

eman ta zabal zazu



Universidad del
País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

OCW
OpenCourseWare

2018

INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DE LOS MATERIALES Y SUS PROPIEDADES (I)

Ane Miren García Romero
Nuria Monasterio Guisasola

TEMA 8: PROPIEDADES FÍSICAS: TÉRMICAS, ELÉCTRICAS, MAGNÉTICAS Y ÓPTICAS

OBJETIVOS

- Identificar las principales propiedades térmicas, eléctricas, magnéticas y ópticas de los diferentes tipos de materiales, relacionándolas con su estructura y su naturaleza:

NOCIONES SOBRE PROPIEDADES TÉRMICAS

- Entender como responde un material al calor
- Qué significan y cómo se usan la capacidad calorífica, el coeficiente de expansión lineal térmica y la conductividad térmica
- Identificar y explicar los conceptos de tensión térmica y choque térmico

NOCIONES SOBRE PROPIEDADES ELÉCTRICAS

- Relacionar el concepto de portadores eléctricos con el enlace atómico
- Identificar los aspectos básicos de la Teoría de bandas
- Conocer los aspectos fundamentales de la conducción eléctrica y su ligazón a los metales
- Conocer los aspectos fundamentales del aislamiento eléctrico y su relación con las cerámicos y polímeros
- Distinguir los principales fenómeno relacionados con los dieléctricos: la polarización, piezoelectricidad y otros fenómenos eléctricos
- Identificar los fundamentos de los semiconductores, y sus características

NOCIONES SOBRE PROPIEDADES MAGNÉTICAS

- Identificar los distintos comportamientos magnéticos
- Clasificar los materiales de acuerdo al magnetismo
- Conocer los aspectos básicos relevantes del comportamiento magnético de los materiales

NOCIONES SOBRE PROPIEDADES ÓPTICAS

- Conocer las distintas interacciones que tienen lugar entre la luz y los materiales
- Conocer a qué se deben los colores
- Conocer porqué unos materiales son transparentes y otros no
- Identificar las interacciones y efectos más importantes entre la luz y la materia: Luminiscencia, Fotoconductividad, Otras

La autoría de las imágenes que contiene este documento, así como las referencias bibliográficas, se incluyen en la última página.

TEMA 8: PROPIEDADES FÍSICAS: TÉRMICAS, ELÉCTRICAS, MAGNÉTICAS Y ÓPTICAS

ÍNDICE

8.1- Propiedades térmicas

8.1.1- La conductividad térmica

8.1.2- La capacidad calorífica

8.1.3- El coeficiente lineal de expansión térmica

8.1.4- Variación de propiedades con la temperatura

8.1.5- Tensiones térmicas

8.1.6- Choque térmico

8.2- Propiedades eléctricas de los materiales

8.2.1- Los portadores eléctricos

8.2.2- La teoría de las bandas en la conducción eléctrica

8.2.3- La conducción eléctrica en los metales

8.2.4- Algunos efectos prácticos de la conducción eléctrica en los metales

8.2.5- Los materiales dieléctricos

8.2.6- La polarización de los dieléctricos

8.2.7- Algunos efectos eléctricos en dieléctricos

8.2.8 Semiconductores

8.2.9 Superconductividad

8.3- Propiedades magnéticas

8.3.1- Algunas propiedades magnéticas fundamentales

8.3.2- Los átomos y el campo magnético

8.3.3- Tipos de magnetismo

8.3.4- El magnetismo de los materiales ferro- y ferri-magnéticos

8.3.5- La superconductividad

8.4- Propiedades ópticas

8.4.1- Interacción de la luz con la materia

8.4.2- Interacción de la luz con los metales

8.4.3- Interacción de la luz con sólidos no metálicos

8.4.4- Emisión de luz por parte de los materiales

OTROS RECURSOS

8.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

¿Como se comportan los materiales frente al “calor”?

- Pueden transmitir ese calor, o “impedirle el paso”
- Se “calientan”: Aumentan su temperatura
- Aumentan su tamaño: se expanden
- Pueden llegar a cambiar de estado o de fase
- Sus propiedades se modifican

8.1.1 LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La transmisión de calor se encuentra definida por una característica denominada Conductividad Térmica: Es la capacidad del material para transmitir el calor.

Elevada conductividad térmica → Buenos conductores

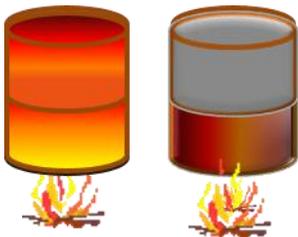


Figura 8.1: Dos materiales diferentes transmiten el calor de modo diferente (Autoría, ver últimas páginas)

¿Cómo se transmite el calor?: Desde el punto de vista atómico existen dos fenómenos capaces de transmitir el calor: El movimiento de los electrones, y los fonones.

TRANSMISIÓN DE CALOR POR ELECTRONES

Los metales y aleaciones metálicas mueven la energía térmica a través de los electrones: éstos se “mueven” rápida y fácilmente en el enlace metálico. Si existe un gradiente térmico, los electrones se mueven de la zona caliente a la fría llevando consigo el calor del punto caliente al punto frío → Son buenos conductores térmicos.

En el siguiente enlace se puede realizar una sencilla actividad para visualizar la transmisión de calor en materiales metálicos:

http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/thermal_electrical/metal_thermal.php

TRANSMISIÓN DE CALOR POR FONONES

Los fonones son trenes de ondas vibracionales cuantizadas. Los trenes de ondas conducen la energía térmica de las zonas calientes a la frías. Cuanto más “organizado” es el material, más fácil se transmiten → Los materiales amorfos transmiten mal los fonones → baja conductividad térmica.

Los fonones son responsables de la transmisión de calor en los materiales cerámicos y en los poliméricos. En los materiales metálicos también transmiten calor, pero es una contribución pequeña comparada con la de los electrones.

8.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

Curiosidad acerca de los fonones: Los fonones de longitud de onda larga dan lugar al sonido en los sólidos, de aquí el nombre fonón. Las vibraciones térmicas de los vidrios de las ventanas son fonones térmicamente excitados.

En el siguiente enlace se puede realizar una visualización del movimiento vibracional asociado a los fonones, y su relación con la transmisión de calor en sólidos ordenados:

http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/thermal_electrical/nonmetal_thermal.php

LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA A NIVEL MACROSCÓPICO

El calor es transportado desde las regiones de alta temperatura de una sustancia a las regiones de baja temperatura. ¿Cómo de rápido se transmite de unas zonas a otras?. En la figura 8.2 se observan dos materiales encajados entre un foco de calor a T1 y una zona más fría, a T2.

Cada uno de los materiales transmitirá el calor a distinta “velocidad”. Ésta viene definida por la ley de Fourier:

Ley de Fourier:

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

q = Flujo calor (J/m².s)

k = Conductividad térmica (J/m.K.s)

dT/dx = Gradiente de Temperatura

Ley de Fourier: La cantidad de calor que podemos transmitir en un tiempo dado a través de un material sometido a un gradiente de temperatura ΔT es directamente proporcional a una característica intrínseca del material, denominada conductividad térmica

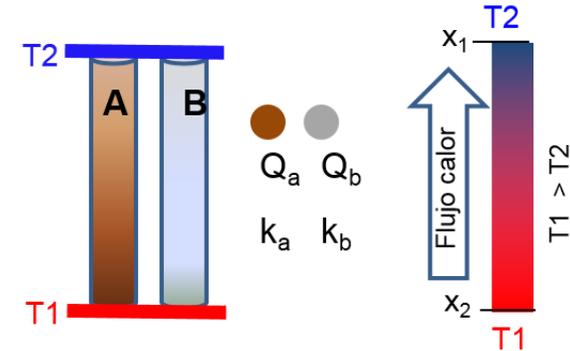


Figura 8.2: Dos materiales situados entre un foco frío y uno caliente transmiten el calor a distinta velocidad, dependiendo de sus respectivas conductividades térmicas (Autoría, ver últimas páginas)

Conductividad Térmica, **k**, se mide en: J*m⁻¹*K⁻¹*s⁻¹ = W*m⁻¹*K⁻¹

Los metales tienen elevada conductividad térmica por el libre movimiento de electrones que presentan.

Dado que en cerámicas y polímeros la transmisión de calor se realiza por fonones, cuanto más cristalino sea el polímero o la cerámica, mayor conductividad térmica tendrá: las vibraciones se coordinan mejor y los fonones se dispersan menos. Así, los vidrios presentan muy baja conductividad, mientras que las cerámicas cristalinas tienen importante conductividad.

8.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

La presencia de poros en las cerámicas (muy habitual) reduce la conductividad térmica ya que los fonones no pueden continuar bien a través de los poros.

Abajo, algunos valores de la conductividad térmica en materiales de uso común en industria.

Conductividad térmica típica de algunos materiales habituales

	MATERIALES	k (W * (m * K) ⁻¹)	Transferencia de Energía
k elevada	METALES		
	Aluminio	247	Por movimiento de electrones
	Acero	52	
	Wolframio	178	
	Oro	315	
k media	CERÁMICAS		
	Magnesia (MgO)	38	Por vibración de fonones
	Alúmina (Al ₂ O ₃)	39	
	Vidrio sosa-cálcico	1.7	
	Sílice (SiO ₂)	1.4	
k muy baja	POLÍMEROS		
	Polipropileno	0.12	Por vibración/ rotación de cadenas de moléculas
	Polyethylene	0.46-0.50	
	Polystyrene	0.13	
	Teflon	0.25	

AISLANTES TÉRMICOS

Los materiales que se usan para aislamientos térmicos tienen baja conductividad térmica. Los que se usan para temperaturas cercanas al ambiente suelen ser poliméricos. Para que el aislamiento sea bueno se suelen producir “espumas” con el polímero, como por ejemplo el poliestireno expandido que se ve en la figura 8.2, a la arriba. También se emplea la denominada “lana de roca” (figura 8.2, abajo), que consiste en fibras de vidrio (cerámica no cristalina) enmadejadas, de manera que hay mucho aire y huecos entre las fibras con el fin de incrementar la dificultad de transmisión del calor.



A elevada temperatura, por ejemplo para fabricar el aislamiento térmico de los hornos, se emplean materiales similares a la lana de roca, pero empleando fibras capaces de aguantar la temperatura que se requiera → Para temperaturas de 600°C ó 800°C se emplean fibras de sílice amorfa. Pero si la temperatura es muy elevada (por ejemplo 1400°C) se requieren fibras cerámicas de alúmina, o de otras cerámicas de elevado punto de fusión.

Figura 8.3: Dos aislantes térmicos habituales: Poliestireno expandido (arriba) y lana de roca (abajo) (Autoría, ver últimas páginas)

8.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

8.1.2 CAPACIDAD CALORÍFICA

Es la capacidad de un material para absorber energía térmica. Cuantitativamente, la capacidad calorífica de un material es la energía necesaria para aumentar 1K la temperatura de ese material.

Hay dos formas de medir la capacidad calorífica, a volumen constante, C_v (se da calor al material y no se permite que el material se expanda, el volumen se mantiene constante y aumenta la presión, además de la temperatura) y a presión constante, C_p (se da calor y el material se expande, además de subir la temperatura. La presión se mantiene constante. Es el modo más habitual de medirla, dado que nuestro ambiente mantiene una presión estable entorno a 1 atmósfera). La capacidad calorífica a presión constante es siempre mayor que la determinada a volumen constante.

C_p : Capacidad calorífica a presión constante.

C_v : Capacidad calorífica a volumen constante.

$$C_p > C_v$$

La capacidad calorífica depende de la temperatura. En el cero absoluto ($T=0K$) la capacidad calorífica es cero. La capacidad calorífica medida a volumen constante aumenta con la temperatura hasta alcanzar un valor constante: **$C_v=3R$** (R es la constante de los gases perfectos) **$=24,93 \text{ J/mol.K}$**

Cada material alcanza este valor $C_v=3R$ a una temperatura diferente. A la temperatura en que se alcanza el valor $C_v=3R$ se le denomina: **Temperatura Debye**. La mayoría de los materiales alcanzan este valor $C_v=3R$ a una temperatura muy inferior a 0°C .

Normalmente se emplea la capacidad calorífica presión constante ya que la mayoría de procesos industriales tienen lugar en estas condiciones. La capacidad calorífica se representa por la siguiente ecuación:

$$\text{capacidad calorífica } C = \frac{dQ}{dT}$$

← Energía almacenada (J/mol)
← Cambio de temperatura (K)

(J/mol-K)

La capacidad calorífica se mide en **unidades de energía / mol * K (Julios / mol * K)**. En realidad, a nivel de ingeniería se suele usar el calor específico en lugar de la capacidad calorífica.

EL CALOR ESPECÍFICO

El calor específico es el equivalente de la capacidad calorífica a presión cte., calculada por kg de material (es el resultado de dividir la capacidad calorífica por el peso atómico ó molecular del material). El calor específico tiene unidades típicas de **kJ / kg * K** .

8.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

Desde el punto de vista atómico:

Las ondas elásticas o fonones determinan esta propiedad: La energía se almacena en forma de vibraciones atómicas. A medida que T aumenta, también lo hace la media de energía de vibración atómica.

Los materiales que presentan elevada capacidad calorífica se pueden emplear para almacenar calor. Un ejemplo de ello son los tanques de agua caliente (el agua tiene muy elevada capacidad calorífica y mu bajo precio). Las paredes gruesas de las edificaciones antiguas, hechas de piedra (la piedra es un tipo de cerámica), almacenan gran cantidad de calor, con lo cual proporcionan inercia térmica a la vivienda: tardan mucho en calentarse y tardan mucho en enfriarse.

Se observa que c_p es bastante más elevado en polimeros que en otros materiales, se necesita más energía para aumentar la temperatura en una masa dada.



Es debido a su baja densidad, al bajo peso de los átomos en los polímeros. Si se calculase la energía almacenada por cada átomo, los valores de todos los materiales serían bastante cercanos

CALOR ESPECÍFICO DE DIVERSOS MATERIALES

	MATERIAL	c_p (J * (kg * K) ⁻¹ <i>T ambiente</i>
<i>c_p elevado</i>	POLIMEROS	
	Polypropylene	1925
	Polyethylene	1850
	Polystyrene	1170
	Teflon	1050
<i>c_p medio</i>	CERAMICAS	
	Magnesia (MgO)	940
	Alumina (Al ₂ O ₃)	775
	Glass	840
<i>c_p medio-bajo</i>	METALES	
	Aluminio	900
	Acero	486
	Tungsten	138
	Gold	128

8.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

MATERIALES PARA ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA

El almacenamiento de energía se emplea para almacenar la energía excedentaria en un proceso (o proveniente de fuentes naturales) para ser consumida cuando sea necesaria o conveniente.

La energía se puede almacenar en sus diversas variantes, como energía mecánica (embalses, mecanismos de cuerda, etc), como energía electroquímica (pilas y baterías), etc. También **se puede almacenar como energía térmica empleando la capacidad calorífica/calor específico de los materiales**. Se almacena así energía térmica (“calor”).

El ejemplo más típico son los tanques de agua caliente doméstico (los “termos”).

La energía térmica se almacena elevando la temperatura del material. Cuanto mayor sea la capacidad calorífica del material mayor cantidad de energía será capaz de almacenar.

Para almacenar “calor”, por tanto, se emplean materiales con buena capacidad calorífica. Dadas las características de los materiales existentes, normalmente es necesario emplear un

gran volumen de material para almacenar una cantidad de calor útil para cualquier propósito.

Por todo ello, los materiales que se emplean como almacenadores térmicos deben cumplir dos requisitos adicionales: deben tener bajo precio y una buena “densidad de almacenamiento térmico”.

La **DENSIDAD DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO** es la cantidad de energía térmica por unidad de volumen que el material es capaz de almacenar. Se calcula multiplicando el calor específico por la densidad del material.

Sus unidades son **$\text{J/m}^3 \cdot \text{K}$** .

Se emplea en vez del calor específico de los materiales, con el fin de optimizar el volumen del material.

Es habitual emplear el agua, el cemento, la arena y en general rocas, como materiales de almacenamiento térmico.

8.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

8.1.3 EXPANSIÓN TÉRMICA

Cuando se da energía térmica (calor) a los materiales → Se “calientan” (aumentan su temperatura) y **aumentan su tamaño, se expanden:**

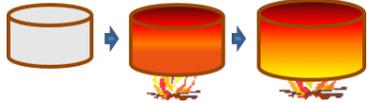
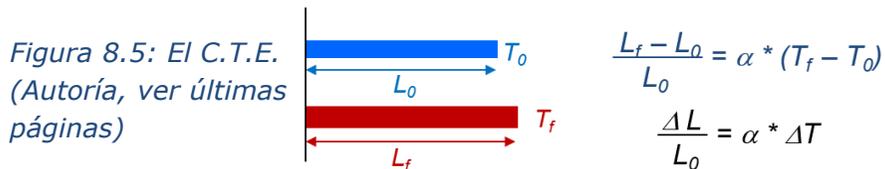


Figura 8.4: Materiales y calor (Autoría, ver últimas páginas)

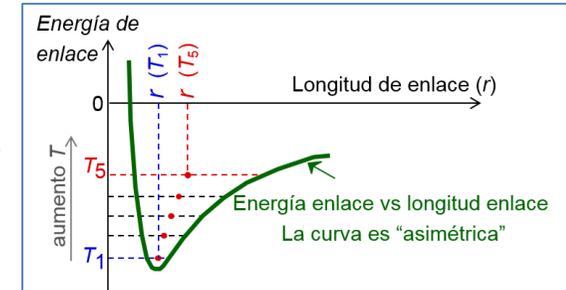
La expansión se mide mediante el denominado **coeficiente de expansión térmica lineal, α** , que consiste en la proporción que se expande/contrae el material por cada grado K o grado °C que cambia la T. Se mide en K^{-1} . A α también se le conoce por las siglas C.T.E., del inglés *coefficient of thermal expansion* = coeficiente de expansión térmica lineal



Desde una perspectiva atómica:

La media de la longitud del enlace aumenta con la T. La dilatación térmica se debe a la asimetría del pozo de la Energía potencial en el enlace atómico. **La energía de enlace y la distancia de enlace tienen diferente valor a distintas T** → La curva es “asimétrica”, tal como se ve en la figura 8.5. Así, según la T aumenta, también lo hace la distancia de enlace.

