



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

4.- PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS SÓLIDOS

4. Propiedades eléctricas de los sólidos

- Conductividad eléctrica.
- Metales, semiconductores y aislantes.
- Semiconductores intrínsecos y extrínsecos.
- Dieléctricos.
- Ferroelectricidad.
- Piezoelectricidad.

Conductividad Eléctrica

OBJETIVO: Estudiar la conductividad eléctrica en los materiales y estimar su utilidad como materiales electrónicos.

Orden de magnitud de la conductividad:

- **Superconductores:** Resistencia cero.
- **Metales:** conductividades muy altas.
- **Semiconductores:** “Conducen en un amplio rango de valores”.
- **Aislantes y dieléctricos:** Malos conductores.

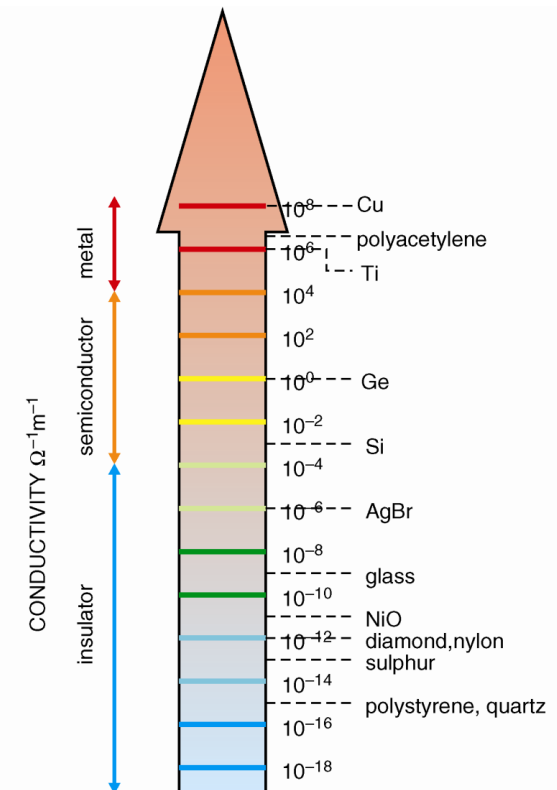
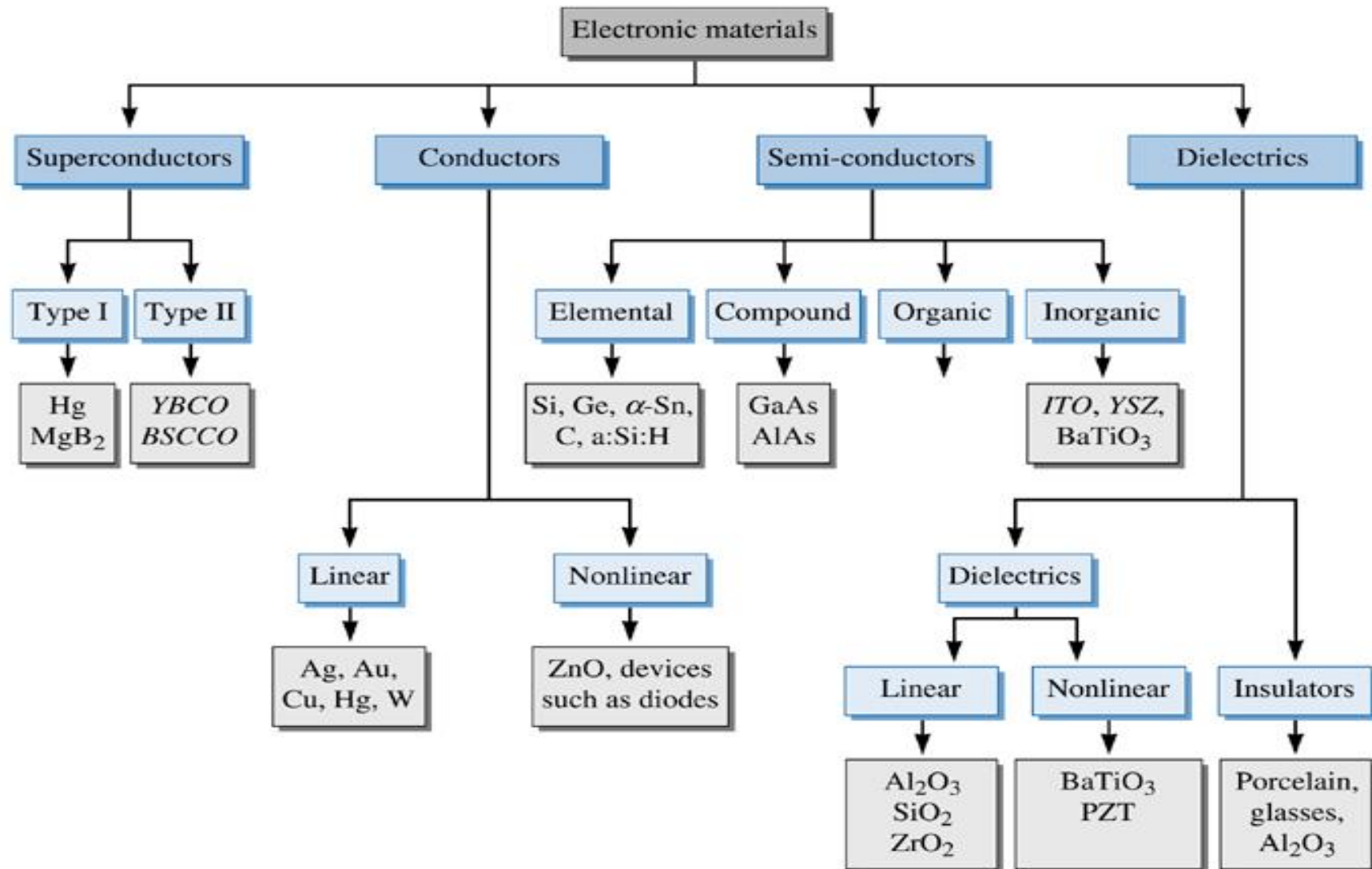


