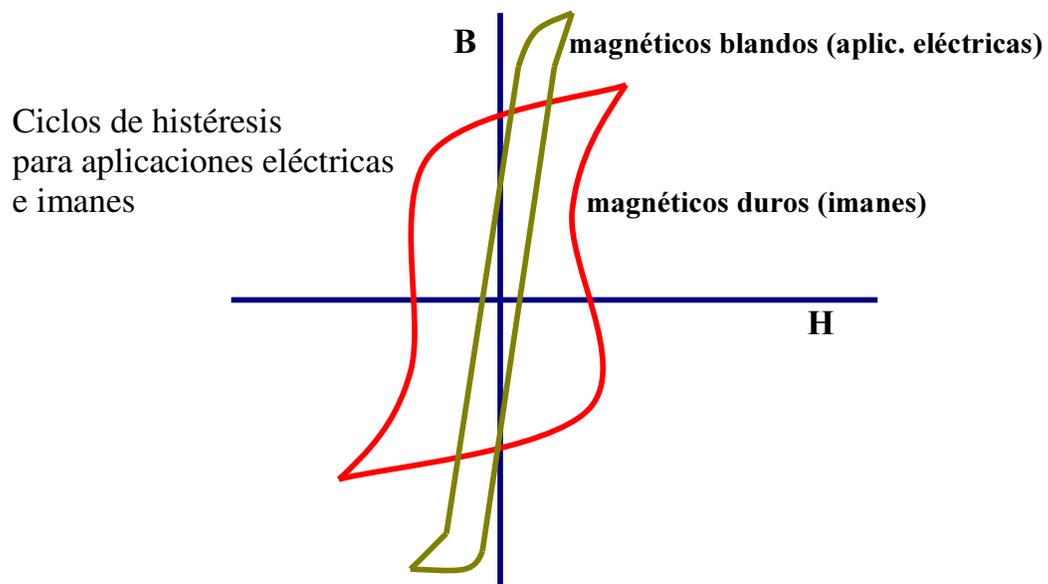
$$\mathbf{H} = \mathbf{N I}$$



- **Dipolo magnético:** Cuando un campo magnético actúa sobre un átomo, éste induce un dipolo magnético en todo el átomo, influyendo sobre el momento magnético a través de los electrones orbitales.
- **Interacción entre los dipolos y el campo magnético:**
- Diamagnetismo:** Los dipolos se oponen al campo magnético, causando que la magnetización sea menor que cero ($\mu < \mu_0$).
 - Paramagnetismo:** En materiales que tienen electrones no apareados (Fe, Ni, Co), se les asocia un momento magnético neto debido al espín. En un campo magnético los dipolos se alinean causando una magnetización positiva ($\mu > \mu_0$).
 - Ferromagnetismo:** Este comportamiento se debe a los niveles de energía incompletos en el nivel 3d (Fe, Ni y Co) ó 4f (Gd). Los dipolos permanentes no apareados se alinean con el campo magnético aplicado ($\mu \gg \mu_0$).
 - Ferrimagnetismo:** En los materiales cerámicos, los diferentes iones tienen momentos magnéticos distintos. Frente a un campo magnético, los dipolos del ion A pueden alinearse con el campo, mientras que los del ion B se oponen al campo ($\mu \gg \mu_0$).



- Materiales ferrimagnéticos y ferromagnéticos se clasifican en:
- Materiales magnéticos blandos:** se utilizan en dispositivos sometidos a campos magnéticos alternados, en los cuales las pérdidas de energía son pequeñas; el área relativa dentro del ciclo de histéresis es pequeña (ej. núcleos de transformadores).
 - Materiales magnéticos duros:** estos materiales tienen una alta resistencia a la desmagnetización y se utilizan en imanes permanentes.



8.3. Propiedades Térmicas

- Las propiedades térmicas (capacidad térmica, conductividad y dilatación térmica) son función de la vibración atómica. La conductividad térmica es función de la transferencia de energía a través de los electrones.