Figura 8.5: La expansión térmica de los materiales se debe a la asimetría de la curva de la energía de enlace atómico versus distancia de enlace atómico (Autoría, ver últimas páginas)



Además, debido a la forma de esta curva en los distintos tipos de enlaces, los materiales con enlaces fuertes tienen baja dilatación térmica mientras que los materiales con enlaces débiles presentan grandes dilataciones por efecto del calor (figura 8.6). Si la curva de enlace fuese simétrica, los materiales no se expandirían al calentarse.

Cuanto más fuerte es el enlace, menor es la asimetría de la curva. Las cerámicas tienen α muy bajo. Los polímeros tienen un α grande debido a la debilidad de los enlaces secundarios.

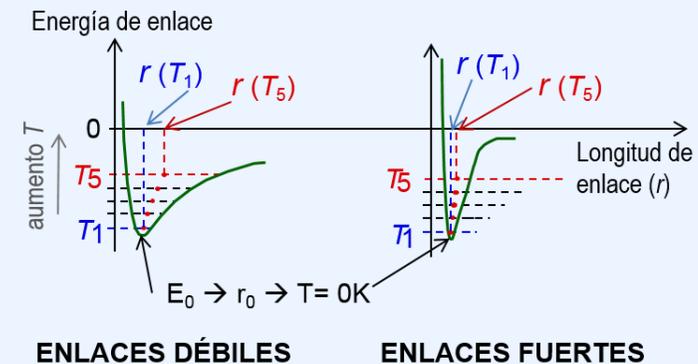


Figura 8.6: Los enlaces débiles presentan grandes dilataciones térmicas y fuertes pequeñas. (Autoría, ver últimas páginas)

8.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

Los materiales anisótropos pueden tener distinto coeficiente de dilatación térmica en distintas direcciones. Por ejemplo, la fibra de Carbono, cuando se eleva la temperatura se expande en la dirección radial mientras que se contrae en la dirección longitudinal.

Ejemplo de cálculo de la expansión térmica:

Un alambre de cobre de 15 m de largo se calienta de -9° a 40°C . ¿Cuánto cambiará su longitud?:

El coeficiente de dilatación térmica lineal del Cobre es: $\alpha_{\text{cu}} = 16,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (obviamente $\alpha_{\text{cu}} = 16,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

$$\Delta T = 40 - (-9) = 49 \text{ }^{\circ}\text{C} = 49 \text{ K}$$

$$\rightarrow \Delta l / l_0 = \alpha_{\text{cu}} \cdot \Delta T \rightarrow \Delta l = l_0 \cdot \alpha_{\text{cu}} \cdot \Delta T$$

$$\Delta l = 15 \cdot (16,5 \cdot 10^{-6}) \cdot 49 = 0,012 \text{ m}$$

Es decir, el alambre se expandirá 12 mm. La longitud final será 15,012 m.

Los componentes se expanden linealmente en todas direcciones, a partir de su centro másico. Es decir, si se tiene un aro como el de la figura 8.7 y se le da calor, la expansión conducirá a que el diámetro interior aumente. El resultado es como hacer una ampliación fotográfica, pero en 3D.

$$\Delta D_{\text{interno}} / D_{\text{interno}} = \alpha \cdot \Delta T$$

$$\Delta D_{\text{externo}} / D_{\text{externo}} = \alpha \cdot \Delta T$$

Si el citado aro estuviese hecho de la aleación de cobre del ejemplo anterior, y se calienta desde T ambiente hasta 100°C , el diámetro (tanto el externo como el interno) se expande de acuerdo al CTE del Cobre:

Al inicio:
 $D_{\text{interno}} = 10 \text{ mm}$
 $D_{\text{externo}} = 30 \text{ mm}$

Al final:
 $D_{\text{interno}} = 10,00165 \text{ mm}$
 $D_{\text{externo}} = 30,00495 \text{ mm}$

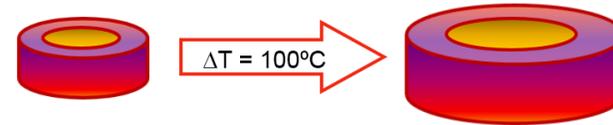


Figura 8.7: Un aro que se calienta se expande respecto de su centro de masas. (Autoría, ver últimas páginas)

El cambio de área A por cambio de temperatura en un sólido isotópico es proporcional a 2α , es decir:

$$\Delta A = 2 \alpha \cdot A \cdot \Delta T$$

Y el cambio en volumen V por cambio de temperatura en un cuerpo isotrópico es proporcional a 3α , es decir:

$$\Delta V = 3 \alpha \cdot V \cdot \Delta T$$

8.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA LINEAL DE DIVERSOS MATERIALES

	MATERIAL	α (10^{-6} K^{-1}) <i>T ambiente</i>	
C.T.E. elevado	POLIMEROS		<i>Los polimeros tienen un α grande debido a la debilidad de enlaces secundarios</i>
	Polipropileno	145-180	
	Polietileno	106-198	
	Poliestireno	90-150	
	Teflón	126-216	
C.T.E. medio	METALES		
	Aluminio	23.6	
	Acero	12	
	Wolframio	4.5	
	Oro	14.2	
C.T.E. bajo	CERAMICAS		<i>Las cerámicas tienen un α pequeño debido a los fuertes enlaces iónicos o covalentes</i>
	Magnesia (MgO)	13.5	
	Alúmina (Al ₂ O ₃)	7.6	
	Vidrio soda-cálcico	9	
	Sílice (crist. SiO ₂)	0.4	

8.1.4 VARIACIÓN DE PROPIEDADES CON LA TEMPERATURA

Cuando se suministra energía térmica a un material, ésta se almacena en forma de aumento de la vibración de los átomos. La medida de esta vibración es la temperatura.

Si se suministra la suficiente energía térmica se pueden dar procesos de difusión e incluso se puede llegar al cambio de fase (el material puede pasar de sólido → líquido → gas).

Las propiedades mecánicas varían también con la temperatura. En general,:

A baja T los materiales suelen ser lineales elásticos y frágiles.

Cuando la Temperatura aumenta la rigidez y la resistencia mecánica disminuyen, la ductilidad y la tenacidad aumentan.

A alta T son más elásticos (E menor), se deforman plásticamente y se reduce su Resistencia mecánica (Límite elástico y Resistencia a Tracción)

En el caso de las cerámicas, la temperatura en la que se observan estos cambios es muy elevada. En el caso de los polímeros estos cambios se observan a temperatura cercanas al ambiente.

8.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

REFRACTARIEDAD

Materiales refractarios son los que mantienen sus propiedades mecánicas a elevadas temperaturas con poca variación frente a las propiedades a temperatura ambiente.

La refractariedad está ligada al enlace químico y al punto de fusión. Las cerámicas cristalinas son altamente refractarias, ya que no presentan ninguna ductilidad incluso a T cercanas a su punto de fusión, el cual se encuentra por encima de los 1000°C. Además, mantienen la resistencia mecánica y la rigidez casi sin pérdida hasta una temperatura altísima, cercana a la fusión.

Se llaman refractarios los materiales que se emplean para revestir el interior de los hornos, los cuales suelen ser de naturaleza cerámica.

8.1.5 TENSIONES TÉRMICAS

Cuando los componentes están sometidos a cambios de temperatura, se dilatan y se contraen de acuerdo a su coeficiente de dilatación térmica. Si los componentes se encuentran “encajados”, sin la holgura necesaria, los cambios dimensionales van a provocar tensión mecánica, bien de tracción bien de compresión. Por esta razón, los suelos y las carreteras se realizan dejando “juntas de dilatación” cada un cierto número de metros:

¿Cómo se conoce cómo de grande va a ser esa tensión?: La deformación del material debido al cambio de T será:

$$\varepsilon = \alpha * \Delta T$$

Mirando el gráfico Tensión-Deformación se puede conocer cómo será la tensión térmica provocada por la expansión impedida (figura 8.8):

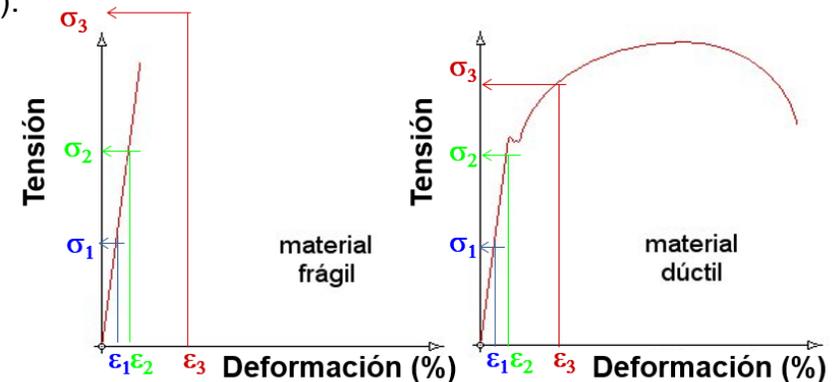


Figura 8.8: Nivel de tensión debida a una expansión/contracción térmica impedida. (Autoría, ver últimas páginas)

8.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

Dependiendo del cambio de T y del coeficiente de dilatación térmica se puede tener una deformación pequeña (por ejemplo ε_1), que puede ser poco relevante a nivel mecánico (σ_1).

Pero, habitualmente la expansión/contracción suele ser muy superior a la que los materiales son capaces de aguantar en el rango elástico, por lo cual la tensión excede de la admisible (ε_3 , σ_3).

Si el material es frágil, las tensiones térmicas son **CRÍTICAS** ya que el componente fallará imprevistamente, sin deformación alguna. En estos casos, como el material es lineal elástico en todo su rango, podemos calcular la tensión a que se someterá debido a un cambio térmico dado.

Puesto que $\sigma = E * \varepsilon$ y $\varepsilon = \alpha * \Delta T$ $\rightarrow \sigma = E * \alpha * \Delta T$

TENSIÓN TÉRMICA en un material frágil $\rightarrow \sigma = E * \alpha * \Delta T$

Por tanto, en un material frágil:

- Cuanto mayor sea el coeficiente de dilatación térmica \rightarrow mayor será la tensión.
- Cuanto más rígido sea el material \rightarrow mayor será la tensión.

Si la resistencia a tracción del material es $\sigma = \sigma_f \rightarrow$ **La fractura**

ocurrirá cuando: $\Delta T = \sigma_f / E * \alpha$

Si el material es dúctil, cuando el gradiente de temperaturas es grande es muy habitual que las tensiones puedan acabar en el rango **PLÁSTICO**, lo cual conduce a la fractura y fallo tras varios ciclos de calentamiento-enfriamiento, pero no conduce a una fractura frágil imprevista.

8.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

8.1.6 CHOQUE TÉRMICO

El choque térmico es la fractura repentina que ocurre debido a un enfriamiento rápido. Se debe a tensiones que se originan dentro del material. Por ello, el choque térmico es casi exclusivo de materiales frágiles (los materiales dúctiles se suelen deformar en vez de fracturarse).

Cuando un material se somete a un cambio de T se dilata/contrae de acuerdo a su C.T.E.

Imagínense dos componentes gruesos iguales, uno hecho de Aluminio y otro hecho de vidrio, ambos en un horno a alta temperatura (por ejemplo 250°C). Se extraen del horno y se arrojan a un contenedor con agua a T ambiente. ¿Qué ocurre?: **En ambos casos la superficie exterior de los componentes, en contacto con el agua, se pone rápidamente a la T del agua.**

¿Y en el interior de los componentes qué ocurre?

El interior se enfriará más rápido o más lento dependiendo de la conductividad térmica, k, del material.

Partiendo de la suposición de que a ambos materiales se les ha suministrado en el horno la misma cantidad de calor (que deberá ser evacuada), la temperatura en el interior de cada material transcurrido un tiempo dado (por ejemplo 1 segundo) dependerá

de la velocidad de evacuación del calor que permita el material, que a su vez dependerá de su conductividad térmica, k:

$$\text{Ley de Fourier: } T_{\text{ext}} - T_{\text{int}} = Q \cdot x / k$$

*x=espesor del componente; Q es el flujo de calor evacuado (J/m²*s)*

Para una misma cantidad de calor a evacuar la temperatura en el interior de cada material dependerá de la velocidad de evacuación de calor que permita el material, que a su vez dependerá de su conductividad térmica, k.

Es decir, la temperatura en el interior del componente de Aluminio (gran conductividad térmica, k=247 J/m*K*s) se acercará a la del exterior. En el caso del componente de vidrio (baja conductividad térmica, k=1,7 J/m*K*s) la temperatura interior será muy superior a la exterior.

De hecho, si ambos componentes hubiesen almacenado la misma cantidad de calor en el horno y tuviesen la misma forma y dimensiones, el gradiente de temperatura que presentaría el vidrio en su interior sería 145 veces mayor que el del componente de Aluminio (proporcional a sus conductividades térmicas).

Los materiales metálicos, en general tienen elevada conductividad térmica, por lo cual cuando son sometidos a choque térmico evacúan el calor rápidamente y no presentan grandes gradientes entre exterior e interior.

8.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

Por el contrario, las cerámicas y vidrios presentan baja conductividad térmica por lo cual mientras la superficie se enfría rápidamente el interior se encuentra a la temperatura del horno. Los átomos en la superficie exterior se contraerán fuertemente:

La contracción de la superficie $\epsilon_m = \alpha_m * \Delta T$ ($\Delta T = 250^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}$)

En el interior del componente, la situación para el metal y la cerámica es muy distinta: El metal se enfría rápido, el interior se contrae a la vez que el exterior. El interior de la cerámica se mantiene a T cercana a 250°C , por lo cual no se contrae.

Esto produce una tensión térmica, ya que los enlaces de los átomos en el exterior se intentan contraer, mientras que los del interior intentan permanecer inalterados. Esta tensión térmica será:

$$\sigma = E * \alpha * \Delta T$$

El gradiente crítico de temperatura para que el material se fracture (si la resistencia a tracción del material es $\sigma = \sigma_f$) será:

$$\Delta T = \sigma_f / E * \alpha$$

Es decir, si en algún momento se genera un gradiente térmico entre el interior del material y el exterior del material que sea superior a éste, el componente se fracturará. Que se alcance este gradiente depende de la ley de Fourier: $T_{\text{ext}} - T_{\text{int}} = Q * x / k$

$$\rightarrow \Delta T = \sigma_f / E * \alpha = Q * x / k$$

Reordenando la igualdad anterior se puede definir un factor que depende únicamente de las propiedades del material y que proporciona una clara indicación de su resistencia al choque térmico:

$$Q * x = \frac{k * \sigma_f}{E * \alpha}$$

Es decir, el flujo de calor que se puede evacuar por el material en un espesor dado sin que el componente se fracture depende de la relación $k * \sigma_f / (E * \alpha)$, que denominaremos con las siglas **FCT**. Esta relación FCT indica, por tanto, la resistencia al choque térmico del material.

- ♣ **Cuanto mayor sea FCT → mayor es la resistencia al choque térmico del material.**
- ♣ **Cuanto mayor sea la conductividad térmica y la resistencia mecánica del material → mayor es su resistencia al choque térmico.**
- ♣ **Cuanto mayor sea la rigidez y el coeficiente de expansión térmica del material → menor será su resistencia al choque térmico.**

Para una cantidad de calor a evacuar dada, **Q**, el espesor se transforma en un condicionante crítico ya que **Q = FCT / x**.

8.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

Es decir, si el material tiene baja resistencia a choque térmico (bajo FCT), para que no falle por choque térmico se requieren componentes con espesores muy delgados.

Si un componente tiene buena resistencia a choque térmico, se podrán tener espesores más gruesos sin que se fracture por cambios bruscos de temperatura.

MATERIALES RESISTENTES AL CHOQUE TÉRMICO

Un desarrollo paradigmático de resistencia al choque térmico son las placas vitrocerámicas que se emplean en las cocinas domésticas. Estas placas soportan condiciones extremas de choque térmico dado que se calientan y enfrían a gran velocidad, soportan ocasionalmente derrames de líquidos a temperatura diferente, así como la colocación de objetos fríos en su superficie cuando ésta se encuentra a elevada temperatura. Están fabricadas de frágiles cerámicas, cuya resistencia mecánica no suele alcanzar los 100 MPa y cuya conductividad térmica está entorno a $0,8-1,05 \text{ J/m}^2\text{K}^2\text{s}$, no muy alejada de la que presenta el vidrio citado en el ejemplo anterior. Su módulo de elasticidad es el habitual en vidrios (entorno a 60-80 GPa). Su resistencia al choque térmico se debe a su excepcionalmente bajo coeficiente de dilatación térmica, cercano al cero ($0,3-0,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). Obviamente, dado que el choque térmico tiene su origen en las tensiones térmicas causadas por la contracción del material, si éste no se contrae, no existe tensión.

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

8.2.1 LOS PORTADORES ELÉCTRICOS

La carga eléctrica (y su movimiento) es la responsable de las propiedades eléctricas de un material. Existen dos tipos de cargas eléctricas: **electrones e iones**. Los materiales pueden transmitir la carga eléctrica (electrones o iones) dependiendo de tipo de enlace entre sus átomos:

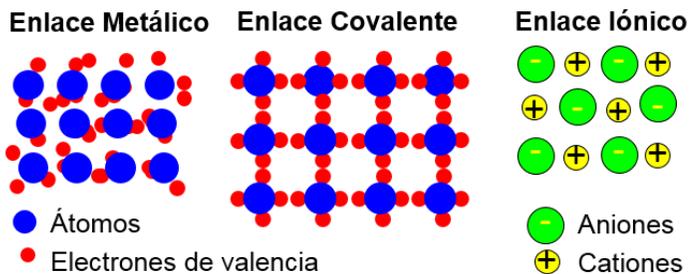


Figura 8.9: Materiales según su enlace y las cargas eléctricas que lo conforman. (Autoría, ver últimas páginas)

Enlace **Metálico** → los electrones de valencia de todos los átomos que componen el sólido están compartidos por todos los átomos del material en una “nube electrónica” en la cual es fácil el movimiento de los electrones → **MATERIALES CONDUCTORES**

Enlace **Covalente** → los electrones están compartidos por un par de átomos. Alto grado de localización electrónica y gran dificultad de movimiento por el material. Los enlaces covalentes deben romperse para que los electrones se muevan → **MATERIALES SEMICONDUCTORES Y AISLANTES**

Enlace **Iónico** → El material está formado por iones positivos y negativos situados formando una red neutra, unidos mediante fuertes interacciones electrostáticas.