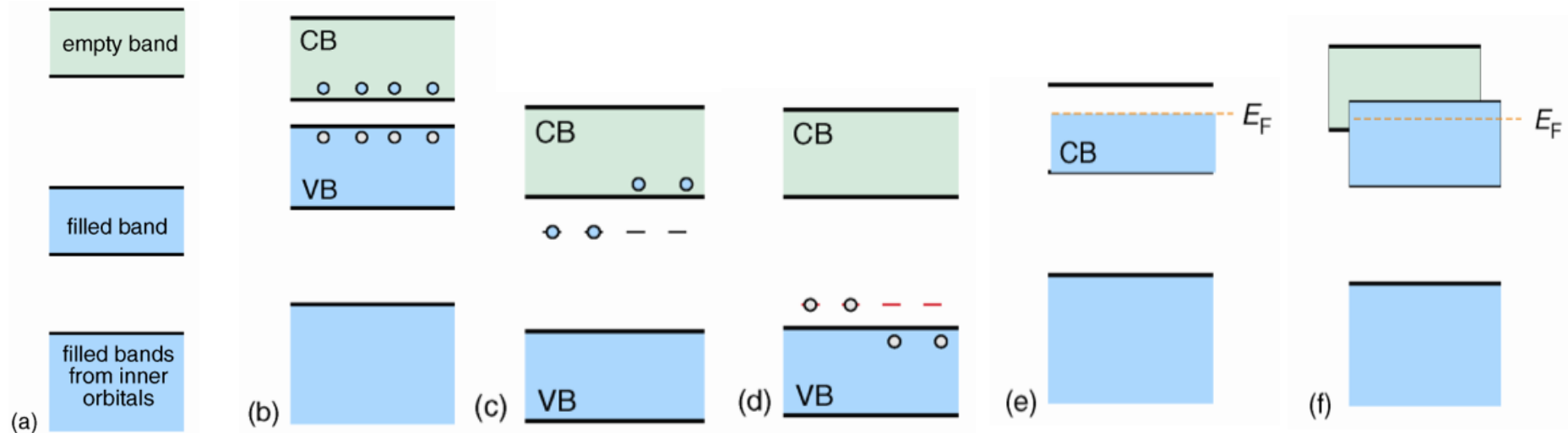
Figure 11.1 The range of electronic conductivity in solids.

Understanding solids: the science of materials, Second Edition. Richard J.D. Tilley.
© 2013 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2013 by John Wiley & Sons, Ltd.

Conductividad Eléctrica



Conductividad Eléctrica



Representación de las bandas de energía de diferentes materiales:

- a. Aislante
- b. Semiconductor intrínseco.
- c. Semiconductor extrínseco tipo n
- d. Semiconductor extrínseco tipo p
- e. Metal
- f. Semimetal

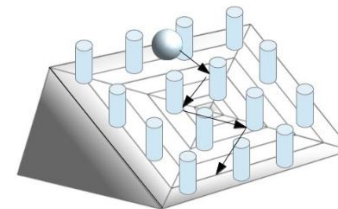
Conductividad Eléctrica

Conceptos básicos para entender la ley de Ohm y la conductividad eléctrica.

- ✓ **Densidad de corriente** – corriente que fluye por unidad de área.
- ✓ **Velocidad de arrastre** – velocidad a la que los portadores de carga se mueven por un material bajo los efectos de un campo eléctrico o magnético aplicado.
- ✓ **Movilidad** – facilidad con que los portadores de carga se mueven por un material.
- ✓ **Constante dieléctrica** – relación entre la permitividad de un material y la del vacío. Describe la habilidad relativa de un material para polarizarse y almacenar carga.

LEY DE OHM: $\vec{J} = \sigma \vec{E}$

$$\vec{J} = nq\vec{v}_a \quad \vec{v}_a = \text{velocidad de arrastre}$$



Conductividad Eléctrica

TABLE 18-1 ■ Electrical conductivity of selected materials at $T = 300\text{ K}^*$

Material	Conductivity ($\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)
Superconductors	
Hg, Nb_3Sn , $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ MgB_2	Infinite (under certain conditions such as low temperatures)
Metals	
Alkali metals:	
Na	2.13×10^5
K	1.64×10^5
Alkali earth metals:	
Mg	2.25×10^5
Ca	3.16×10^5
Group 3B metals:	
Al	3.77×10^5
Ga	0.66×10^5
Transition metals:	
Fe	1.00×10^5
Ni	1.46×10^5
Group 1B metals:	
Cu	5.98×10^5
Ag	6.80×10^5
Au	4.26×10^5

Material	Conductivity ($\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)
Semiconductors	
Group 4B elements:	
Si	5×10^{-6}
Ge	0.02
α -Sn	0.9×10^5
Compound semiconductors	
GaAs	2.5×10^{-9}
AlAs	0.1
SiC	10^{-10}
Ionic Conductors	
Indium tin oxide (ITO)	
Yttria-stabilized zirconia (YSZ)	
Insulators, Linear and Nonlinear Dielectrics	
Polymers:	
Polyethylene	10^{-15}
Polytetrafluorethylene	10^{-18}
Polystyrene	10^{-17} to 10^{-19}
Epoxy	10^{-12} to 10^{-17}
Ceramics:	
Alumina (Al_2O_3)	10^{-14}
Silicate glasses	10^{-17}
Boron nitride (BN)	10^{-13}
Barium titanate (BaTiO_3)	10^{-14}
C (diamond)	$<10^{-18}$

* Unless specified otherwise, assumes high purity material.