Capacidad térmica o calórica (C): capacidad del material para absorber la energía Q necesaria para aumentar en una unidad la temperatura T .

$$C = dQ/dT \quad [\text{J/molK ó cal/molK}]$$

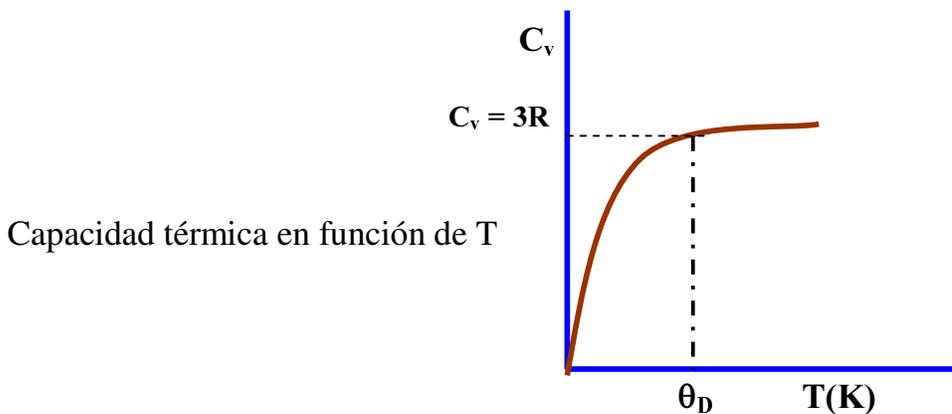
- $C = C_v \Rightarrow C$ se mide a volumen constante
- $C = C_p \Rightarrow C$ se mide a presión constante

- A temperaturas bajas:

$$C_v = AT^3 \quad A: \text{constante}$$

- A temperaturas sobre temperatura de Debye (θ_D):

$$C_v = 3R \quad R: \text{constante de los gases}$$



Calor específico (c): es la capacidad térmica C del material por unidad de masa M .

$$c = C/M \quad [\text{J/kgK ó cal/kgK}]$$

Dilatación Térmica: La mayoría de los materiales se expanden con la temperatura (la distancia promedio entre los átomos y las dimensiones del material aumentan).

- El cambio de dimensiones ($\Delta l/l$) es expresado por el **coeficiente de dilatación térmica lineal α**

$$\alpha = \Delta T / (\Delta l/l)$$

ΔT : incremento en la temperatura

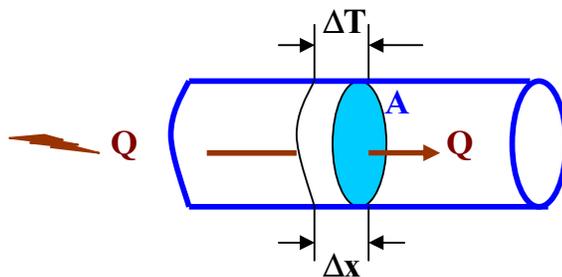
- A mayor temperatura de fusión \rightarrow mayor resistencia en los enlaces atómicos \Rightarrow menor α

Ejemplo:

Material	Al	Cu	Fe	W
Temp. fusión (°C)	660	1085	1538	3410
α (10^{-6} cm/cm °C)	25	16,6	12	4,5

Conductividad térmica (K): medida por la cual el calor Q es transmitido a través de una sección A del material (**flujo de calor q**), por unidad de tiempo, cuando existe una gradiente de temperatura dT/dx .

$$Q/A = K (dT/dx) = q$$



Al calentar un extremo, se produce un flujo calórico q hacia el extremo frío, determinado por la gradiente dT/dx producido en la barra.

Choque térmico: Cambio brusco de temperatura en un material (gradiente de temperatura alta de temperatura), quedando éste con tensiones térmicas.

- **Resistencia al choque térmico (TSR):** es la capacidad del material de resistir una fractura por efecto del choque térmico. Depende de la magnitud del choque térmico, de las propiedades térmicas y de las propiedades mecánicas del material.
- En los materiales dúctiles, las tensiones térmicas pueden aliviarse mediante deformación plástica; en los materiales frágiles las tensiones térmicas aumentan la posibilidad de fractura frágil.