→ Los electrones no pueden moverse.

→ En estado sólido, los iones ocupan posiciones fijas y tampoco pueden moverse.

Los sólidos iónicos son → **MATERIALES AISLANTES**

Si los sólidos iónicos se funden, en el estado líquido los iones tienen movilidad y son excelentes conductores. Los materiales con enlaces iónicos transportan la carga mediante el movimiento de iones, no de electrones.

MOVIMIENTO DE LA CARGA ELÉCTRICA

El movimiento de la carga eléctrica en el interior de un material conductor (sólido metálico o líquido iónico) tiene lugar de la siguiente manera (a nivel nano-micro):

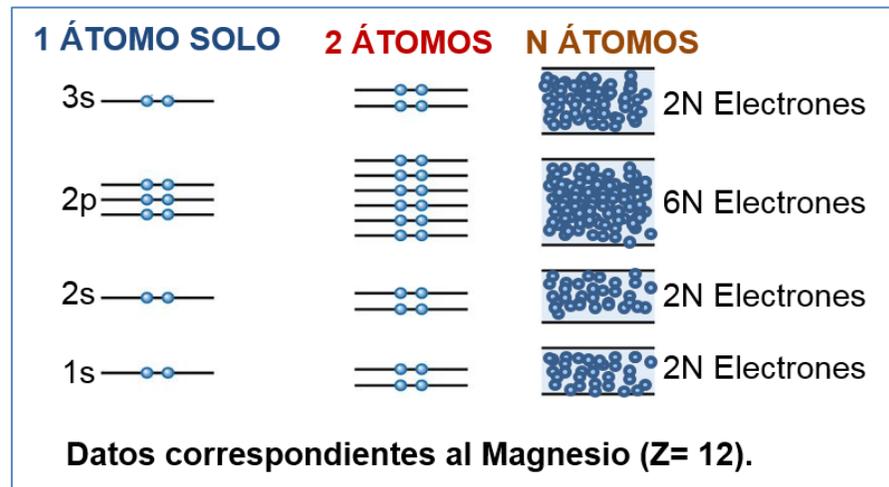
- ❖ En ausencia de un campo eléctrico externo: los portadores de carga se mueven en movimiento aleatorio, sin dirección espacial preferente, colisionando con el entorno.
- ❖ En presencia de un campo eléctrico externo, E : la carga eléctrica se desplaza por el material en una dirección resultante paralela a E .

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

En su movimiento, los portadores de carga colisionan con el entorno y por tanto se desvían de su dirección, a la cual retornan por efecto del campo eléctrico. Los obstáculos que se encuentran los portadores de carga (los electrones) son:

- **núcleos de átomos**
- **límites de grano**
- **defectos de todo tipo que se encuentran en la red cristalina**

Los electrones, desviados de su trayectoria por átomos o defectos con los que chocan, llevan un camino irregular a lo largo del conductor. La velocidad media de los portadores se llama “velocidad de deriva” v .



8.2.2 LA TEORÍA DE LAS BANDAS EN LA CONDUCCIÓN ELÉCTRICA

ÁTOMO AISLADO: Cuando un átomo está aislado, los electrones se encuentran orbitando entorno al núcleo en orbitales que implican niveles energéticos concretos, identificados por los **números cuánticos**:

Los electrones ocupan los orbitales de acuerdo al Principio de exclusión de Pauli (con un máximo de dos electrones en cada orbital), tal como se ejemplifica en la figura 8.10, izda.

SÓLIDO MACROSCÓPICO: formado por una ingente cantidad de átomos (una cantidad de materia correspondiente al peso atómico de cualquier material contiene el número de Avogadro, $\text{Å} = 6,023 \times 10^{23}$, de átomos) \rightarrow los correspondientes niveles electrónicos orbitales de los átomos se superponen: N orbitales **1s** se superponen entre ellos, N orbitales **2s** se superponen entre ellos, N orbitales **2p**, N orbitales **3d**.

La superposición de orbitales conduce a un ensanchamiento de los niveles energéticos asociados a los mismos, produciéndose unas “**bandas energéticas**” de una anchura concreta (cuantizada), tal como muestra la figura 8.10, dcha., correspondiente a N átomos.

←
Figura 8.10: Esquema del llenado de orbitales con electrones en el magnesio. (Autoría, ver últimas páginas)

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

Los electrones se sitúan en estas bandas. Cada banda tiene capacidad para $2N$ electrones de los orbitales correspondientes. Los electrones empiezan llenando las bandas de menor nivel energético, como ocurre con los orbitales de los átomos aislados:

Las bandas de menor energía se llenan primero, son muy estables. Los electrones van completando bandas, cada vez de mayor energía. Las bandas internas son muy estables y no presentan interacciones eléctricas con la materia.

La última banda de orbitales en la que entran electrones se denomina: **banda de valencia**

La primera banda de orbitales electrónicos que contenga espacio libre para admitir electrones (en realidad son niveles de energía vacíos, no ocupados) se denomina:

banda de conducción

- ▶ Para que haya conducción eléctrica debe haber movimiento de cargas a través del sólido.
- ▶ Para que los electrones se transporten de un sitio a otro debe haber espacio libre en una banda a la cual puedan acceder.
- ▶ Las bandas internas llenas **NO colaboran al** transporte de carga eléctrica pues no hay posibilidad de excitar un electrón

a otro nivel vacío. Es un salto energético excesivamente grande, por lo cual no tiene lugar.

- ▶ La Banda de Valencia es la única que **puede colaborar en el transporte de electricidad**, y es la que **determina las propiedades eléctricas del material**:

Si la Banda de Valencia está llena → los electrones pueden ser excitados a una banda superior, la cual necesariamente estará vacía (caso del magnesio, ver figura 8.11).

Si la Banda de Valencia no está llena → los electrones pueden ser excitados a niveles energéticos superiores (vacíos) dentro de la misma banda, o también a otra banda superior (necesariamente vacía). Este sería por ejemplo, el caso del Sodio. El Sodio cuenta con 1 electrón menos que el Magnesio, por lo cual la banda de valencia es, así mismo, banda de conducción, dado que tiene espacio energético libre en el cual los electrones pueden “moverse” (Figura 8.11).

Para que haya conducción eléctrica se debe dar un aporte de energía que “excita” a los electrones de la banda de valencia hasta los niveles energéticos de la banda de conducción. La fuente de energía adicional puede ser la excitación térmica, la aplicación de un potencial eléctrico externo, u otros fenómenos, como se verá más adelante. Una vez excitados a la banda de conducción, los electrones podrán transportar la carga eléctrica.

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

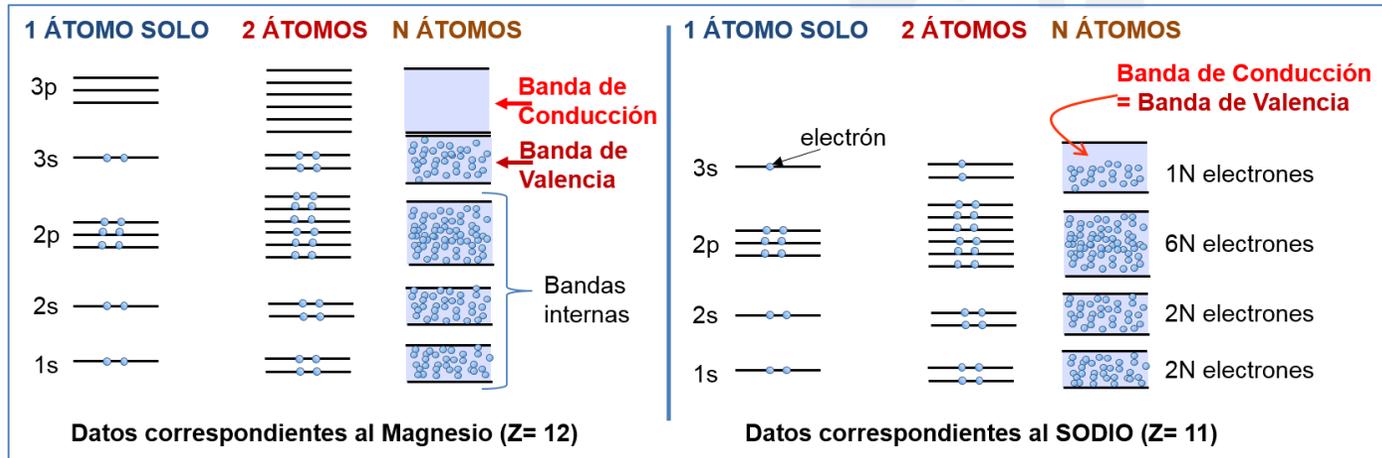


Figura 8.11: Esquema de la teoría de bandas aplicada al magnesio y al sodio. (Autoría, ver últimas páginas)

La figura 8.12 dcha. esquematiza la estructura de bandas del diamante.

El diamante es Carbono en una específica estructura cristalina cúbica, para lo cual los orbitales de su último nivel energético (el orbital 2s y los

En el caso de los metales, la banda de valencia suele estar semillena y los electrones son excitados muy fácilmente **dentro de la misma banda** a los niveles energéticos libres. Los que tienen la banda de valencia llena, presentan una banda de conducción vacía solapada con la banda de valencia (caso del Magnesio).

Cada nivel energético dentro de la banda se llama **ESTADO**. En los materiales metálicos hay muchos estados energéticos disponibles en la última banda.

La cantidad de energía que se requiere suministrar a un electrón para pasar a un estado energético superior es muy pequeña. Estos materiales son **CONDUCTORES** eléctricos.

En otros casos, la “distancia energética” entre la banda de valencia y la siguiente banda vacía disponible es muy grande.

tres orbitales 2p) se modifican formando 4 orbitales equivalentes energéticamente. A esta situación se le denomina “hibridación de orbitales tipo sp^3 ”. Cuando se tiene un gran número de átomos los orbitales sp^3 se agrupan en dos bandas, la de valencia y la de conducción.

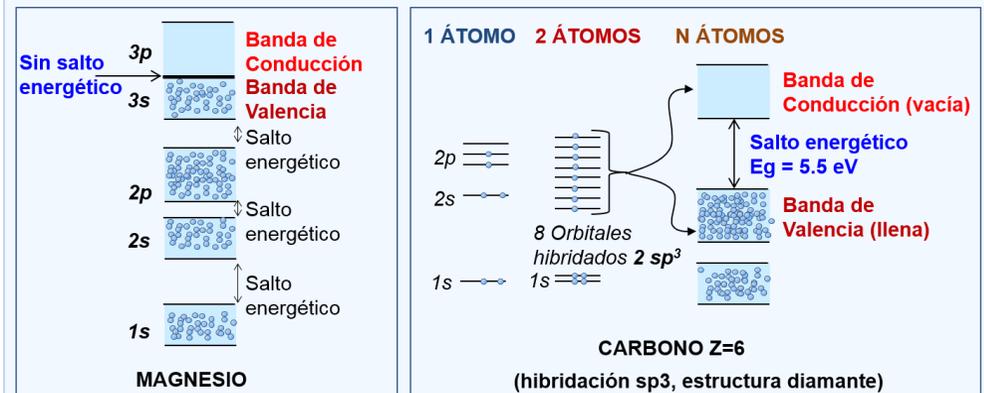


Figura 8.12: Esquema de la teoría de bandas aplicada al magnesio y al Carbono (diamante). (Autoría, ver últimas páginas)

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

La banda de valencia se completa con los electrones del Carbono, y la banda de conducción está vacía. La distancia energética entre la banda de valencia y la de conducción es muy grande y se requiere gran energía para mover los e^- a esta banda.

Los materiales dieléctricos (aislantes) y semiconductores según la teoría de bandas:

→ “distancia energética” entre la banda de valencia y la siguiente banda vacía disponible es muy grande → el suministro de energía que habría que dar a los electrones para “saltar” de la banda de valencia a la de conducción no se puede conseguir sin gran aporte energético

En estos casos, la energía necesaria para que el electrón salte a la banda de conducción no se puede conseguir ni con grandes campos eléctricos ni con grandes temperaturas.

Estos materiales son **AISLANTES ELÉCTRICOS**, también llamados **DIELÉCTRICOS**

El diamante es un aislante eléctrico porque la distancia entre la banda de valencia y la de conducción es de 5,5 eV, un valor energético muy grande que no se consigue con un fuerte campo eléctrico, ni elevando la temperatura.

Hay una situación intermedia. Existen algunos materiales cuyas estructuras de enlace presentan un salto energético entre la banda de valencia y la de conducción no desdeñable, pero posible conseguirse mediante el empleo de campos eléctricos de cierto nivel de voltaje, y/o elevando la temperatura del material.

Estos materiales se denominan **SEMICONDUCTORES**. Forman parte de este grupo un número relativamente pequeño de compuestos, tal y como se verá más adelante.

Los materiales, de acuerdo al salto energético entre la banda de valencia y la de conducción

Los conductores

- solapadas la banda de valencia y la de conducción
- Los electrones tienen “espacio energético” para moverse sin problemas con un suministro energético prácticamente despreciable.
- En presencia de un campo eléctrico se produce la conducción eléctrica.

Los aislantes eléctricos

- Escalón energético entre la banda de valencia y la de conducción, $E_g > 4$ eV.
- Este nivel de energía no se puede obtener mediante campos eléctricos ni elevación de la temperatura → no conducen la electricidad.

Los semiconductores

- Escalón energético entre la banda de valencia y la de conducción, $E_g < 4$ eV (generalmente $< 2,5$ eV).
- Este escalón puede ser superado por los electrones mediante campos eléctricos de cierto voltaje, o mediante el aumento de la temperatura.

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

8.2.3 LA CONDUCCIÓN ELÉCTRICA EN LOS METALES

En su movimiento por el material, las cargas eléctricas **colisionan** con su entorno:

- La red de **núcleos atómicos** representa un obstáculo para los electrones. Los núcleos, además, vibran entorno a su posición de equilibrio. Estas vibraciones aumentan con la temperatura.
- Las **imperfecciones de la red cristalina**, tales como defectos puntuales (impurezas, vacantes), defectos de línea (dislocaciones) y defectos de superficie (fronteras de grano, límites de la muestra, maclas,...) representan también obstáculos para el movimiento de los electrones.
- El **resto de las cargas eléctricas** que se mueven a la vez, ponen dificultades al movimiento.

Las **colisiones** se resisten al movimiento libre de la carga eléctrica y **limitan su velocidad** hasta cierto valor máximo, v_m

El tipo y número de colisiones depende, por tanto, de la estructura cristalina del material y de la temperatura. Se trata de una propiedad intrínseca del material denominada:

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA ρ . Se mide en $\Omega \cdot m$. La resistividad de los metales se debe a dos componentes distintos, uno térmico y otro residual:

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

Componente térmico, α → Las vibraciones de los núcleos de los átomos alrededor de las posiciones de equilibrio. Este componente aumenta con la temperatura (esquemático en la figura 8.13).

Residual → Choque de los electrones con impurezas, dislocaciones y otras imperfecciones cristalinas. Este componente es independiente de la temperatura. Dos tipos importantes de “imperfecciones” que afectan a la resistividad, aumentándola en gran medida:

- **ALEACIONES:** Las aleaciones consisten básicamente en la presencia de átomos en solución sólida, impurezas, en el material base. Al alear un metal con otros metales producimos distorsiones en la red cristalina y/o producimos fases secundarias. Esto va a aumentar la resistividad eléctrica del material base en gran medida.
- **DEFORMACIÓN EN FRÍO:** Cuando se deforma en frío un material producimos estructuras tensionadas, en posiciones forzadas, con gran distorsión de la red cristalina y apilamiento de dislocaciones debido a procesos de deformación en frío. Ello conduce a un aumento de la resistividad eléctrica.

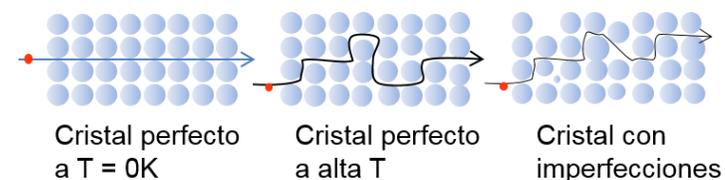


Figura 8.13: Obstáculos a la conducción eléctrica en un cristal metálico. (Autoría, ver últimas páginas)

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN LOS METALES

La conductividad eléctrica es la inversa de la resistividad. Se simboliza con la letra griega σ , la misma que se usa para definir una tensión mecánica.

$$\sigma = 1 / \rho$$

Se mide en $(\Omega \cdot m)^{-1}$. Los valores de conductividad en los distintos tipos de materiales se encuentran en los siguientes rangos:

Material tipo	Metal	Semiconductor	Aislante
Conductividad eléctrica $(\Omega \cdot m)^{-1}$	10^7	$10^{-6} - 10^4$	$10^{-10} - 10^{-20}$

Los factores que afectan a la conductividad son los mismos que afectan a la resistividad: La temperatura; las imperfecciones de la red cristalina; el procesamiento y endurecimiento del material.