Conductividad Eléctrica

Recordamos del tema anterior que la conductividad puede escribirse en términos de la movilidad de los portadores de carga

$$\sigma = ne \mu_e \quad \text{donde la movilidad viene dada por} \quad \mu_e = \frac{e \tau}{m_e^*}$$

Y τ es el tiempo entre sucesivos procesos de “scattering”, llamado también tiempo de relajación.

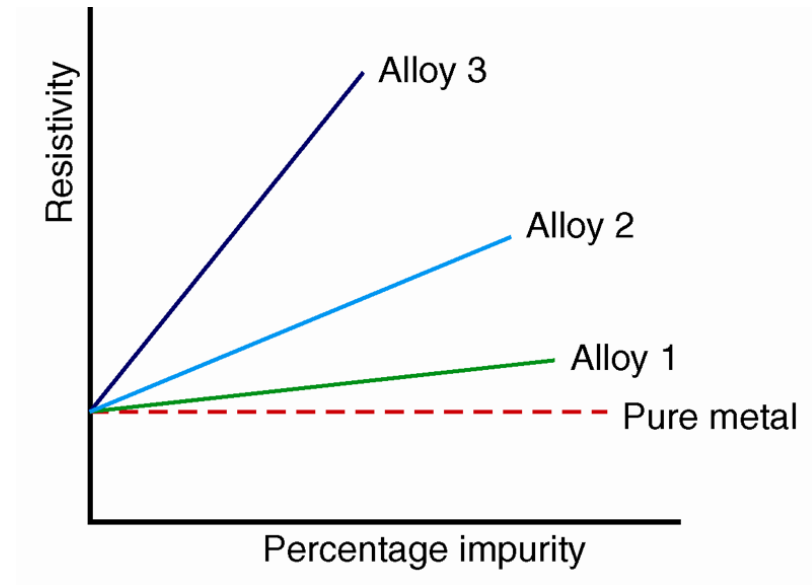
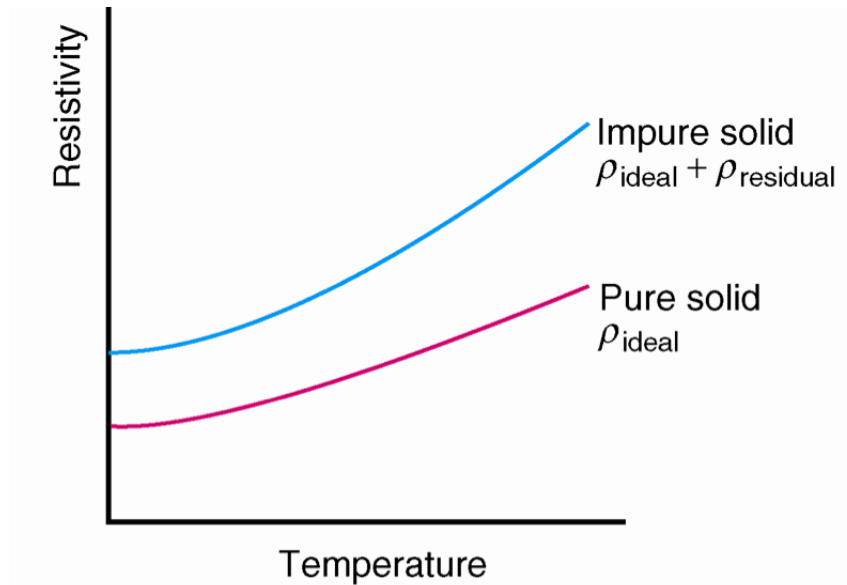
$$\sigma = ne \mu_e = \frac{ne^2 \tau}{m_e^*} \Rightarrow \rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m_e^*}{ne^2 \tau}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Regla Mathissen} \\ \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{th}} + \frac{1}{\tau_{def}} + \frac{1}{\tau_{imp}} \end{array} \right\} \Rightarrow \rho = \frac{m_e^*}{ne^2 \tau} = \frac{m_e^*}{ne^2 \tau_{th}} + \frac{m_e^*}{ne^2 \tau_{def}} + \frac{m_e^*}{ne^2 \tau_{imp}}$$

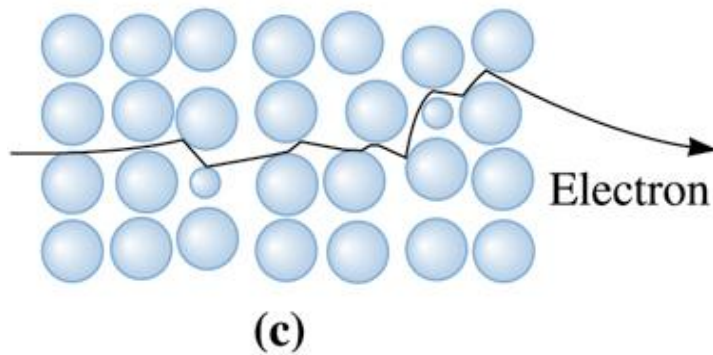
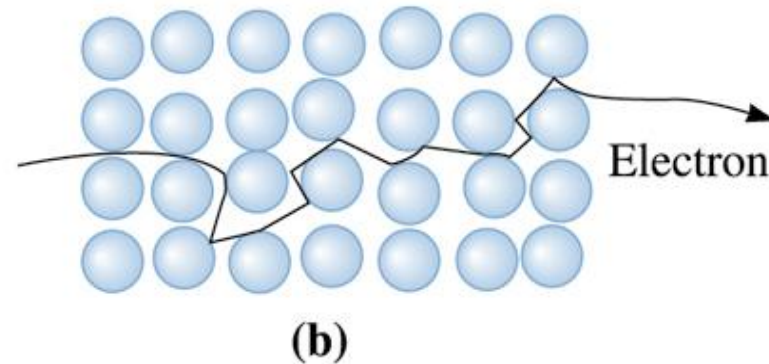
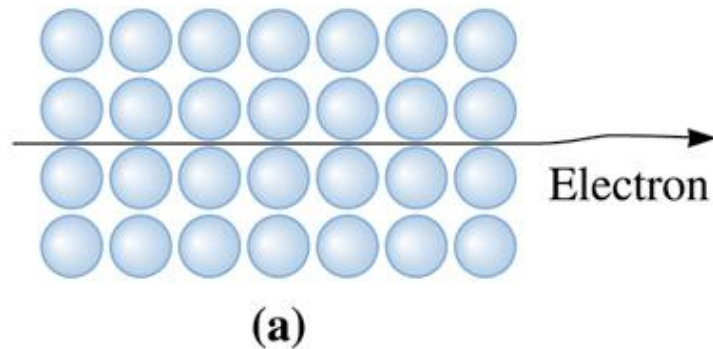
Conductividad Eléctrica