8.4. Propiedades Ópticas

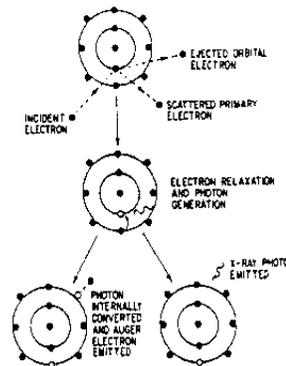
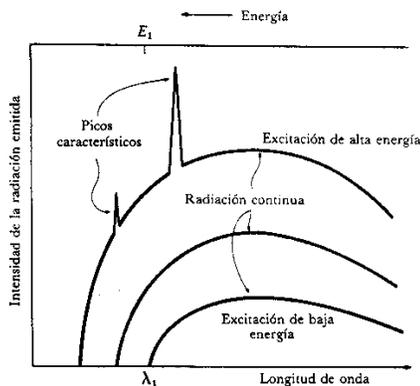
Emisión de radiación

- Un material puede emitir energía radiante o radiación en forma de ondas o partículas (fotones).
- Los fotones pueden radiar con: **energía E**, **frecuencia ν** y **longitud de onda λ**

$$E = h \nu = h c / \lambda$$

h: constante de Planck (6.62×10^{-34} Js)
 c: velocidad de la luz (3×10^{10} cm/s)

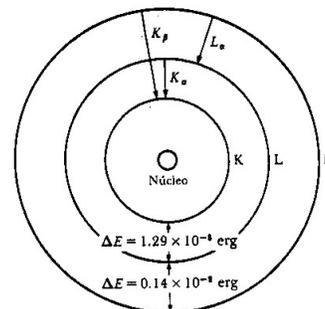
- Radiación continua:** fotones de distinta longitud de onda producidos por la interacción de un electrón con los átomos.
- Radiación característica:** si un electrón es sacado de su nivel energético interno y otro electrón de un nivel más externo ocupa este hueco, se emite un fotón característico con energía y longitud de onda determinado por las diferencias de energías entre los niveles energéticos.



Espectro de radiación continua y característica

Radiación característica.

K_{α}	$\lambda=0,154$ nm	$E=1,29 \times 10^{-8}$ erg
K_{β}	$\lambda=0,139$ nm	$E=1,43 \times 10^{-8}$ erg
L_{α}	$\lambda=0,134$ nm	$E=0,14 \times 10^{-8}$ erg



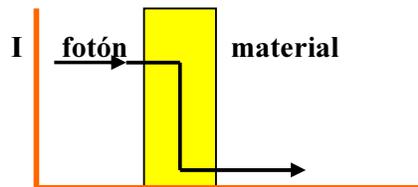
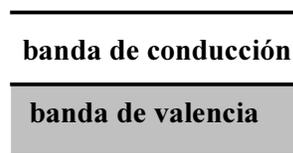
Absorción: Los fotones cuando interactúan con un material, ceden su energía y son absorbidos. La absorción está dado por la reducción de intensidad desde I_0 a I :

$$\ln (I/I_0) = - \mu x$$

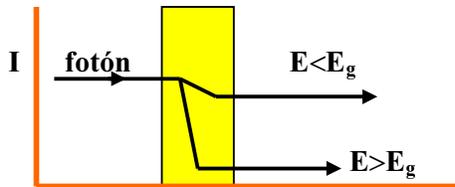
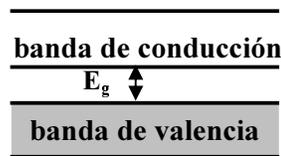
μ : coeficiente de absorción lineal (= f [densidad del material, $\lambda_{\text{radiación}}$, separación entre bandas de conducción y de valencia])

x : trayectoria de movimiento de los fotones

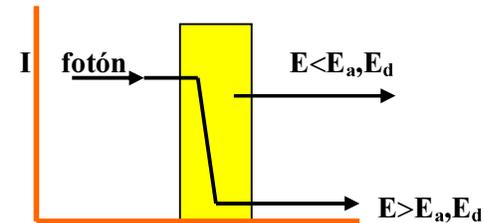
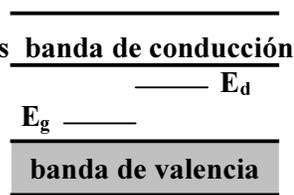
Metales:



Aislantes y semiconductores intrínsecos



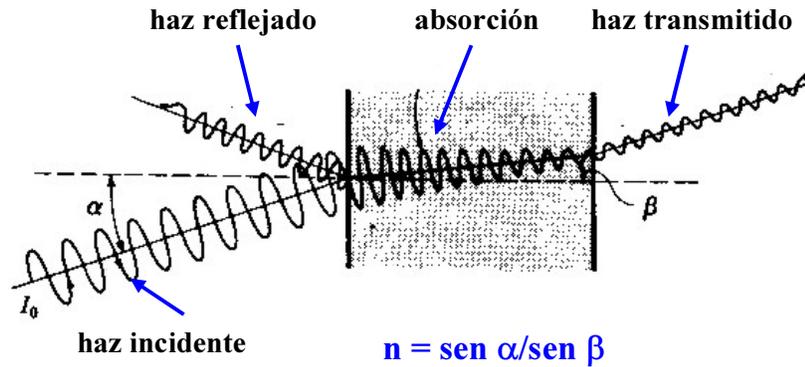
Semiconductores extrínsecos



Relación entre la absorción y la banda de energía

Transmisión y Refracción

- El material es transparente cuando los fotones son transmitidos (no poseen suficiente energía para excitar un electrón y llevarlo a un nivel superior).
- Aun cuando los fotones sean transmitidos, éstos pierden algo de su energía y por lo tanto tienen una longitud de onda mayor.
- El fotón se comporta como si la velocidad de la luz se redujera, modificando su dirección.



Relación entre haz incidente, haz reflejado, absorción y haz transmitido, en un material con índice de refracción n

Índice de refracción, n : es la relación entre la velocidad de la luz en vacío y en el material

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{\text{vacío}}}{\lambda} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

c , v : velocidad de la luz en el vacío y en el material, respectivamente
 α , β : ángulos formado por la normal a la superficie del material con los haces incidentes y refractados

Problemas y preguntas

1. Describa la ley de Ohm en su forma macroscópica y microscópica.
2. Describa la relación entre el enlace atómico y la conductividad eléctrica de los materiales.
3. Describa la conducción eléctrica en los metales.
4. Un alambre metálico de 0,35 cm de diámetro debe conducir una corriente de 35 A. Si el máximo poder de disipación a lo largo del alambre es 0,035 W/cm, cuál será la mínima conductividad posible por el alambre?. Cual será la densidad de corriente eléctrica del alambre?.
5. Explique porqué la conductividad eléctrica de un metal disminuye con la temperatura.
6. Que factores afectan a la resistividad eléctrica de un metal?
7. Que defectos de red afectan a la resistividad eléctrica.
8. Calcule la temperatura a la cual un alambre de cobre tendrá la misma conductividad eléctrica que uno de aluminio a 45 °C.
9. Cual es el principio de las termocuplas?.
10. Describa un semiconductor intrínseco.
11. Diferencia entre un semiconductor intrínseco y uno extrínseco.
12. Describa la influencia de la temperatura en los semiconductores.
13. La resistividad eléctrica del silicio puro es de $2,3 \times 10^3 \Omega\text{m}$ a 27 °C, calcule su conductividad a 300 °C.
14. Que entiende por región de agotamiento en un semiconductor?
15. Calcule la conductividad eléctrica intrínseca de GaAs a 75 °C ($E_g = 1,47 \text{ eV}$, $\mu_e = 0,72 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_h = 0,02 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $n_e = n_h = 1,4 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$).
16. Describa la conductividad eléctrica de los materiales iónicos.
17. Describa los mecanismos más importantes de polarización.
18. Describa la interacción entre dipolos y campos magnéticos.
19. Explique la diferencia entre un material magnético blando y uno duro.

Ciencia de los Materiales – E. Donoso

20. Explique la diferencia entre ferromagnetismo y ferrimagnetismo.
21. Explique la capacidad térmica de un material en función de la temperatura.
22. Si a 50 gramos de cobre se incrementa la temperatura en 75°C cuando se calienta por algún tiempo, evalúe su calor específico y determine el calor requerido..
23. Una pieza de aluminio solidifica a 600°C , y a esa temperatura tiene una longitud de 40 cm, calcule la longitud de la pieza a temperatura ambiente.
24. Un vidrio de ventana de $0,8 \times 0,8 \text{ m}$ y 1 cm de espesor de una cierta habitación, la cual está a 20°C en su interior y el exterior está a 36°C , calcule la cantidad de calor que entra a la habitación a través de la ventana.
25. Un filamento de tungsteno emite electrones al aplicarse un voltaje de 10 kV ($E = 1,6 \times 10^{-8} \text{ erg}$). Calcule la longitud de onda del fotón irradiado por efecto de la interacción de los electrones con un material X.
26. Describa que ocurre cuando un haz de electrones choca con un cierto material.
27. Un haz de fotones pasa a través de un vidrio de 2 cm de espesor, transmitiéndose una intensidad de 60 % del haz original. Calcule el coeficiente de absorción lineal de los fotones en el vidrio (índice de refracción del vidrio = 1,79).