8.2.4 ALGUNOS EFECTOS PRÁCTICOS DE LA CONDUCCIÓN ELÉCTRICA EN LOS METALES

Las leyes de Ohm

Para visualizarlo se usa la figura 8.14: Un conductor de longitud L , sección A y resistividad eléctrica $\rho \rightarrow$ **la resistencia eléctrica total** que ofrece al movimiento de la corriente eléctrica es $R = \rho \cdot L / A$

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 ello es ΔV (ley de Ohm) $\rightarrow \Delta V = I \cdot R$

El efecto Joule

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): Energía perdida = $R \cdot I^2 \cdot t$**

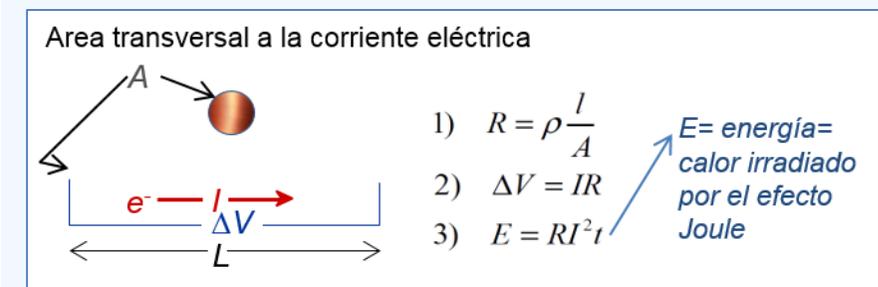


Figura 8.14: Las leyes de Ohm y el efecto Joule. (Autoría, ver últimas páginas)

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

EL EFECTO DE THOMSON

Un material conductor eléctrico expuesto a diferente temperatura en sus extremos (figura 8.15) espontáneamente produce una diferencia de potencial entre esos extremos. La diferencia de potencial depende de la diferencia de temperatura: los electrones se mueven en sentido contrario al de la temperatura, precisamente para transportar calor del punto caliente al frío.

Cada material producirá diferente diferencia de potencial, dependiendo de su resistividad.

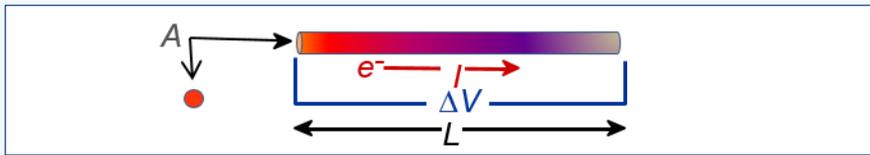


Figura 8.15: El efecto Thomson. (Autoría, ver últimas páginas)

EL EFECTO DE PELTIER-SEEBECK para “andar por casa”

Este efecto fue descubierto de manera independiente por dos científicos, Seebeck y Peltier, por lo cual tomó el nombre de ambos. También se denomina efecto termoeléctrico.

Dos conductores distintos sometidos al mismo gradiente de temperatura entre sus extremos presentan una diferencia de potencial diferente en cada uno. Si ahora los unimos por un extremo se genera una diferencia de potencial neta entre

ambos. Es decir, se produce electricidad. Esta diferencia de potencial dependerá de:

- la naturaleza de ambos conductores
- del gradiente de temperatura aplicado entre los dos extremos.

La aplicación práctica de este efecto más empleada industrialmente son los **TERMOPARES**:

Los termopares son elementos para medir la temperatura, habitualmente empleados en hornos y en general para el control de temperatura de procesos industriales. Consisten en dos hilos conductores de distinta naturaleza que se unen por un extremo y por el otro extremo se conectan a un voltímetro, tal como se muestra en el esquema de la figura 8.16.

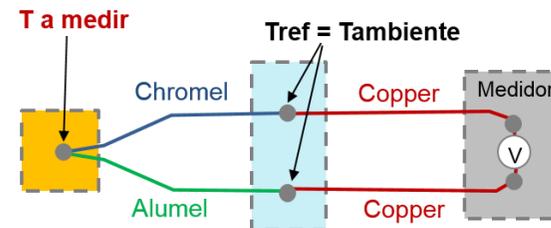


Figura 8.16: Esquema de un termopar (izda). Fotografía de un termopar real, tipo K (dcha.). (Autoría, ver últimas páginas)

El extremo unido del termopar se usa para determinar la temperatura que se requiera conocer, mientras que el otro extremo de los dos cables se encuentra a una temperatura conocida (T ambiente), conectado a un voltímetro.

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

El voltaje producido depende de la temperatura y de la naturaleza de los dos cables.

Hay diversos tipos de termopares, formados por hilos de distintas aleaciones. Cada tipo es adecuado para distintos rangos de T. Los termopares de cada tipo se denominan con letras del alfabeto. Hay termopares tipo K, tipo T, tipo R, etc. Cada tipo está fabricado con hilos de aleaciones distintas.

El voltaje producido depende de la temperatura y de la naturaleza de los dos cables. En los termopares tipo K, formados por un hilo de aleación Chromel (Niquel-Cromo) y otro hilo de Alumel (Niquel-Aluminio), cuando $T_1=300^\circ\text{C}$ (T_{ref} es T ambiente), el $\Delta V=12,2\text{mv}$. L

Los lectores de termopares son voltímetros que se encuentran calibrados para dar directamente la lectura de la temperatura en vez del voltaje. Cuando se emplean termopares se debe tener siempre en cuenta el tipo de termopar que se está empleando, ya que un mismo voltaje significa diferente temperatura en distintos tipos de termopar.

La gráfica de la figura 8.17 muestra la relación Temperatura-voltaje de los tipos de termopares más comunes. Las conexiones de los termopares presentan configuraciones con códigos de colores para distinguir el tipo de termopar de que se trata..

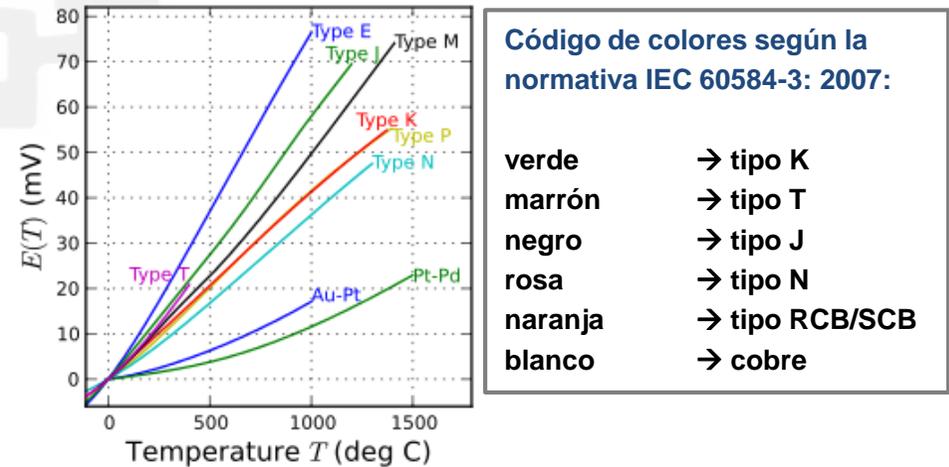


Figura 8.17: Relación entre voltaje y temperatura para distintos tipos de termopares. Código de colores de los termopares según norma en vigor (Autoría, ver últimas páginas)

Estos códigos están normalizados, tal como se muestra en la citada figura.

Para unir el termopar al lector que mide los milivoltios se emplean los denominados “cables de compensación”. Hay distintos tipos de cables para distintos tipos de termopares. También están catalogados por colores.

El código correspondiente a tres normativas de uso habitual se puede encontrar en Wikipedia:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple>

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

8.2.5 LOS MATERIALES DIELECTRICOS

Aquellos materiales en que la estructura de bandas presenta una banda de valencia llena, muy alejada energéticamente de la banda de conducción, son materiales aislantes eléctricos, también llamados dieléctricos.

Estos materiales corresponden a enlaces iónicos o covalentes con un enorme escalón energético. El “*gap*” es tan grande que los electrones no pueden ser excitados para el transporte o conducción de la carga eléctrica.

Los materiales con estas características corresponden a **cerámicas iónicas**, y a algunas cerámicas covalentes. Los **polímeros** también son dieléctricos, presentan enlaces covalentes y además su falta de estructura ordenada dificulta el transporte de electrones, por lo cual son excelentes aislantes eléctricos.

LOS AISLANTES POLIMÉRICOS

Los polímeros se emplean como aislantes eléctricos a temperaturas poco elevadas.

Los aislamientos en viviendas (cableados, interruptores, etc.) son generalmente poliméricos. Para ello, es importante que su resistividad sea elevada. La resistividad eléctrica en un polímero se reduce cuando se adicionan partículas iónicas,

precipitados, impurezas o fibras conductoras en la matriz polimérica. En estos casos, los iones migran a la superficie del polímero, atraen la humedad y ésta disipa la electricidad estática (materiales protectores para las descargas eléctricas)

En ocasiones, sin embargo, interesa emplear polímeros en aplicaciones donde sería deseable tener buena conductividad eléctrica (por ejemplo, para conducir descargas eléctricas de rayos en superficies expuestas a intemperie). Para mejorar la conductividad eléctrica se pueden añadir partículas iónicas cargadas, fabricar composites con fibras de carbono, fibras metálicas o fibras recubiertas de metal. También se puede dopar los materiales cuando están siendo sintetizados, de manera que se incluyan átomos con exceso o déficit de electrones. No obstante, este tipo de materiales no son habituales y la inmensa mayoría de polímeros son aislantes eléctricos.

LOS AISLANTES IÓNICOS: CERÁMICAS

Los materiales iónicos pueden transmitir la carga eléctrica por movimiento de iones, no por movimiento de electrones. Para ello, el material debe estar en estado líquido. En estado sólido ello no es posible, excepto de manera muy limitada a altísimas temperaturas, por difusión. Dado que la movilidad de los iones es varios órdenes de magnitud menor que la de los electrones, la conductividad eléctrica iónica es muy pequeña. En estos materiales, **las impurezas y vacantes** aumentan la conductividad eléctrica iónica:

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

- a) Las impurezas pueden también difundirse y ayudar al movimiento de los iones (y de la corriente eléctrica)
- b) Las vacantes son necesarias para la difusión sustitucional de los iones

El **aumento de la temperatura** favorece la difusión, aumenta el número de vacantes y, por tanto, la conductividad iónica. No obstante, la inmensa mayoría de las cerámicas habituales, todas ellas con impurezas y vacantes, en estado sólido son aislantes eléctricos.

Generalmente se emplean cerámicas iónicas como aislantes eléctricos cuando la temperatura, la intensidad o el campo eléctrico son elevados (torres de alta tensión, electrónica y electricidad de potencia).

8.2.6 LA POLARIZACIÓN EN DIELECTRICOS

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**.

El resultado final en todo el material es la formación de un número de dipolos dado por unidad de volumen, z → **polarización del dieléctrico**.

La moléculas covalentes y los compuestos iónicos también pueden polarizarse:

→ En las moléculas, los átomos se distancian, alineándose con el campo eléctrico.

→ En los compuestos iónicos alinean los átomos electropositivos en una dirección y los electronegativos en la opuesta

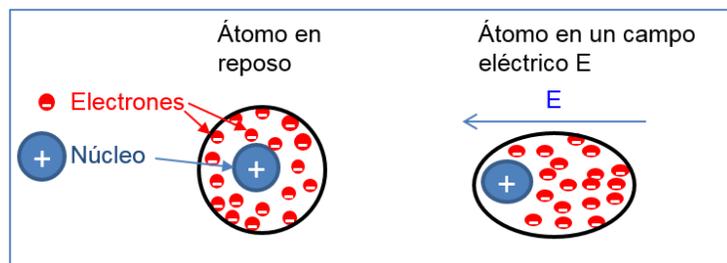


Figura 8.18: Dipolo eléctrico en un átomo sometido a un campo eléctrico (Autoría, ver últimas páginas)

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

El material se mantiene cargado mientras está en el campo eléctrico, y al retirarlo en algunos casos el dipolo desaparece mientras que en otros se mantiene permanente.

APLICACIÓN: La formación de dipolos sirve para acumulación de carga eléctrica en los condensadores dieléctricos. Funciona así:

- Cualquier material o asociación de materiales metálicos puede acumular carga eléctrica en sus superficies → Condensador.
- La inclusión de un material dieléctrico entre las superficies conductoras aumenta el nivel de carga almacenado en el condensador e impide su descarga (alta resistencia dieléctrica y eléctrica).

La asociación de materiales metálicos separados por un dieléctrico se denomina **CONDENSADOR DIELECTRICO**.

Aplicaciones: almacén de carga o energía, atenuador de oscilaciones eléctricas en la red...

RUPTURA DIELECTRICA

Comportamiento dieléctrico: Los dieléctricos son buenos aislantes porque tienen un elevado salto energético de la banda de valencia a la de conducción. Sin embargo, si el voltaje aplicado es alto un material dieléctrico puede perder su capacidad para impedir el paso de corriente eléctrica. Se conoce como *ruptura dieléctrica*.

Resistencia dieléctrica:

Cuando entre dos superficies conductoras ponemos un material dieléctrico y sometemos al sistema a un campo eléctrico creciente llega un momento en que el material dieléctrico se polariza y se vuelve conductor. La resistencia dieléctrica es la que opone el material hasta ese nivel: **Resistencia $e = V / d$**

Donde V es el voltaje aplicado y d el espesor del dieléctrico. Para que un material sea un buen aislante eléctrico debe tener una resistencia dieléctrica alta.

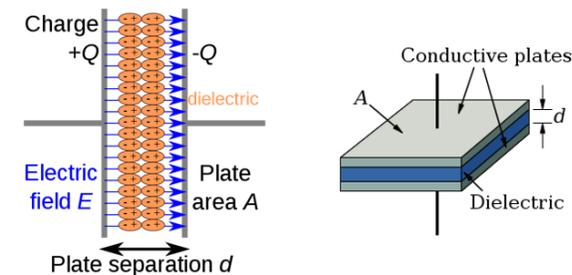


Figura 8.19: Esquema de un condensador dieléctrico (Autoría, ver últimas páginas)

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

8.2.7 ALGUNOS EFECTOS ELÉCTRICOS EN DIELECTRICOS

Hay un buen número de fenómenos eléctricos diferentes relacionados con las diferentes estructuras cristalinas de los materiales dieléctricos.

PIEZOELECTRICIDAD

Es la propiedad de algunos materiales dieléctricos basada en la 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, que produce electricidad. Se denomina **Piezoelectricidad**. Ejemplos de piezoeléctricos son las bujías para ignición de los coches, las "piedras" para saltar chispas en los mecheros. Se utilizan también en altavoces y en motores.

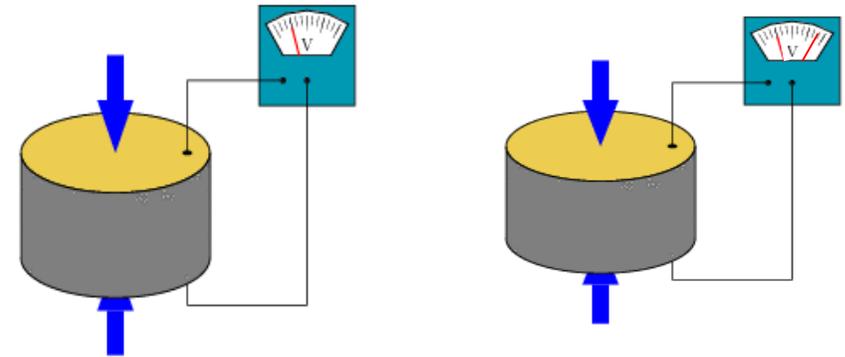


Figura 8.20: Esquema de un material piezoeléctrico (Autoría, ver últimas páginas)

La piroelectricidad es un fenómeno análogo a la piezoelectricidad pero causado por el calentamiento del material dieléctrico, en lugar de la aplicación de presión.

FERROELECTRICIDAD

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 (por debajo de la T_{Curie}), por lo cual se pueden usar en sistemas electrónicos.

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

8.2.8 SEMICONDUCTORES

Son aquellos materiales que tienen un escalón entre la banda de valencia y la de conducción inferior a 4eV.

Lo forman los elementos del **Si y Ge del grupo IV del sistema periódico**, y corresponden a enlaces covalentes muy especiales debido a su configuración electrónica.

También hay algunos compuestos cerámicos/intermetálicos con propiedades semiconductoras.

Las propiedades semiconductoras consisten en dejar pasar la corriente eléctrica cuando se aplica un campo eléctrico de cierto nivel mientras que si el campo eléctrico es inferior al mismo el material es aislante.

El comportamiento semiconductor se explica de manera sencilla basándonos en la estructura electrónica de los materiales semiconductores por excelencia, el Grupo IV del sistema periódico:

- A nivel atómico: Hibridación s-p en cada átomo en el último nivel electrónico: se forman cuatro orbitales equivalentes (orbitales sp³) para ocho electrones (y en ellos se instalan los 4 electrones).

- A nivel masivo: 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). La diferencia de energía entre ambas bandas es el Salto energético (energy gap) del semiconductor. En el Diamante es muy grande, por lo cual es un aislante. En el Estaño es muy pequeña, por lo cual es un conductor. Los elementos entre ellos son semiconductores.

A estos semiconductores se les denomina **SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS** → La conductividad eléctrica de estos materiales aumenta exponencialmente con la temperatura y/o con el campo eléctrico (sigue una ley de Arrhenius)...

Tabla 8.1: Estructura electrónica, conductividad eléctrica y salto electrónico de los elementos del Grupo IV (Datos provenientes de: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_semiconductor_materials)

Elemento del Grupo IV	Estructura electrónica	Conductividad eléctrica ($\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$)	Salto energético (eV)
C (diamante)	1s ² 2s ² p ²	< 10 ⁻¹⁸	5,47
Si	1s ² 2s ² p ⁶ 3s ² p ²	5 x 10 ⁻⁶	1,12
Ge	1s ² 2s ² p ⁶ 3s ² p ⁶ 4s ² p ²	0,02	0,67
Sn	1s ² 2s ² p ⁶ 3s ² p ⁶ 4s ² p ⁶ 3d ¹⁰ 5s ² p ²	0,9 x 10 ⁵	0,08

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

¿Como ocurre la conducción en los semiconductores intrínsecos?