$$\rho = \frac{m_e^*}{ne^2\tau} = \frac{m_e^*}{ne^2\tau_{th}} + \frac{m_e^*}{ne^2\tau_{def}} + \frac{m_e^*}{ne^2\tau_{imp}} = \rho_{Fonon.} + \rho_{Defec.} + \rho_{Impur.}$$

$$\rho = \rho_{Ideal} + \rho_{Residual} \quad \left\{ \begin{array}{l} \rho_{Ideal} = \text{Fonones} \\ \rho_{Residual} = \text{Contrib. extrínsecas} \end{array} \right.$$



Conductividad Eléctrica



Movimiento de un electrón a través de:

- Un cristal perfecto
- Un cristal sometido a alta temperatura.
- Un cristal que contiene defectos a nivel atómico.

Los procesos de “Scattering” de electrones reducen la movilidad y por tanto la conductividad

Conductividad Eléctrica (METALES)

Control de la conductividad en metales

- ✓ **Recorrido libre medio** – distancia promedio que recorren los electrones de carga sin ser dispersados por los átomos.
- ✓ **Temperatura** – al aumentar la temperatura de un metal, los átomos vibran, fonones de la red.
- ✓ **Defectos a nivel atómico** – las imperfecciones de la red dispersan electrones, lo que reduce la movilidad y conductividad de un metal.
- ✓ **Regla de Matthiessen** – la resistividad de un material metálico es la suma de una resistividad que tiene en cuenta los efectos de la temperatura (ρ_T), y una resistividad independiente de la temperatura a la que contribuyen los defectos a nivel atómico, incluidas las impurezas (ρ_d).
- ✓ **Efectos de procesamiento y reforzado**

Conductividad Eléctrica (METALES)

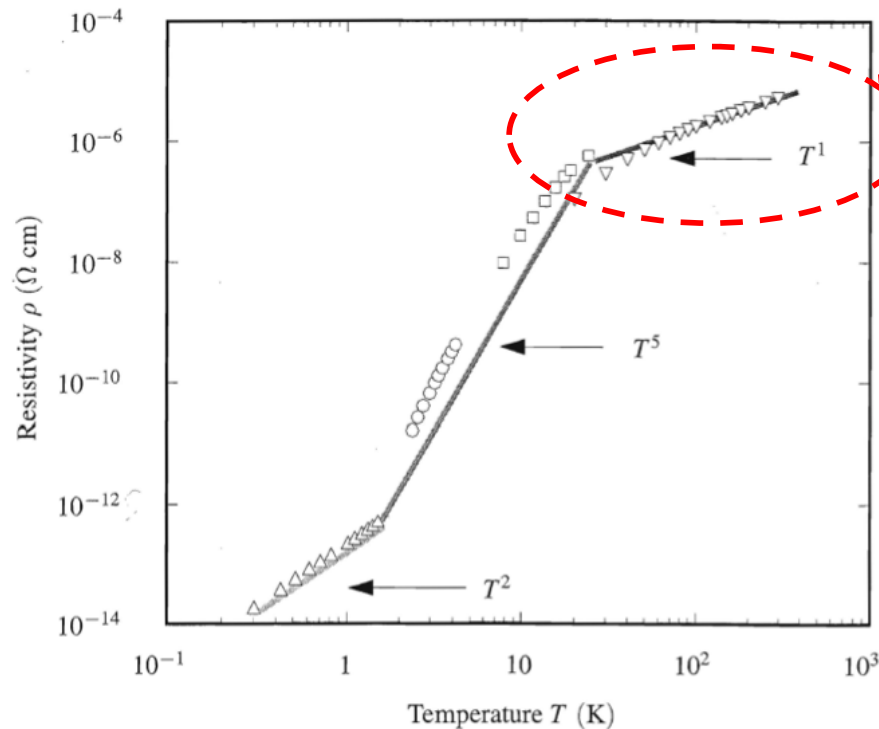
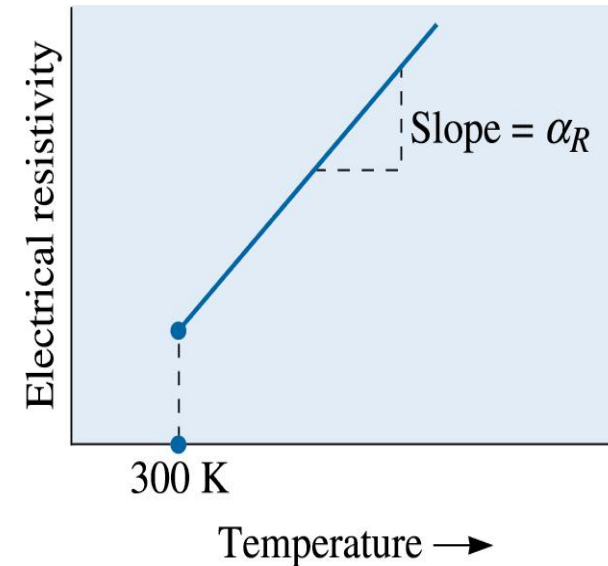


Figure 18.1. Resistivity of potassium from 0.1 to 300 K. At the lowest temperatures, the resistance varies as T^2 , from 2 to 20 K, it varies as T^5 , and from 100 K upwards, it varies as T^1 . [Source: Bass et al. (1990).]



El efecto de la temperatura en la resistividad eléctrica de un metal sin defectos, a alta T.

La pendiente de la curva se llama
COEFICIENTE DE LA RESISTIVIDAD

(Figura del tema 3)

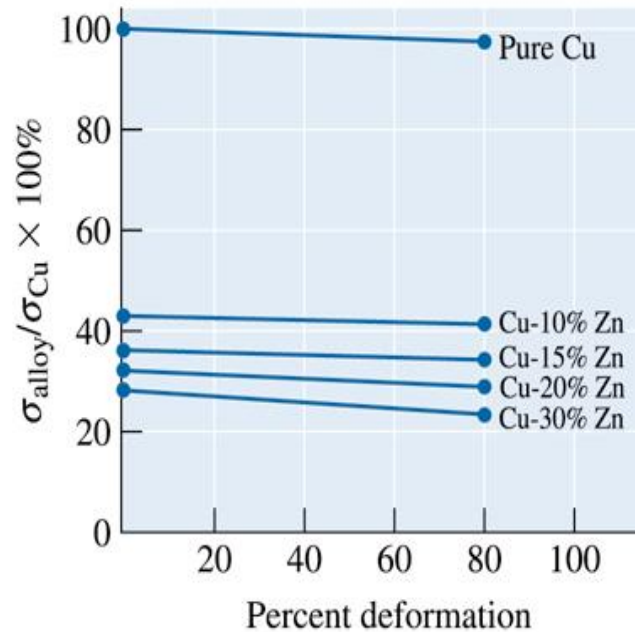
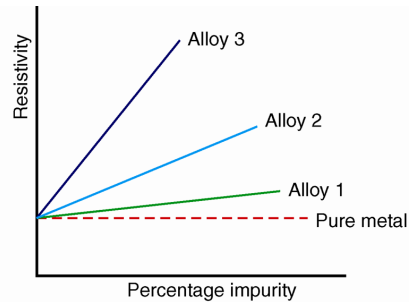
Conductividad Eléctrica (METALES)

TABLE 18-3 ■ *The temperature resistivity coefficient α_R for selected metals[1]*

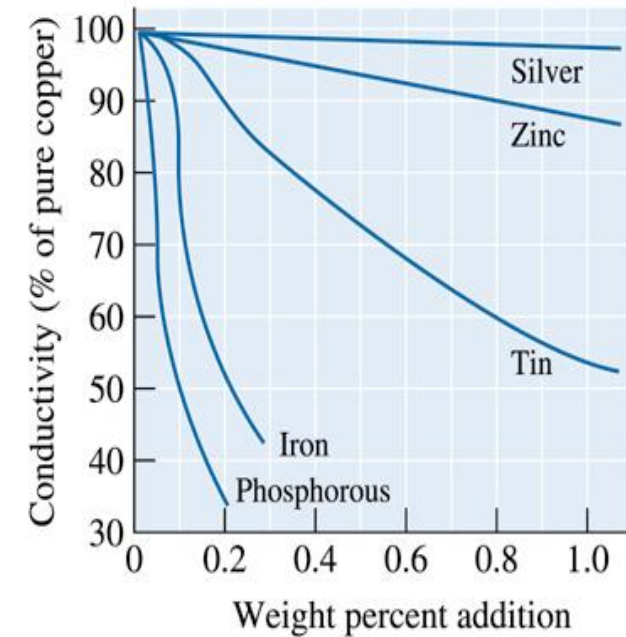
Metal	Room Temperature Resistivity (ohm · cm)	Temperature Resistivity Coefficient (α_R) (ohm/ohm · °C)
Be	4.0×10^{-6}	0.0250
Mg	4.45×10^{-6}	0.0037
Ca	3.91×10^{-6}	0.0042
Al	2.65×10^{-6}	0.0043
Cr	12.90×10^{-6} (0°C)	0.0030
Fe	9.71×10^{-6}	0.0065
Co	6.24×10^{-6}	0.0053
Ni	6.84×10^{-6}	0.0069
Cu	1.67×10^{-6}	0.0043
Ag	1.59×10^{-6}	0.0041
Au	2.35×10^{-6}	0.0035
Pd	10.8×10^{-6}	0.0037
W	5.3×10^{-6} (27°C)	0.0045
Pt	9.85×10^{-6}	0.0039

(Source: Reprinted by permission from Handbook of Electronic Materials, by P.S. Neelakanta, pp. 215–216, Table 9-1. Copyright © 1995 CRC Press, Boca Raton, Florida.)