- Un **aporte de energía térmica o una diferencia de potencial externa** es suficiente para que un número dado de electrones (ne^-) de la banda de valencia alcance suficiente energía para saltar el **gap** y **llegar a la banda de conducción**.
- En la banda de valencia se formará un número idéntico de **huecos**, denominados h^+ .
- En esta situación, la carga eléctrica es transportada por los ne^- electrones (corriente eléctrica negativa) y los nh^+ huecos (corriente eléctrica positiva). La figura 8.21 muestra un esquema del funcionamiento de los semiconductores a nivel atómico.

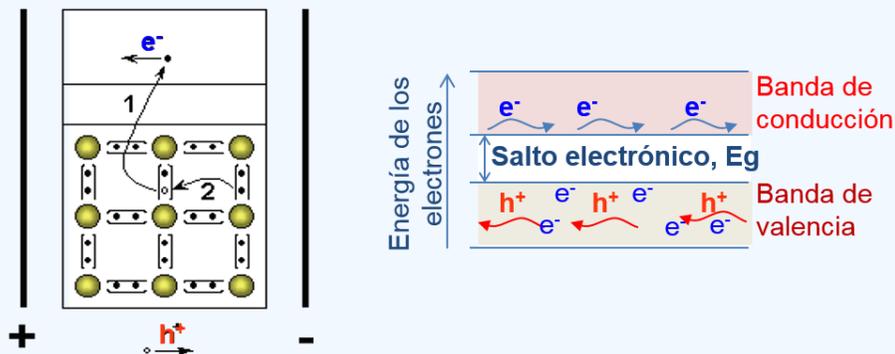


Figura 8.21: Esquema del funcionamiento de una semiconductor a nivel atómico (Autoría, ver últimas páginas)

SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS

Los semiconductores extrínsecos son semiconductores intrínsecos (Si o Ge) con un pequeño contenido controlado de impurezas, denominadas **DOPANTES**. La figura 8.22 muestra un esquema de los dos tipos que hay:

a) Impurezas con exceso de electrones: elementos del grupo V, con cinco electrones de valencia (**N, P, As y Sb**). Los materiales resultantes **se denominan semiconductores tipo n**.

b) Impurezas con defecto de electrones: los elementos del grupo III, con tres electrones de valencia (**B, Al y Ga**). Los materiales resultantes **se denominan semiconductores tipo p**

El electrón o hueco en exceso está débilmente ligado al núcleo de la impureza y, por tanto, puede ser excitado muy fácilmente. Entre las bandas de conducción y de valencia de estos electrones o huecos hay un salto de energía pequeño.

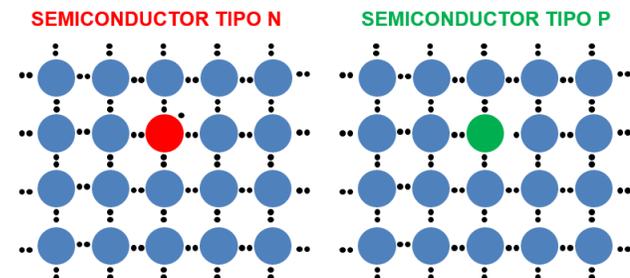


Figura 8.22: Semiconductores tipo N y semiconductores tipo P (Autoría, ver últimas páginas)

8.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

8.2.9 SUPERCONDUCTIVIDAD

Es un flujo de electricidad a través de un material cuya resistividad es cero por debajo de una temperatura dada, denominada TEMPERATURA CRÍTICA.

La superconductividad ocurre en una gran variedad de materiales, incluyendo elementos simples como el mercurio, el estaño y el aluminio, diversas aleaciones metálicas, algunos semiconductores fuertemente dopados y cerámicas con estructuras del tipo **PEROVSKITA**. La superconductividad no ocurre en metales nobles como el oro y la plata, ni en la mayoría de los metales ferromagnéticos.

La resistividad eléctrica de la mayoría de los metales aumenta con la temperatura de manera gradual desde el cero absoluto, en el cual presentan un valor dado de resistividad (propio de cada material). Este aumento de la resistividad es debido al aumento de las vibraciones atómicas con la temperatura, que representan un obstáculo cada vez mayor para el movimiento de los electrones a través de la estructura cristalina.

Los materiales superconductores presentan nula resistencia eléctrica en el cero absoluto, que se mantiene hasta una temperatura dada, denominada temperatura crítica. A partir de esa temperatura su resistencia eléctrica se incrementa como en el resto de los materiales conductores.

En un material superconductor por debajo de la temperatura crítica se puede transmitir la electricidad sin pérdidas de carga. La superconductividad es un fenómeno de la mecánica cuántica.

8.3 PROPIEDADES MAGNÉTICAS

8.3.1 ALGUNAS PROPIEDADES MAGNÉTICAS FUNDAMENTALES

El magnetismo se crea por las cargas eléctricas en movimiento. Una corriente eléctrica que pasa a través de una espira crea un campo magnético, \mathbf{H} (es vectorial):

$$\left. \begin{array}{l} N = \text{número total de vueltas} \\ L = \text{longitud de cada vuelta} \\ I = \text{Intensidad de la corriente eléctrica} \end{array} \right\} \text{Campo magnético creado} \\ \mathbf{H} = N * I / L$$

H se mide en Unidades de Amperio-vuelta/m = Henrio, H

INDUCCIÓN MAGNÉTICA O DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO

La espira siempre crea el campo con la misma intensidad, \mathbf{H} , pero dependiendo del material que se encuentre en el interior de la espira, la densidad del flujo magnético inducido, \mathbf{B} , será diferente. Es decir, tendremos diferentes respuestas dependiendo de la naturaleza del material. B se mide en Teslas, o en Weber/m².

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

PERMEABILIDAD MAGNÉTICA, μ :

Es la relación entre la densidad del flujo magnético obtenido (la **magnetización**) y el campo magnético que la ha producido (es la pendiente de la recta en la figura 8.23).

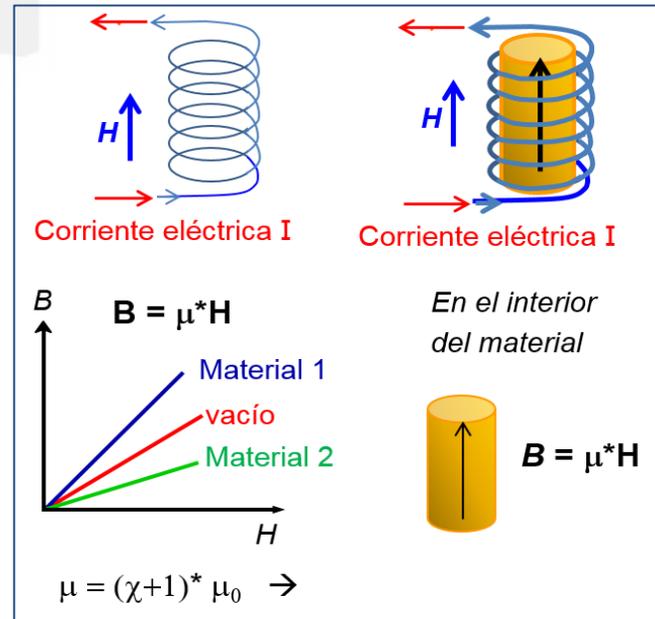


Figura 8.23: Creación de un campo magnético H y de la inducción magnética B en un material (Autoría, ver últimas páginas)

Permeabilidad magnética relativa, $\mu_r = \mu / \mu_0$

Es una medida de la facilidad con que las líneas de flujo magnético fluyen a través del material. Se mide en Weber/A.m.

En vacío la inducción B generada por el campo H es lineal, con una pendiente igual a la permeabilidad magnética del vacío, μ_0

$$B = \mu_0 * H$$

μ_0 = permeabilidad del vacío = 1.26×10^{-6} Henrios/m

B = Inducción Magnética en el material que tiene una permeabilidad magnética μ

8.3 PROPIEDADES MAGNÉTICAS

SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA, χ

χ mide la respuesta del material comparado con el vacío

$$\chi = (\mu / \mu_0) - 1 = \mu_r - 1$$

$$B = (1 + \chi)\mu_0 H$$

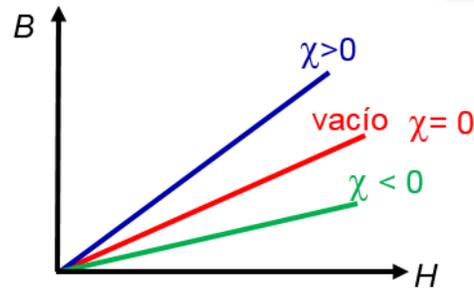


Figura 8.24: La inducción magnética producida por un campo H en un material es función de su susceptibilidad magnética (Autoría, ver últimas páginas)

→ La susceptibilidad magnética en el vacío es cero

→ La susceptibilidad magnética es adimensional

Susceptibilidad magnética y permeabilidad magnética son dos modos diferentes de medir lo mismo. Pero se emplea la susceptibilidad magnética porque es más sencillo medirla. Además, la susceptibilidad magnética es una propiedad del material, podemos relacionarla con sus características:

La susceptibilidad Magnética χ mide la respuesta de los electrones del material al campo magnético producido por la espira!.

8.3.2 LOS ÁTOMOS Y EL CAMPO MAGNÉTICO

La susceptibilidad magnética indica la respuesta del material al campo magnético. Es una medida de la respuesta de los electrones del material al campo magnético H . ¿De qué depende la susceptibilidad magnética?: De la estructura electrónica de los átomos

Cada electrón del átomo es una pequeña carga en movimiento, orbital y rotacional, y por tanto lleva asociados **permanentemente un momento magnético orbital y un momento magnético de spin (o rotacional)**.

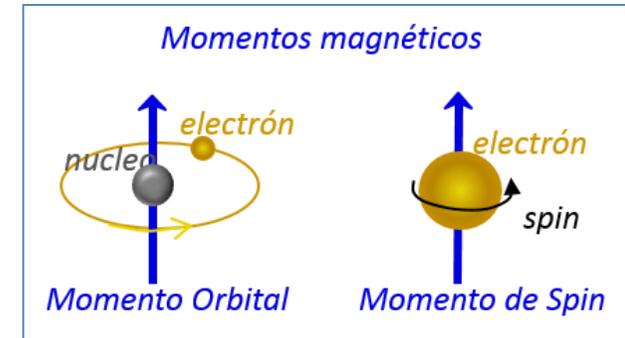


Figura 8.25: Momentos magnéticos asociados a la rotación y al giro del electrón (Autoría, ver últimas páginas)

El momento magnético neto del material será la suma de todos los momentos de todos los electrones que lo compongan. Se denomina magnetización, \mathbf{M} , al momento magnético neto del material por unidad de volumen.

El momento magnético neto de un átomo es la suma de los momentos magnéticos de todos sus electrones. Esto incluye la contribución de los momentos orbitales y de los momentos de spin.

8.3 PROPIEDADES MAGNÉTICAS

En cada átomo individual: Los **momentos orbitales** de algunos pares de electrones se cancelan unos con otros (son vectoriales). Los **momentos de spin** de un electrón se cancelan con los de otro electrón equivalente, pero de spin opuesto → Cuando una capa, o subcapa, electrónica de un átomo se encuentra completa existe una total cancelación de los momentos orbitales y de spin correspondientes a los electrones de esa capa/subcapa.

Por ello, los materiales cuyos átomos tienen una estructura electrónica con todas las capas/subcapas completas, no son capaces de ser imantados permanentemente: Esto incluye a los gases nobles (He, Ne, Ar, etc.) así como algunos materiales iónicos.

La respuesta del material frente al campo magnético depende de su estructura electrónica. La susceptibilidad magnética, χ es la relación entre la magnetización total obtenida, M , y el campo magnético que la ha producido, H →

$$M = B_{\text{material}} - B_{\text{vacío}} \rightarrow M = \chi * H$$

De acuerdo al comportamiento que da el material cuando se somete a un campo magnético se definen 4 tipos de respuesta magnética, mostrados en las figuras 8.26 y 8.27

8.3.3 TIPOS DE MAGNETISMO

DIAMAGNETISMO

Es una débil forma de magnetismo no permanente, sólo persiste mientras haya un campo magnético aplicado. Se induce por un cambio en el movimiento orbital de los electrones debido al campo magnético aplicado. La magnitud del momento magnético inducido es muy pequeña, y en dirección opuesta al campo magnético aplicado. Esta forma de magnetismo no es importante a nivel práctico ingenieril

PARAMAGNETISMO

En algunos sólidos, cada átomo tiene un momento dipolar permanente debido a la incompleta cancelación de los momentos magnéticos orbitales y de spin. En ausencia de campos magnéticos externos, normalmente los dipolos magnéticos de estos átomos se encuentran al azar, y el

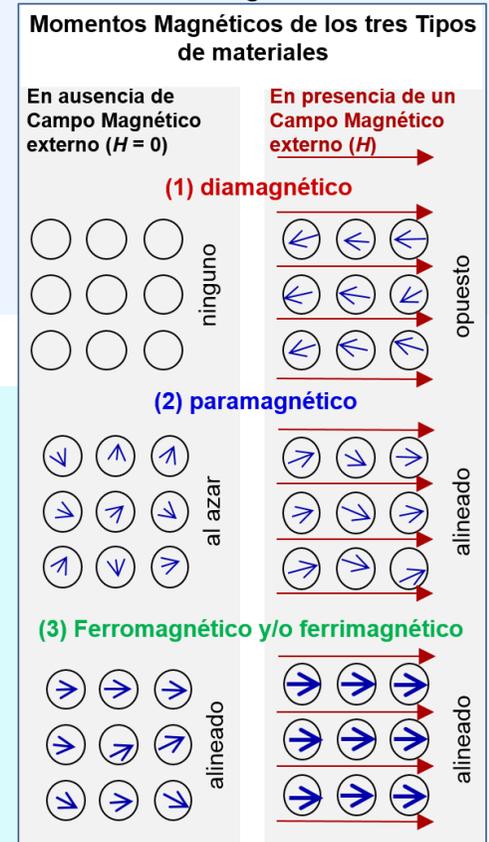


Figura 8.26: Tipos de magnetismo (Autoría, ver últimas páginas)

8.3 PROPIEDADES MAGNÉTICAS

resultado es una cancelación de unos con otros. El sólido no presentará magnetización neta macroscópica. Estos dipolos son libres para rotar y alinearse, por lo cual cuando se aplica un campo magnético se alinean con él en la medida de lo posible.

Tanto los materiales diamagnéticos como los paramagnéticos se consideran NO MAGNÉTICOS porque una vez retirado el campo magnético la magnetización de los mismos cesa. Además, la magnetización es tan débil que la densidad del flujo magnético, B , a través de ellos es prácticamente la misma que en el vacío.

FERROMAGNETISMO

Los materiales ferromagnéticos presentan momentos magnéticos permanentes debido a que una importante parte de los momentos de spin (también llamados rotacionales) de los electrones de la capa de valencia no se cancelan, y se acoplan con los momentos similares de los átomos adyacentes. Este acoplamiento de los momentos rotacionales de átomos adyacentes hace que los materiales produzcan su propio campo y sean magnéticos incluso en ausencia de un campo externo. El acoplamiento de los spines de átomos adyacentes se debe a cómo se posicionan los átomos en las estructuras cristalinas de estos materiales. También hay una contribución del momento magnético orbital de esos electrones, pero es pequeña en comparación con el momento de spin.

Son ferromagnéticos muchos metales de Transición: Fe (en forma BCC), Co, Ni, y algunos elementos de las tierras raras, como el Gadolinio (Gd)

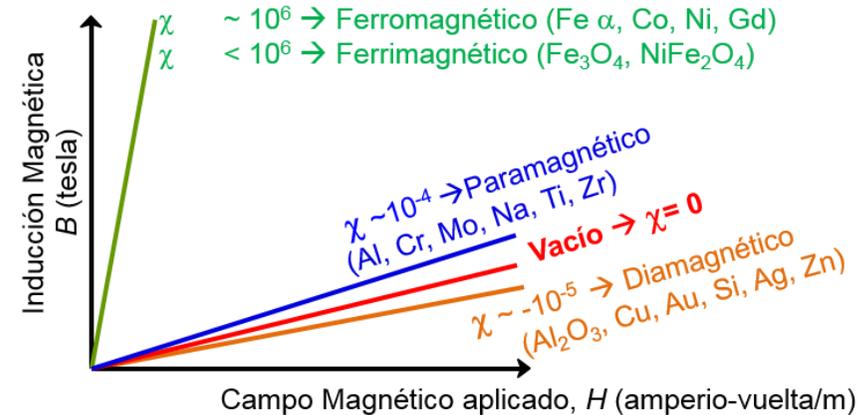


Figura 8.27: Los distintos tipos de materiales magnéticos de acuerdo a su inducción magnética y a la susceptibilidad magnética (Autoría, ver últimas páginas)

FERRIMAGNETISMO

Son **cerámicas** que exhiben una magnetización permanente. Las características magnéticas macroscópicas de los ferromagnetos y ferrimagnetos son similares; La distinción radica en la fuente de los momentos magnéticos netos.

Los materiales ferrimagnéticos por excelencia son las ferritas: Las ferritas responden a la siguiente fórmula: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MO}$ (M es un ión M^{+2} , pudiendo ser Fe^{+2} , Mn^{+2} , Cu^{+2} o Ni^{+2}). La ferrita más famosa es la **MAGNETITA: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$** .

8.3 PROPIEDADES MAGNÉTICAS

La mayoría de las interacciones de acoplamiento de momentos de spin entre los iones Fe^{+3} y los iones M^{+2} son antiparalelos, de carácter similar al antiferromagnetismo, por lo cual se cancelan. Sin embargo, algunas de ellas se alinean, formando un momento magnético neto, incluso en ausencia de un campo eléctrico, igual que ocurría en los materiales ferromagnéticos. El momento ferrimagnético neto surge de la cancelación incompleta de los momentos de spin.