Conductividad Eléctrica (METALES)



(a)



(b)

CONTRIBUCIONES EXTRÍNSECAS A LA RESISTIVIDAD

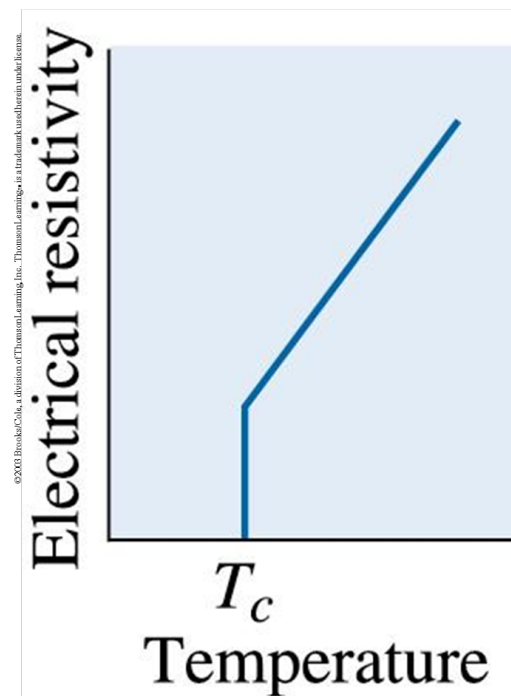
(a) Efecto de endurecimiento del material en frío sobre la conductividad eléctrica del cobre y (b) efecto de la adición de ciertas impurezas seleccionadas en la conductividad del cobre.

Conductividad Eléctrica (METALES)

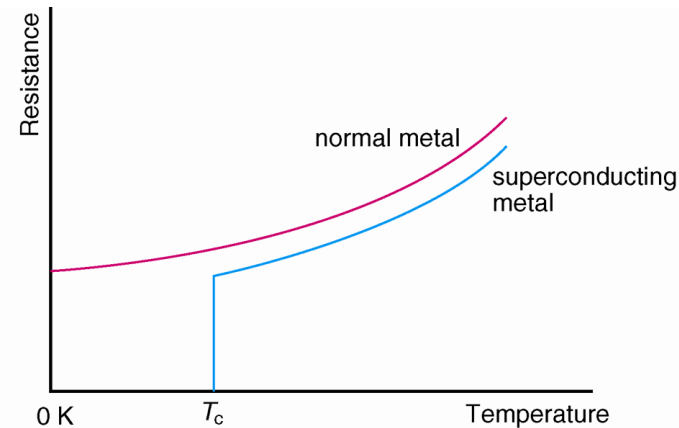
TABLE 18-4 ■ The effect of alloying, strengthening, and processing on the electrical conductivity of copper and its alloys

Alloy	$\frac{\sigma_{\text{alloy}}}{\sigma_{\text{Cu}}} \times 100$	Remarks
Pure annealed copper	100	Few defects to scatter electrons; the mean free path is long.
Pure copper deformed 80%	98	Many dislocations, but because of the tangled nature of the dislocation networks, the mean free path is still long.
Dispersion-strengthened Cu-0.7% Al ₂ O ₃	85	The dispersed phase is not as closely spaced as solid-solution atoms, nor is it coherent, as in age hardening. Thus, the effect on conductivity is small.
Solution-treated Cu-2% Be	18	The alloy is single phase; however, the small amount of solid-solution strengthening from the supersaturated beryllium greatly decreases conductivity.
Aged Cu-2% Be	23	During aging, the beryllium leaves the copper lattice to produce a coherent precipitate. The precipitate does not interfere with conductivity as much as the solid-solution atoms.
Cu-35% Zn	28	This alloy is solid-solution strengthened by zinc, which has an atomic radius near that of copper. The conductivity is low, but not as low as when beryllium is present.

Conductividad Eléctrica (SUPERCONDUCTORES)

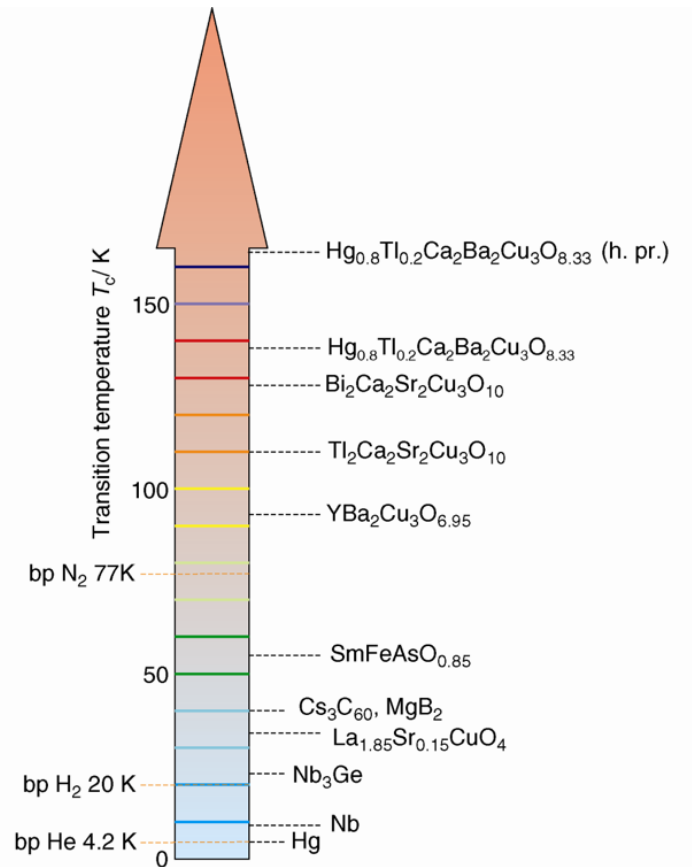


La resistividad eléctrica de un **superconductor** es cero por debajo de una cierta temperatura crítica. Dicha temperatura no es universal y depende del material.



Variación de la resistencia de un metal normal, comparado con un superconductor cuando la temperatura se acerca a 0K.