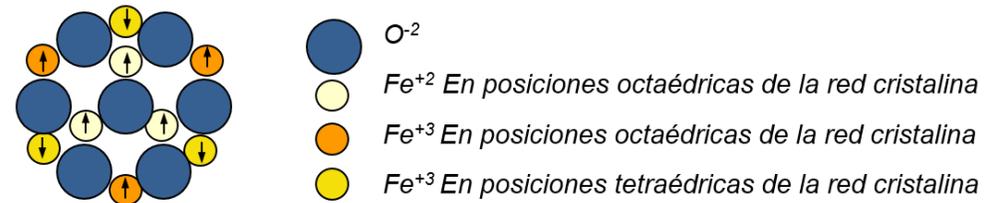
Los **GRANATES** también muestran ferromagnetismo: responden a una fórmula del tipo $\text{M}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, donde M es un metal de tierras raras. El granate más conocido y habitual es el YIG (Yttrium Iron Garnet), usado en la fabricación de láseres.

La figura 8.28 muestra un esquema de la estructura de spin de un material ferrimagnético, la magnetita, y un material antiferromagnético, el MnO

ANTIFERROMAGNETISMO

Son compuestos donde los momentos de spin de los átomos o iones adyacentes tienen direcciones exactamente opuestas. Por ello, el acoplamiento de los momentos de spin de los átomos adyacentes da como resultado una alineación antiparalela. El sólido tiene una Magnetización neta de **CERO**. Como en el caso del ferromagnetismo, se da en compuestos con participación de metales de transición, los cuales presentan un gran número de electrones desapareados en orbitales d.

Esquema de la estructura de la Magnetita Fe_3O_4 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$), la cual es ferrimagnética:



Esquema de la estructura del óxido de Manganeso (MnO), el cual es antiferromagnético:

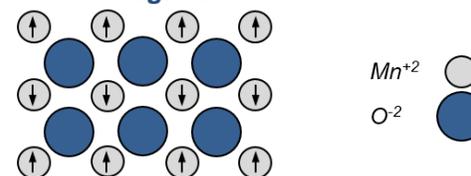


Figura 8.28: Ejemplo de la organización de los spin electrónicos en una ferrita (ferrimagnética) y en el MnO (antiferromagnético) (Autoría, ver últimas páginas)

8.3 PROPIEDADES MAGNÉTICAS

8.3.4 EL MAGNETISMO DE LOS MATERIALES FERRO- Y FERRI-MAGNÉTICOS

Los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos en muchos casos no muestran magnetismo cuando se obtienen y transforman en productos. Ello es debido a uno o varios de los siguientes factores:

→ Los materiales son policristalinos, formados por muchos granos orientados en todas direcciones posibles. Los momentos netos de spin de los distintos granos están orientados en distintas direcciones y dado que hay una enorme cantidad de granos, generalmente se cancelan.

→ Dentro de cada grano no todos los momentos de spin se alinean en la misma dirección. Existen zonas, denominadas “**DOMINIOS**”, en las que los momentos de spin están alineados, pero en cada grano suele haber varios dominios que pueden estar alineados en direcciones contrapuestas, cancelando el momento neto de spin.

La tabla 8.2 incluye algunas definiciones básicas para poder entender la interacción entre estos materiales y el campo magnético.

Cuando se dan estas circunstancias, se pueden producir los imanes introduciendo los materiales en un campo magnético: Cuando se aumenta gradualmente el campo magnético (H), el momento magnético en cada átomo se alinea con H .

Tabla 8.2: Terminología necesaria para entender la interacción de los materiales ferromagnéticos con el campo magnético

Terminología	Explicación
Dominios	Pequeñas regiones dentro de los granos (mat ferro- y ferri-mag.) donde la magnetización está alineada
Paredes de dominio	Los límites de los dominios magnéticos
Saturación magnética	Se alcanza cuando el campo magnético es capaz de alinear todos los dipolos de los átomos, y con ello se alcanza la máxima magnetización posible en ese material
Remanencia	Es la polarización o magnetización que permanece en el material después de que se ha quitado el campo magnético
Ciclo de Histéresis	La magnetización de los ferromagnetos y ferrimagnetos sigue un ciclo de histéresis cuando se producen ciclos de campo magnético

Los dominios de momentos magnéticos alineados con el campo crecen a expensas de los desalineados, que acaban por desaparecer. Es un comportamiento no lineal. Cuando todos los momentos de spin están alineados se dice que se ha **saturado** (Figura 8.29 izda.).

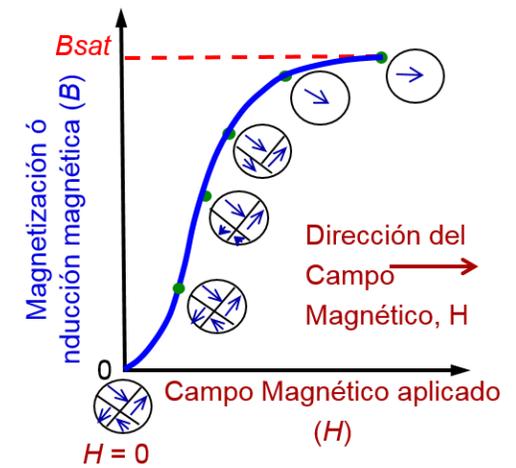


Figura 8.29: Magnetización de un material ferromagnético mediante exposición a un campo magnético. (Autoría, ver últimas páginas)

8.3 PROPIEDADES MAGNÉTICAS

La magnetización / desmagnetización muestra un ciclo de **HISTÉRESIS** (Figura 8.30.). Una vez que el material está magnetizado hasta saturación (**línea punteada en negro**), cuando se disminuye la intensidad del campo magnético el material no revierte la situación sino que sigue el ciclo de histéresis esquematizado en la figura por la línea roja superior. Cuando el campo magnético, H , es eliminado completamente, el material permanece imantado, magnetización remanente B_R . Se ha producido un imán permanente.

Si se requiere desmagnetizar el material se deberá producir un campo magnético H de sentido opuesto al que originó la magnetización, y de intensidad H_c , denominado Campo coercitivo.

B_R es la magnetización remanente y H_c es la intensidad del campo coercitivo

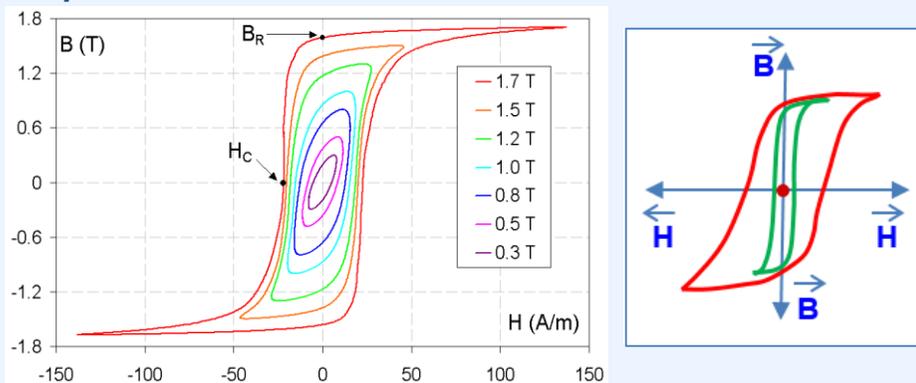


Figura 8.30: Ciclo de histéresis de magnetización/desmagnetización de Hierro-silicio convencional de grano orientado. (Autoría, ver últimas páginas)

Los materiales que requieren gran coercitividad no son adecuados para ser empleados en motores donde se generan campos magnéticos debido a su propio funcionamiento. Para este tipo de usos se usan “imanes blandos” con baja coercitividad.

Si por el contrario se requiere formar imanes permanentes que no se desmagneticen por campos magnéticos de diverso signo, se parte de materiales de elevada coercitividad diseñados con fases secundarias y precipitados que dificulten el movimiento de las paredes de dominio.

En la figura 8.30, dcha., el material que sigue la línea roja presenta una gran coercitividad, es un “imán duro” (por ejemplo, acero al wolframio), mientras que el material que sigue la línea verde es un “imán blando” (por ejemplo hierro dulce, entorno al 99,5%Fe).

EFECTO DE LA TEMPERATURA

La saturación magnética es máxima a 0 K, temperatura en la que los átomos están “quietos”. Según T aumenta, aumentan las vibraciones de los átomos y se dificulta el alineamiento de los dipolos cuando se aplica un campo magnético (tanto en materiales ferro-, antiferro-, como ferrimagnéticos). El resultado es una disminución gradual de la saturación magnética hasta que se alcanza una T en la cual cae a 0 de modo abrupto, la **Temperatura Curie: Es la $T (T_c)$ por encima de la cual los materiales ferro-, antiferro- y ferri-magnéticos se vuelven paramagnéticos.**

8.3 PROPIEDADES MAGNÉTICAS

La saturación magnética en los materiales ferrimagnéticos es muy inferior a la que pueden presentar los ferromagnetos. Pero dado que las ferritas y los granates son cerámicas (con enlace iónico), son muy buenos aislantes eléctricos. En algunas aplicaciones magnéticas, como por ejemplo los transformadores de alta frecuencia, su baja conductividad eléctrica es una gran ventaja.

8.3.5 SUPERCONDUCTIVIDAD

La superconductividad es un fenómeno eléctrico. Los superconductores son materiales que presentan resistividad eléctrica nula por debajo de una temperatura denominada **Temperatura crítica, T_c** (no confundir con la Temperatura Curie). Por debajo de T_c tienen conductividad eléctrica infinita. Además de esta propiedad eléctrica, los superconductores tienen algunas importantes implicaciones magnéticas, por las cuales se usan. Son capaces de producir grandes campos magnéticos.

Durante décadas se investigó y teorizó acerca de ello. Muchas teorías decían que no era posible superconductividad a $T > 23\text{K}$. Se asumió que la $T_{c,max}$ se encontraría alrededor de 23 K. Pero en 1987 se publicaron resultados de superconductividad a $T_c > 30\text{K}$ → Algunas cerámicas (aislantes eléctricos que se transforman en superconductores!) cuya fórmula es $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_{3-y}$

A partir de ahí ha habido una carrera de fondo para desarrollar superconductores a T viables industrialmente: La temperatura objetivo inicial es $T > 77\text{K}$, **Nitrógeno líquido**: Se conoce y se puede usar a nivel industrial.

8.3 PROPIEDADES MAGNÉTICAS

Se conocen 26 metales y alrededor de 100 *aleaciones/compuestos* superconductores, pero muchos no son útiles ya que las condiciones de superconductividad (temperatura crítica) son extremas, no aplicables industrialmente.

Un material superconductor de **Tipo I** es perfectamente diamagnético. Esto hace que no permita que penetre el campo magnético, lo que se conoce como **Efecto Meissner**. Esta es la razón por la cual un superconductor flota sobre un imán, tal como muestra la figura 8.31.

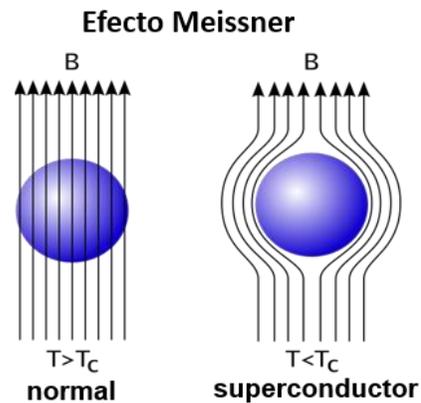


Figura 8.31: El efecto Meissner: las líneas de flujo magnético no penetran en el superconductor (izda). Superconductor flotando sobre un imán (dcha.). (Autoría, ver últimas páginas)

SUPERCONDUCTORES TIPO I Y TIPO II

Tipo I.

Según H aumenta, el material permanece diamagnético hasta alcanzar el campo crítico. Ahí, el material se vuelve no superconductor y el flujo magnético penetra como conocemos habitualmente: Aluminio, Plomo, Estaño, Mercurio. Para un campo dado, hay una temperatura crítica por encima de la cual el material no es superconductor.

Tipo II.

La transición de superconducción a conducción normal es gradual, de modo que en vez de un nivel de campo crítico existen dos niveles, H_{1c} y H_{2c} , entre los cuales la superconducción va reduciéndose gradualmente, penetrando el campo magnético "poco a poco": Aleaciones niobio-zirconio (Nb-Zr) y niobio-titanio (Nb-Ti), el Compuesto intermetálico niobio-estaño Nb_3Sn . Suelen preferirse estos superconductores Tipo II porque la T_c (y también H_c) es superior a la de los Tipo I.

8.3 PROPIEDADES MAGNÉTICAS

Superconductores actuales

- Y Ba₂Cu₃O_{7-x} (se llaman “Ybacuos”) $T_c = 90$ K
- Tl₂Ba₂Ca₂Cu₃O_x $T_c = 122$ K
- Son difíciles de producir porque el estado de oxidación de cada elemento es muy importante
- Son frágiles y por ello no podemos producir elementos habituales, por ejemplo cables/hilos superconductores.
- Actualmente se usan en equipos científicos y en medicina para estudios de resonancia magnética

ESTRUCTURA DE YBa₂Cu₃O₇ →

Es una estructura cristalina complicada, tipo “PEROVSKITA”. Las Vacantes (X) de esta estructura juegan un papel importante en la superconductividad.

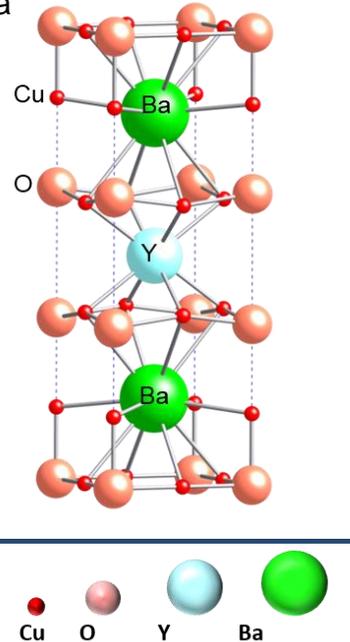


Figura 8.32: Estructura tipo perovskita.
(Autoría, ver últimas páginas)

8.4 PROPIEDADES ÓPTICAS

La luz es un haz de ondas electromagnéticas que lleva, por tanto asociados un campo eléctrico y un campo magnético de naturaleza ondulatoria.

Ambos campos son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación de las ondas (figura 8.33).

Por ello puede interactuar con los átomos, especialmente con la estructura electrónica de los átomos, y con los enlaces que forman. En las siguientes páginas se describirá someramente: Lo que ocurre cuando la luz incide en un material, a qué se deben los colores, porqué unos materiales son transparentes y otros no, las interacciones y efectos más importantes entre la luz y la materia: luminiscencia (fluorescencia, fosforescencia), fotoconductividad, otros.

La figura 8.34 muestra la clasificación del espectro electromagnético completo, desde los rayos gamma (de mayor frecuencia, de mayor energía) hasta las radiofrecuencias (la de menor frecuencia, menor energía).

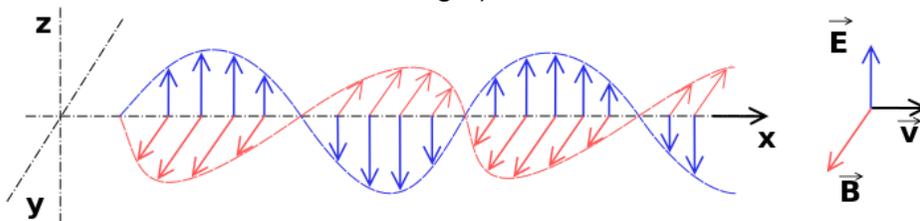


Figura 8.33: Ondas electromagnéticas luminosas. (Autoría, ver últimas páginas)

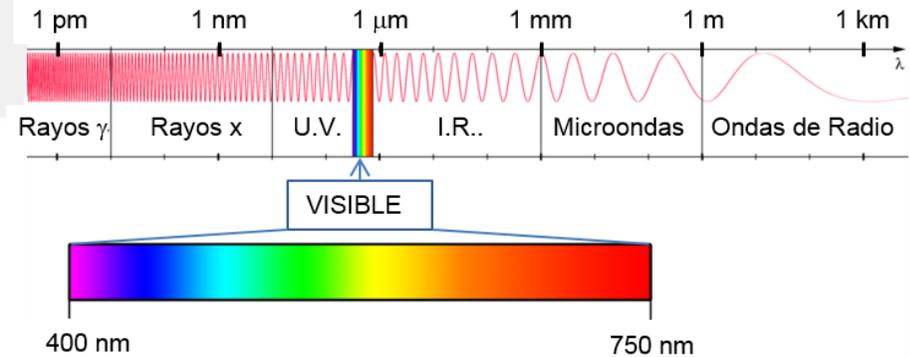


Figura 8.34: Espectro electromagnético (Autoría, ver últimas páginas)

NATURALEZA ONDULATORIA DE LA LUZ

La longitud de onda de la luz visible va de 400 nm (azul) a 800 nm (rojo). Se trata de ondas emitidas en longitudes de onda concretas, cada una correspondiente a un color preciso. Cuando se juntan las ondas con distintas longitudes de onda a lo ancho del espectro completo del visible, formando un haz, dan lugar a la luz blanca.

La expresión de energía luminosa más pequeña es el cuanto de luz o Fotón. La energía asociada a un **FOTÓN** está cuantizada y se expresa mediante la ecuación de Planck: $E = h \cdot \nu$ donde E es la energía del fotón, h es la constante de Planck ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ m/s) y ν es la frecuencia de la onda. La relación entre la frecuencia y la longitud de onda (λ) es la velocidad de la luz en el vacío, c ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s): $\nu = c / \lambda$

8.4 PROPIEDADES ÓPTICAS

8.4.1 INTERACCIÓN DE LA LUZ CON LA MATERIA

La luz es energía en forma de onda electromagnética, que interacciona con la materia. Los fotones llevan asociado un campo eléctrico, con un nivel energético cuantizado. Este campo eléctrico interactúa con las partículas cargadas del sólido (iones y electrones). La energía del fotón puede ser absorbida por los iones o por los electrones si su nivel es adecuado:

Absorción y emisión de fotones

Los electrones cuando absorben fotones normalmente se quedan temporalmente en “estado excitado”. Luego se “relajan” emitiendo el exceso de energía absorbido. Esta emisión que puede ser en forma de fotón, calor, o de otro tipo.

Cuando la luz pasa a través de un sólido ópticamente “delgado”, polariza los e- de valencia y los iones de la red. Este proceso da lugar a dipolos inducidos, los cuales modifican la constante dieléctrica del material y el índice de refracción. Estos cambios se “reflejan” en medidas, como por ejemplo la permitividad dieléctrica.

ABSORCIÓN DE LUZ

La luz incidente puede ser reflejada, absorbida o transmitida. Dado que la energía total debe conservarse: $I_0 = I_T + I_A + I_R$

I_0 es la intensidad incidente (W/m^2). Los sufijos hacen referencia a transmitida, absorbida, reflejada. Podríamos verlo en forma porcentual ($T + A + R = 1$, donde T, A, and R son las fracciones de la luz incidente transmitida, absorbida y reflejada):

$$T = I_T / I_0$$

$$A = I_A / I_0$$

$$R = I_R / I_0$$

De acuerdo a T / A / R, los materiales se clasifican como:

Materiales transparentes

Poca absorción y poca reflexión. Si el material no es perfectamente transparente, la intensidad de la luz decrece exponencialmente con la distancia. ¿Qué materiales son transparentes?: Monocristales y Materiales no cristalinos como vidrios y algunos polímeros amorfos

Materiales translúcidos

La luz se dispersa dentro del material. ¿Qué materiales son translúcidos?: Policristales densos en láminas delgadas

Materiales opacos

Relativamente poca transmisión, la luz se dispersa desde las primeras capas superficiales. ¿Qué materiales son opacos?: Policristales densos en láminas gruesas y Policristales porosos incluso en láminas delgadas.

8.4 PROPIEDADES ÓPTICAS

Cuando un material absorbe luz, la energía es acumulada por los e⁻, que se quedan en estado excitado temporalmente.

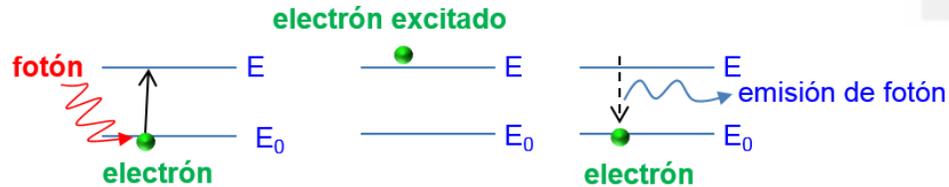


Figura 8.35: Absorción y re-emisión de fotones (Autoría, ver últimas páginas)

Este es un estado energéticamente activado e inestable. Por ello, los e⁻ se “relajan” emitiendo el exceso de energía, bien en forma de fotón, o bien de otro tipo.

El modo en que el material absorbe la luz depende de su naturaleza: Cada tipo de enlace, y la energía de cada enlace concreto, determinan la longitud de onda electromagnética que es absorbida por cada material. Cuando la luz incidente es de una longitud de onda que excita una de las frecuencias vibracionales del enlace, esa luz es absorbida.

Dependiendo del material y de la longitud de onda de la luz, la absorción puede ocurrir en:

- ▶ Enlaces atómicos – todos los materiales
- ▶ Electrones – los metales y los semiconductores de banda aislante estrecha

La mayoría de los sólidos, además, absorben radiación en el espectro **infrarrojo...** porque estas frecuencias se ajustan a las vibraciones térmicas de los átomos (fonones).

Si la longitud de onda es pequeña (más energética), una buena parte de la radiación suele ser transmitida (es lo que ocurre con los rayos X y γ). Por el contrario, si λ es mayor y no tiene suficiente energía para ser absorbida por el material, es reflejada.

Tabla 8.3: Frecuencia de la luz en distintos colores ([Datos de: https://es.wikipedia.org/wiki/Constante_de_Planck](https://es.wikipedia.org/wiki/Constante_de_Planck))

Color	Frecuencia $f=c/\lambda$ (Hz)	$E=qV_o=hf$ (J)	$\langle h \rangle$
RS Violeta	$7,44 \cdot 10^{14}$	$4,47 \cdot 10^{-19}$	$(6,79 \pm 0,06) \times 10^{-34}$ J. s $R^2 = 0,953$
CO Azul	$6,48 \cdot 10^{14}$	$3,99 \cdot 10^{-19}$	
D+LED Verde	$5,88 \cdot 10^{14}$	$3,88 \cdot 10^{-19}$	
CO Verde	$5,78 \cdot 10^{14}$	$3,77 \cdot 10^{-19}$	
RS Ambar	$4,96 \cdot 10^{14}$	$2,74 \cdot 10^{-19}$	
RS Rojo	$4,70 \cdot 10^{14}$	$2,72 \cdot 10^{-19}$	
RS Infrarrojo	$3,37 \cdot 10^{14}$	$1,89 \cdot 10^{-19}$	

8.4 PROPIEDADES ÓPTICAS

8.4.2 INTERACCIÓN DE LA LUZ CON LOS METALES

Los electrones en los metales se encuentran situados en amplias bandas de valencia y conducción, solapadas.

A $T > 0$ hay bandas energéticas de distinta “anchura energética”, y con electrones en ellas. En cada banda los electrones pueden tener unos márgenes energéticos dados. Los electrones en esas bandas pueden absorber radiación electromagnética para variar su energía dentro de la “amplitud” que permite la banda. Hay muchas bandas y electrones, de manera que prácticamente cualquier tipo de radiación electromagnética puede ser absorbida por los metales: toda longitud de onda (en el visible) es absorbida por los electrones de los metales, excepto las de muy alta energía, que atraviesan el material (Rayos X y rayos γ).

Como la concentración de electrones es elevadísima, toda la luz se absorbe **en una pequeña capa superficial, aprox $0.1\mu\text{m}$. Por ello, los metales son opacos incluso en láminas delgadísimas.**

Los recubrimientos o capas finas metálicas de menor espesor permiten transmitir luz: Por ejemplo los cascos de los astronautas llevan un recubrimiento de oro, tan delgado que la mayor parte de la radiación visible logra atravesarlo (es transparente al visible), pero es reflectante del infrarrojo en

todas las situaciones. La penetración del visible (longitudes de onda del visible) en algunos materiales es:

vidrio: 29 cm

grafito: $0.6\mu\text{m}$

oro: $0.15\mu\text{m}$

Los electrones de los átomos de las superficies metálicas absorben toda la luz incidente. Así que están “excitados”, con exceso de energía. ¿Que hacen con ese exceso de energía?: **Se relajan emitiendo fotones →**

REFLEXIÓN DE LA LUZ EN LOS METALES

La energía de los fotones emitidos por los electrones es la misma que la de la radiación incidente original.

Como los electrones se mueven, el fotón se reemite como una radiación electromagnética, con onda asociada. El resultado: la onda incidente es re-emitada, lo que significa a nivel práctico que es reflejada. **El metal refleja la luz.** En realidad, la mayoría de metales refleja aproximadamente el 95% de la radiación incidente. ¿Que hacen los metales con la energía Visible e Infrarrojo que absorben y no reflejan? Se calientan.

➤ **Los metales son opacos y reflectantes**

➤ **El restante 5% de energía (no reflejada) se disipa como calor**

8.4 PROPIEDADES ÓPTICAS

Los metales tienen apariencia metálica y plateada porque son “espejos perfectos”.

¿Por qué el oro y el cobre no son “plateados”?

Porque las estructuras de bandas energéticas no son tan simples como se ha explicado y estos metales tienen algunas frecuencias en las que absorben energía pero no reemiten los fotones a esa frecuencia.

La figura 8.36 muestra la reflectividad del espectro visible para tres metales, el Oro, la Plata y el Aluminio. Se han marcado los límites del espectro visible mediante las líneas punteadas verticales mostrando la longitud de onda del violeta (~400 nm) y del rojo (~750 nm):

- El oro absorbe y no refleja las longitudes de onda por debajo de aprox. 500 nm, es decir, no refleja las más energéticas (azul, violeta,...).. Por ello tiene tonalidades amarillo-rojizas.
- La plata y el aluminio reflejan todo el visible
- El aluminio presenta menor reflectividad en el IR que en el visible

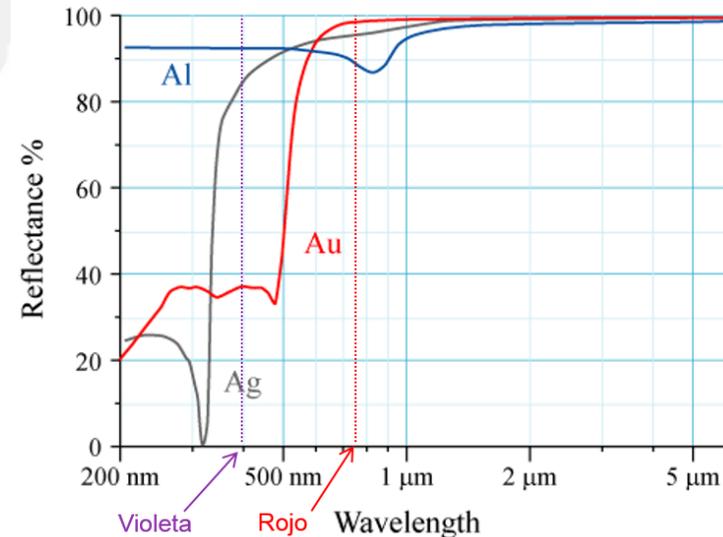


Figura 8.36: Espectro de reflexión de la luz incidente en oro, plata y aluminio (Autoría, ver últimas páginas)

En general, los metales tienen **baja emisividad en las frecuencias IR**, por lo cual no disipan el calor emitiendo radiación en esas frecuencias. El calor lo transmiten mediante MECANISMOS DE CONDUCCIÓN, no irradiando en el IR. Este tipo de materiales se denomina “bajo emisivos”:

Aunque absorban radiación de varios tipos, y parte de ella la disipan en forma de calor, no emiten fotones en la longitud de onda del IR, que generalmente es uno de los mecanismos de disipación de calor en otros materiales.

8.4 PROPIEDADES ÓPTICAS

3.8.3 INTERACCIÓN DE LA DE LUZ CON SÓLIDOS NO METÁLICOS

Los materiales dieléctricos (iónicos o covalentes) y semiconductores (covalentes) absorben únicamente los fotones con energía superior a su “escalón” de no conducción:

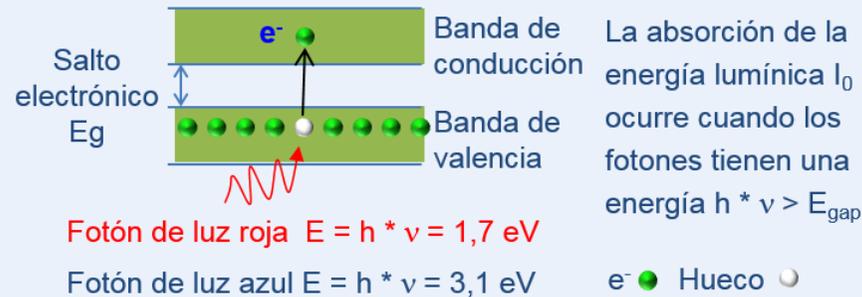


Figura 8.37: Absorción de energía lumínica por un dieléctrico (Autoría, ver últimas páginas)

Los **fotones con energía superior a E_g son absorbidos**. La relajación energética puede ir acompañada de re-emisión de luz (fotones)...o no.

Los semiconductores pueden tener aspecto “metálico” cuando los fotones del visible son reflejados (como el Ge). Eso significa que la frecuencia del visible es menor que el E_g . Cuando el E_g es pequeño, como en el caso del CdS, son capaces de absorber parte (o todo) el visible, y tienen color.

➤ **CdS es amarillo porque absorbe por encima de 540nm.**

El color que se aprecia en los materiales no metálicos opacos es la radiación que se refleja.

Este comportamiento básico ocurre en los materiales puros. La mayoría de los semiconductores y dieléctricos tienen impurezas (o dopantes), y tienen patrones de absorción “extra” a los saltos energéticos simples.

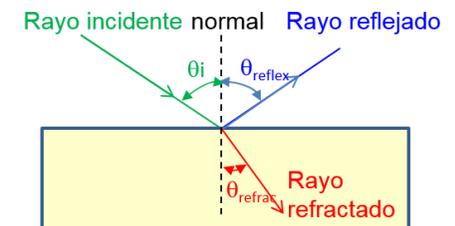


Figura 8.38: Bloque de Germanio (izda.) y Polvo de CdS, usado como pigmento (dcha.). (Autoría, ver últimas páginas)

TRANSMISIÓN DE LA LUZ EN SÓLIDOS NO METÁLICOS

La luz puede ser absorbida, reflejada, y también puede transmitirse. **Normalmente, las frecuencias que no son absorbidas son reflejadas o transmitidas.** Generalmente tenemos ambas en distinto porcentaje. La reflexión ocurre en un ángulo igual al de incidencia. La transmisión de la luz depende del espesor del sólido, tal como hemos indicado en la página precedente, y es diferente para cada material.

Figura 8.39: Reflexión y transmisión de la luz al atravesar un medio (Autoría, ver últimas páginas)



8.4 PROPIEDADES ÓPTICAS

Dispersión de la luz : transparencia, translucidez, opacidad:

Para obtener materiales de elevada transparencia, aparte del espesor, es también necesario que los materiales (cerámicas, polímeros y vidrios) presenten ausencia de límites de grano y/o de imperfecciones, tales como poros o impurezas, los cuales impiden el avance a la luz, dispersándola →

Los materiales amorfos como los vidrios y polímeros son transparentes siempre que no contengan poros o impurezas. Las cerámicas monocristalinas son transparentes (son gemas), mientras que las cerámicas normales no lo son debido a los límites de grano.

Material **TRANSPARENTE** → La luz transmitida puede seguir una trayectoria recta.

Si en el camino hay “obstáculos”, la luz va cambiando de dirección y se dispersa. Esto puede deberse a varias posibles causas:

- Límites de grano en materiales policristalinos
- Poros muy pequeños en cerámicas y vidrios
- Fases diferentes en los materiales
- Incluso puede haber dispersión de la luz debido a la reflexión dentro del material

Los materiales en los que la luz se dispersa se vuelven **TRANSLÚCIDOS**

La translucidez, frente a la transparencia, implica una pérdida de información/energía por dispersión interna: una parte de la luz se dispersa y las imágenes se ven borrosas. Esto ocurre especialmente en materiales semicristalinos y policristalinos.

En casos extremos, cuando la dispersión interna es extensa, el material se vuelve **OPACO**, que es lo habitual en las cerámicas.



➤ **Los Polímeros Semicristalinos son translúcidos** (polímeros donde hay una mezcla de fases cristalinas y zonas amorfas, con un porcentaje apreciable de las zonas cristalinas). **MUCHOS POLÍMEROS SON semicristalinos**. En las zonas cristalinas la velocidad de la luz es inferior a la velocidad en zonas amorfas, y ello hace que el haz cambie de dirección. El resultado es una dispersión de los haces de luz. Esta dispersión conduce a una gran pérdida de transmisión de la luz: *Por ejemplo, el Polietileno: las botellas de detergentes, de leche, etc. son translúcidas*, si las ponemos al “trasluz”, vemos que no son totalmente opacas.

➤ **Las Cerámicas policristalinas son translúcidas. Los Monocristales Cerámicos son transparentes** (zafiros, rubís, esmeraldas, diamantes,..). Las cerámicas policristalinas son translúcidas debido a los límites de grano y a la diferente

8.4 PROPIEDADES ÓPTICAS

orientación de los mismos (la luz tiene distintas interacciones en distintos planos cristalográficos).

- **Los plásticos amorfos y los vidrios (sin poros) son transparentes.**
- **Los monocristales cerámicos son transparentes**
- **Las cerámicas y polímeros muy cristalinos llegan a ser opacos**

DISPERSION DEL HAZ NO MONOCROMÁTICO

En castellano el término dispersión se aplica a dos fenómenos distintos. Uno, el que acabamos de ver. Pero hay otro tipo de dispersión, que no tiene nada que ver con la que acabamos de ver:

Dispersión es “el abanico” que obtenemos durante la refracción de una haz no monocromático, cuando las ondas transmitidas modifican su trayectoria de acuerdo a sus longitudes de onda respectivas: obtenemos el arco iris

LA REFRACCIÓN

Cuando la luz cuando entra en el sólido desde otro medio tiene lugar un cambio de la dirección en que se transmite. Se denomina refracción. Esta refracción es debida a la interacción del haz de fotones con los átomos del material: La luz transmitida distorsiona la nube electrónica de los átomos que encuentra a su paso. Esta polarización ralentiza la velocidad de la luz en el medio.

Refracción es el cambio de ángulo de trayectoria cuando la luz pasa de un material a otro.

Ejemplo: del aire al vidrio

El índice de refracción $n = c / v$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío, y v la velocidad de la luz en el medio.

v es generalmente dependiente de la longitud de onda de la luz. Por ello, los prismas devuelven un arco iris cuando incidimos en ellos con un haz de luz blanca.

El ángulo de refracción depende de los índices de refracción de los dos medios, el de entrada y el de salida. El ángulo de refracción siempre cumple la siguiente relación, conocida como:

La ley de Snell:
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}$$
 (ver figura 8.39)

8.4 PROPIEDADES ÓPTICAS

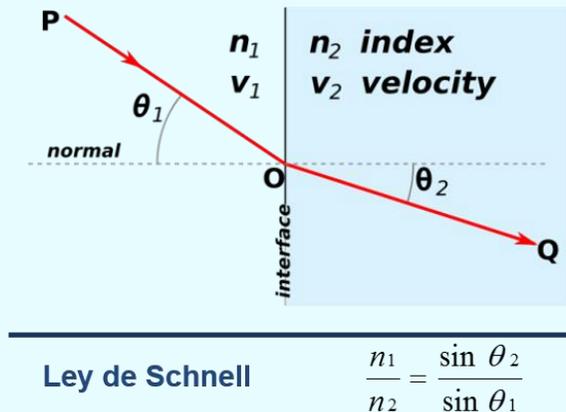


Figura 8.40: La ley de Snell (Autoría, ver últimas páginas)

Hay un ángulo de incidencia en el cual el ángulo de refracción será 90°. Para ángulos mayores, la luz se reflejará al 100% (Figura 8.41). Cuanto mayor sea el índice de refracción del sólido frente al del medio de salida, la reflexión ocurrirá en un rango mayor de ángulos de incidencia, mayor será la reflectividad.