Conductividad Eléctrica (SUPERCONDUCTORES)



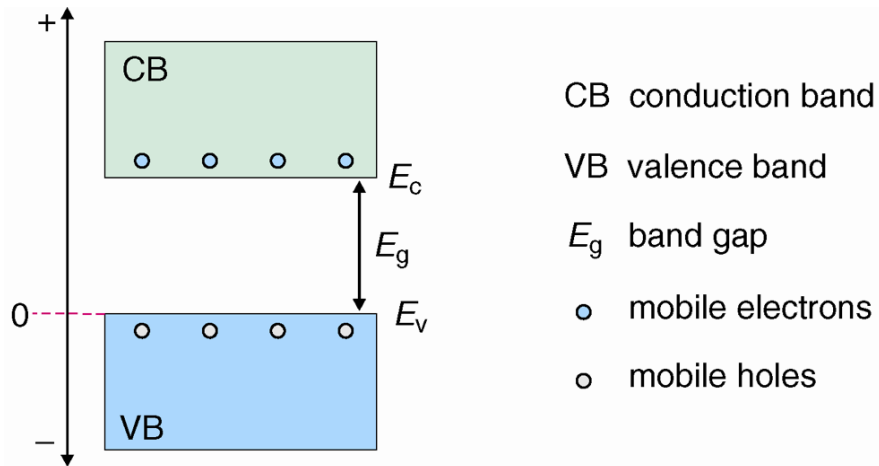
*Temperaturas de transición
superconductora para ciertos materiales*

La superconductividad es un mecanismo cuántico, uno de los pocos que se manifiestan en el mundo “macroscópico”.

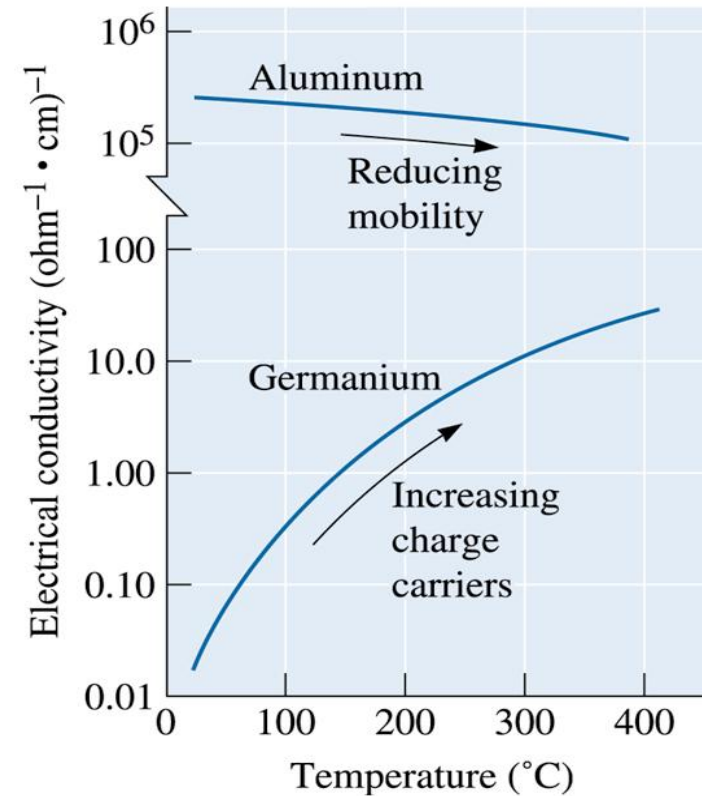
La temperatura a la cual el material pasa a ser superconductor se denomina **Temperatura de transición superconductora (T_c)**.

La mayoría de los metales son superconductores por debajo de los 10K. El actual record de temperatura T_c está en los **138 K**.

Conductividad Eléctrica (SEMICONDUCTORES)



Descripción simplificada de la estructura de bandas planas para un semiconductor intrínseco



Conductividad eléctrica frente a la temperatura de un semiconductor intrínseco y de un metal.

Notese el corte en el eje y.

Conductividad Eléctrica (SEMICONDUCTORES)

Conceptos básicos para entender los semiconductores

- ✓ **Semiconductor intrínseco** - semiconductor en el que sus propiedades se controlan por sus elementos constituyentes no por impurezas.
- ✓ **Semiconductor extrínseco** - semiconductor al que se han añadido dopantes, y éstos controlan el número y tipo de portadores.
- ✓ **Dopado** – incorporación deliberada de pequeñas cantidades controladas de otros elementos para modificar el nº de portadores en un semiconductor.
- ✓ **Termistor** – dispositivo de semiconductor que es sensible a los cambios de temperatura.
- ✓ **Recombinación radiativa** - Recombinación de huecos y electrones que conduce a la emisión de luz.

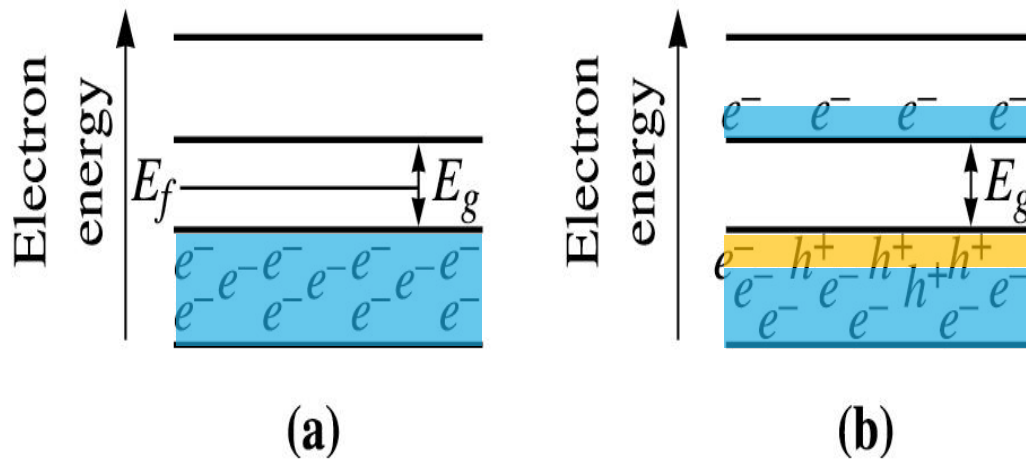
Conductividad Eléctrica (SEMICONDUCTORES)