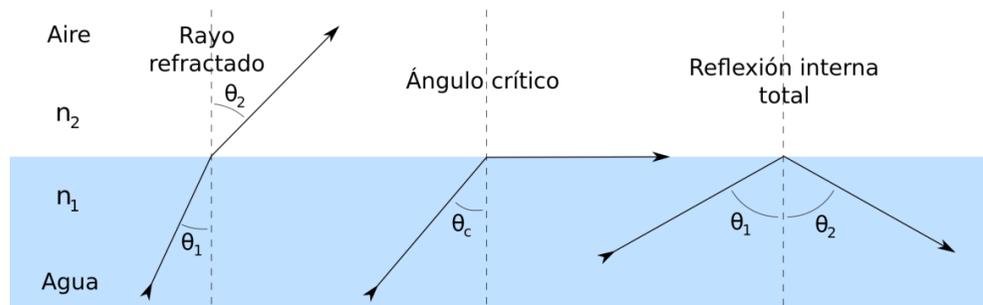


Figura 8.41: Reflexión por encima del ángulo crítico (Autoría, ver últimas páginas)

El índice de refracción es una consecuencia de la polarización eléctrica, especialmente de la polarización electrónica.

La luz transmitida distorsiona la nube electrónica. Por eso, los átomos polarizables son los más eficaces para disminuir la velocidad de la luz dentro del medio. Esta polarización es más fácil para los átomos grandes, con una gran nube electrónica (por ejemplo, átomos de Pb). Por ello, el índice de refracción n es mayor en materiales con átomos grandes. Los vidrios para lámparas y figuras decorativas se hacen con vidrio PLOMADO.

La relación entre **Refracción/Reflexión** es crucial para muchas **aplicaciones ópticas. Por ejemplo, las fibras ópticas.** Las fibras ópticas son de vidrio. La luz viaja por la fibra. Cuando toca la superficie de ésta, si el ángulo de refracción lo permite la luz se transmite al aire, con lo cual se pierde información. Sin embargo, esto sólo ocurre en un pequeño rango de ángulos porque el índice de refracción del aire es menor que el de la fibra (ver página previa).

Cuanto mayor sea el índice de refracción del sólido frente al del medio de salida, la reflexión ocurrirá en un rango mayor de ángulos de incidencia, mayor será la reflectividad. Si logramos la reflexión en todos los ángulos, no escapará energía lumínica de la fibra, toda ella vuelve al interior de la misma.

8.4 PROPIEDADES ÓPTICAS

➤ *En las fibras ópticas, el ángulo de refracción “mantiene” la luz dentro de la fibra.*

➤ *En los láseres semiconductores, la luz se mantiene dentro de la cavidad amplificadora de láser*

Para mejorar estas propiedades, los cables de fibra óptica se recubren exteriormente con un material de muy bajo índice de refracción para promover la reflexión de la luz dentro de la fibra.

EL COLOR

El Color que se observa en un material transparente corresponde a la suma de frecuencias de luz transmitida + luz re-emitida a través de transiciones electrónicas.

Por ejemplo: El Sulfuro de Cadmio (CdS).

Tiene un $E_{gap} = 2.4 \text{ eV} = 516 \text{ nm}$ = corresponde al color azul-verde. → Por ello, absorbe luz de energía superior a esa longitud de onda (verde, azul, violeta) → por lo cual no vemos estos colores.

El resto de longitudes de onda las refleja o las transmite. Son las que vemos:

Transmite la luz de baja energía: Rojo / amarillo → naranja. Y esto es lo que le da el color amarillo-naranja.

Pequeñas diferencias composicionales en los materiales cerámicos pueden dar diferentes colores:

Por ejemplo, la alúmina monocristalina de alta pureza, Al_2O_3 , es el **ZAFIRO**. Es **INCOLORO**.

Si contiene entre 0.5 - 2.0% de Cr_2O_3 el color es **ROJO**, y lo denominamos **RUBÍ**.

En el rubí, átomos de Cr sustituyen a átomos de Al en la red cristalina e introduce un cambio en la banda de energía prohibida del zafiro. Estos cambios de nivel energético corresponden a absorciones a 400nm (verde) y 600nm (azul) , dejando únicamente a la λ del color rojo que se transmita.

La figura 8.42, en la página siguiente, incluye los espectros de absorción del zafiro y del rubí.

La imagen muestra la transmitancia del Zafiro (línea azul) y la del rubí (línea roja).

El zafiro es un material incoloro mientras que el rubí es rojo: Las dos anchas bandas de absorción en la zona azul-violeta y verde-amarillo hacen que el rubí sólo transmita el color rojo.

8.4 PROPIEDADES ÓPTICAS

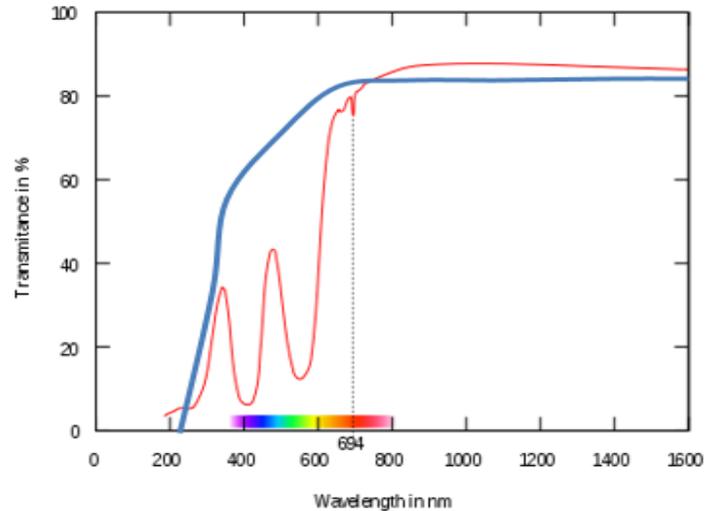


Figura 8.42: Espectro de transmisión de la luz en el zafiro (línea azul) y en el rubí (línea roja). (Autoría, ver últimas páginas)

Adicionalmente, el rubí presenta una estrecha y pequeña banda de absorción en 694 nm (color rojo intenso). Cuando absorbe luz de esa frecuencia se produce un salto electrónico a la banda de conducción, decayendo los electrones después y emitiendo la energía absorbida en forma de laser de esa longitud de onda.

8.4.6 EMISIÓN DE LUZ POR PARTE DE LOS MATERIALES

Luminiscencia es el término general que describe la emisión de energía radiante en el rango del visible por parte de los materiales. Para que esto ocurra el material ha debido absorber energía previamente, bien en forma de luz, bien en otro modo de energía (la energía incidente puede ser de diversos tipos).

Los fenómenos más habituales de luminiscencia son la **fluorescencia** y la **fosforescencia**.

En ambos fenómenos el material es excitado por luz, que se absorbe excitando los e- hasta la banda de conducción. Los electrones son capaces de permanecer en esa banda un tiempo muy corto, relajándose y volviendo a la banda de valencia emitiendo la energía en forma lumínica.

- Si el electrón es capaz de sobrevivir en el nuevo estado $t > 10^{-8}$ s = se denomina **fosforescencia**
- Si el electrón sobrevive en el nuevo estado $t < 10^{-8}$ s = se denomina **fluorescencia**

La onda emitida corresponde siempre a una frecuencia inferior a la de la onda incidente (menor energía).

La luminiscencia puede darse cuando la energía incidente procede de diversas fuentes: foto-, electro-, y catodoluminiscencia.

8.4 PROPIEDADES ÓPTICAS

Si la energía incidente es:

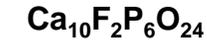
- luz de una frecuencia superior → **Fluorescencia / fosforescencia**
- Una reacción química: **chemo-luminiscencia** (las pulseritas de las ferias, que emiten luz coloreada durante unas horas)
- Un campo eléctrico → **LED**
- electrones → **“electron gun”** (en un tubo de rayos catódicos, CRT)

EJEMPLO: Las lámparas fluorescentes

Consisten en un plasma (gas ionizado a baja presión) que debido al campo eléctrico emiten radiación en el UV. Para que ello se transforme en la luz visible, el tubo que contiene el gas está recubierto con un material capaz de absorber el UV y emitir en el visible: fluorescencia. La figura 8.43 muestra un esquema de este tipo de lámparas.

Es habitual notar el “parpadeo” de estas luces: La corriente alterna que les hacemos llegar tiene 60Hz, y la fluorescencia dura menos que 1 ciclo de corriente.

recubrimiento de muchos materiales, cada uno emitiendo a una frecuencia distinta. Básicamente se compone del compuesto



donde el 20% de **F** es reemplazado por **Cl**.

El color se ajusta dopando el compuesto con diversos cationes metálicos: dopado con **Sb⁺³** *emite luz azul*, dopado con **Mn⁺²** *emite luz naranja-roja, ... etc.* Dado que cada compuesto emite luz a una longitud de onda característica, para obtener luz blanca se emplea una mezcla de varios.

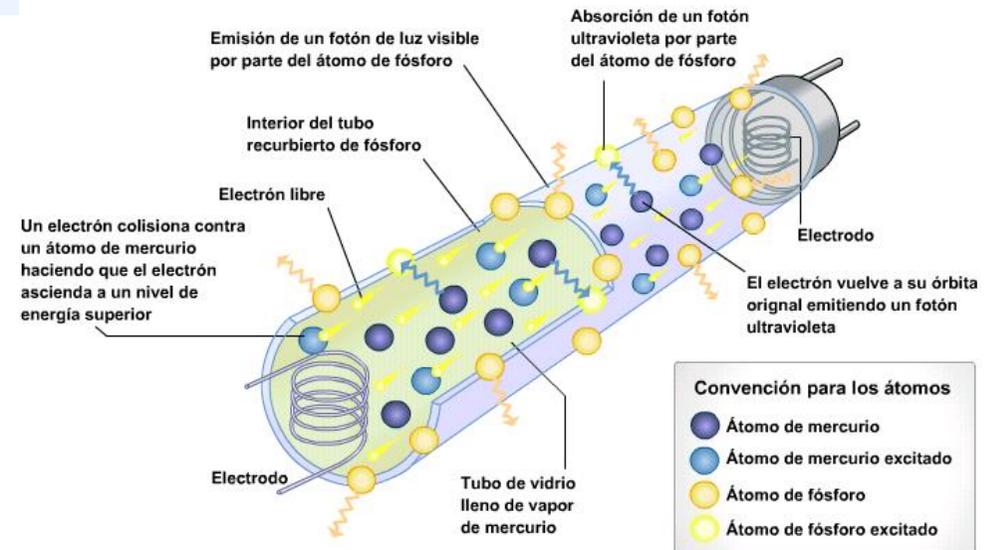


Figura 8.43: Esquema de un tubo fluorescente (Autoría, ver últimas páginas)

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

Figura 8.1: Dos materiales diferentes transmiten el calor de modo diferente

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.2: Dos materiales situados entre un foco frío y uno caliente transmiten el calor a distinta velocidad, dependiendo de sus respectivas conductividades térmicas

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.3: Dos aislantes térmicos habituales: Poliestireno expandido (arriba) y lana de roca (abajo)

Imagen superior de autor no identificado. CC BY-SA 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1041810> Imagen inferior de

Achim Hering - Trabajo propio, CC BY 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9030480>

Figura 8.4: Materiales y calor

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.5: El C.T.E.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.5: La expansión térmica de los materiales se debe a la asimetría de la curva de la energía de enlace atómico versus distancia de enlace atómico

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.6: Los enlaces débiles presentan grandes dilataciones térmicas y fuertes pequeñas.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.7: Un aro que se calienta se expande respecto de su centro de masas.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.8: Nivel de tensión debida a una expansión/contracción térmica impedida.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.9: Materiales según su enlace y las cargas eléctricas que lo conforman.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.10: Esquema del llenado de orbitales con electrones en el magnesio.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.11: Esquema de la teoría de bandas aplicada al magnesio y al sodio.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.12: Esquema de la teoría de bandas aplicada al magnesio y al Carbono (diamante).

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.13: Obstáculos a la conducción eléctrica en un cristal metálico

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.14: Las leyes de Ohm y el efecto Joule.

Imagen de Ane Miren García Romero

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

Figura 8.15: El efecto Thomson.

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.16: Esquema de un termopar (izda). Fotografía de un termopar real, tipo K (dcha.).

Imagen izda. derivada de Nanite - Own work, CC0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=34782633>. Imagen dcha. de

Harke - Own work, Public Domain,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6567327>

Figura 8.17: Relación entre voltaje y temperatura para distintos tipos de termopares.

Imagen de Nanite - Own work, CC0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30479340>

Figura 8.18: Dipolo eléctrico en un compuesto iónico sometido a un campo eléctrico

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.19: Esquema de un condensador dieléctrico

Imagen de la izda. de Papa November [CC BY-SA 3.0

(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>) or GFDL

(<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>)], via Wikimedia Commons

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Capacitor_schematic_with_dielectric.s](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Capacitor_schematic_with_dielectric.svg)

[vg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Capacitor_schematic_with_dielectric.svg) Imagen de la dcha. de inductiveload - own drawing, done in Inkscape 0.44,

Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1401997>

Figura 8.20: Esquema de un material piezoeléctrico

Imagen de Tizeff - Template:Owennn, CC BY-SA 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2961245>

Figura 8.21: Esquema del funcionamiento de un semiconductor a nivel atómico

Imagen de la izda. de Willy de es, CC BY-SA 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1556722> Imagen de la dcha.

de Ane Miren García Romero

Figura 8.22: Semiconductores tipo N y semiconductores tipo P

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.23: Creación de un campo magnético H y de la inducción magnética B en un material

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.24: La inducción magnética producida por un campo H en un material es función de su susceptibilidad magnética

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.25: Momentos magnéticos asociados a la rotación y al giro del electrón

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.26: Tipos de magnetismo

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.27: Los distintos tipos de materiales magnéticos de acuerdo a su inducción magnética y a la susceptibilidad magnética

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.28: Ejemplo de la organización de los spin electrónicos en una ferrita (ferrimagnética) y en el MnO (antiferromagnético)

Imagen de Ane Miren García Romero

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

Figura 8.29: Magnetización de un material ferromagnético mediante exposición a un campo magnético

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.30: Ciclo de histéresis de magnetización/desmagnetización de Hierro-silicio convencional de grano orientado

Imagen de la isda. de Zureks (Trabajo propio)

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/B-H_loop.png [CC-BY-SA-3.0] (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>). Imagen de la dcha. de Ane Miren García Romero

Figura 8.31: El efecto Meissner: las líneas de flujo magnético no penetran en el superconductor (izda). Superconductor flotando sobre un imán (dcha.)

Imagen de la izda. de Piotr Jaworski, PioM. CC BY-SA 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=242084>

Imagen de la dcha. Legado a Dominio público por [Benutzer:Sansculotte](#) <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=242107>

Figura 8.32: Estructura tipo perovskita.

Imagen derivada de la imagen de Von Ben Mills - Eigenes Werk, Gemeinfrei, <https://de.wikipedia.org/wiki/Yttrium-Barium-Kupferoxid#/media/File:YBCO-unit-cell-CM-3D-balls.png>

Figura 8.33: Ondas electromagnéticas luminosas.

Imagen de SuperManu - Self, based on Image:Onde electromagnetique.png, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2107870>

Figura 8.34: Espectro electromagnético

Imagen derivada de la imagen de I, Ploufandsplash, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2466156> “

Figura 8.35: Absorción y re-emisión de fotones

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.36: Espectro de reflexión de la luz incidente en oro, plata y aluminio

Imagen de DrBob at the English language Wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1729695>

Figura 8.37: Absorción de energía lumínica por un dieléctrico

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.38: Bloque de Germanio (izda.) y Polvo de CdS, usado como pigmento (dcha.).

Imagen izda. de Jurii - <http://images-of-elements.com/germanium.php>, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8165609>. Imagen dcha. de Marco Almbauer - Own work, CC BY-SA 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=44855275>

Figura 8.39: Reflexión y transmisión de la luz al atravesar un medio

Imagen de Ane Miren García Romero

Figura 8.40: La ley de Schnell

Imagen derivada de la imagen de Cristan at English Wikipedia - Transferred from en.wikipedia to Commons., Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3273919>

Figura 8.41: Reflexión por encima del ángulo crítico

Imagen de Josell7 - Trabajo propio, GFDL, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9751179>

Figura 8.42: Espectro de transmisión de la luz en el zafiro (línea azul) y en el rubí (línea roja).

Imagen derivada de la imagen de FDominec - self-made using Gnuplot, GFDL, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3754830>

REFERENCIAS Y AUTORÍA DE IMÁGENES

Figura 8.43: Esquema de un tubo fluorescente

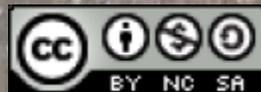
Imagen de Luis María Benítez, uploaded by Paintman - Transferido desde es.wikipedia a Commons., CC BY-SA 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2185231>



ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO

BILBOKO INGENIERITZA ESKOLA



Esta obra está bajo la licencia Reconocimiento-NonCommercial-Compartir bajo la misma licencia 4.0 Internacional de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es_ES.

Imagen de la Porta de y contraporta de: Dalle de una fachada de compuesto de fibra de vidrio con resina polimérica degradada por exposición a la intemperie ceca no al mar (Hondarribia, España, 2014). Propiedad de Ane Miren García Romero.