Table 18-6 ■ *Properties of commonly encountered semiconductors*

Semiconductor	Bandgap eV	Mobility of Electrons (μ_n) $\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$	Mobility of Holes (μ_p) $\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$	Dielectric Constant (k)	Resistivity $\Omega \cdot \text{cm}$	Density $\frac{\text{gm}}{\text{cm}^3}$	Melting Temperature $^{\circ}\text{C}$
Silicon (Si)	1.11	1350	480	11.8	2.5×10^5	2.33	1415
Amorphous Silicon (a:Si:H)	1.70	1	10^{-2}	~ 11.8	10^{10}	~ 2.30	—
Germanium (Ge)	0.67	3900	1900	16.0	43	5.32	936
SiC (α)	2.86	500		10.2	10^{10}	3.21	2830
Gallium Arsenide (GaAs)	1.43	8500	400	13.2	4×10^8	5.31	1238
Diamond	~ 5.50	1800	1500	5.7	$> 10^{18}$	3.52	~ 4200
α -Sn	0.10	2000	1000	—	10^{-4}	5.80	232

Conductividad Eléctrica (SEMICONDUCTORES)

SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO



Distribución de electrones y huecos en las bandas de valencia y conducción:

- (a) a cero absoluto
- (b) a una temperatura elevada.

En todo momento ha de cumplirse :

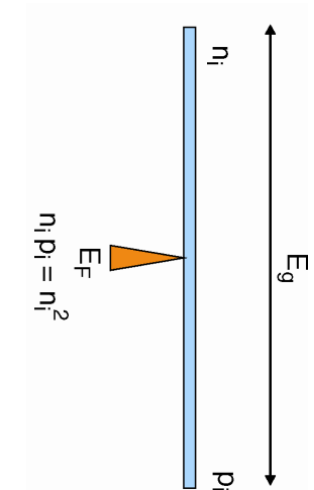
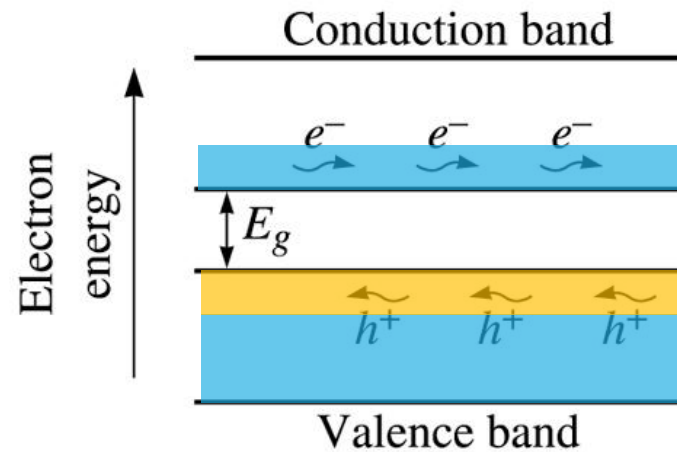
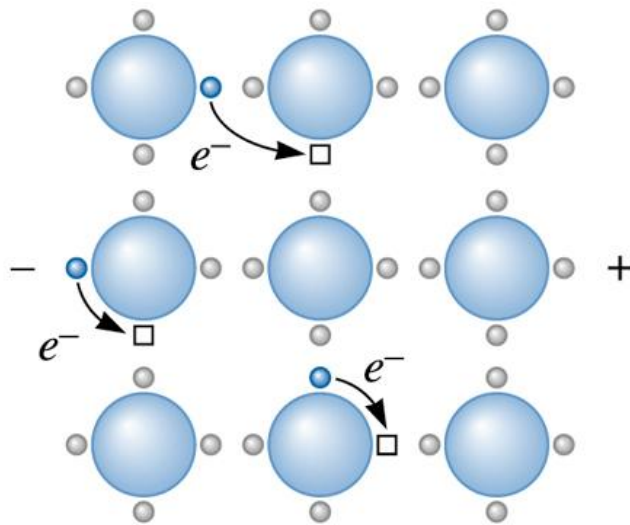
$$n_0 = p_0 \Rightarrow n_0 p_0 = n_i^2 = p_i^2$$

n_0 es el número de electrones en un semiconductor intrínseco

p_0 es el número de huecos en un semiconductor intrínseco

Conductividad Eléctrica (SEMICONDUCTORES)

SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO



Cuando aplicamos un campo eléctrico a un semiconductor, los electrones se mueven en la banda de conducción mientras que los huecos se mueven en la banda de valencia en dirección opuesta.

Conductividad Eléctrica (SEMICONDUCTORES)

SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO

Se puede demostrar que:

$$n_i = p_i = 4.826 \times 10^{21} \left(\frac{m_e^* m_h^*}{m_e^2} \right)^{3/4} T^{3/2} \exp \left(-\frac{E_g}{2kT} \right)$$

Donde m_e^* es la masa efectiva de los electrones, m_h^* la masa efectiva de los huecos, m_e^2 la masa del electrón al cuadrado y k la constante de Boltzman. Por tanto tenemos que, en general:

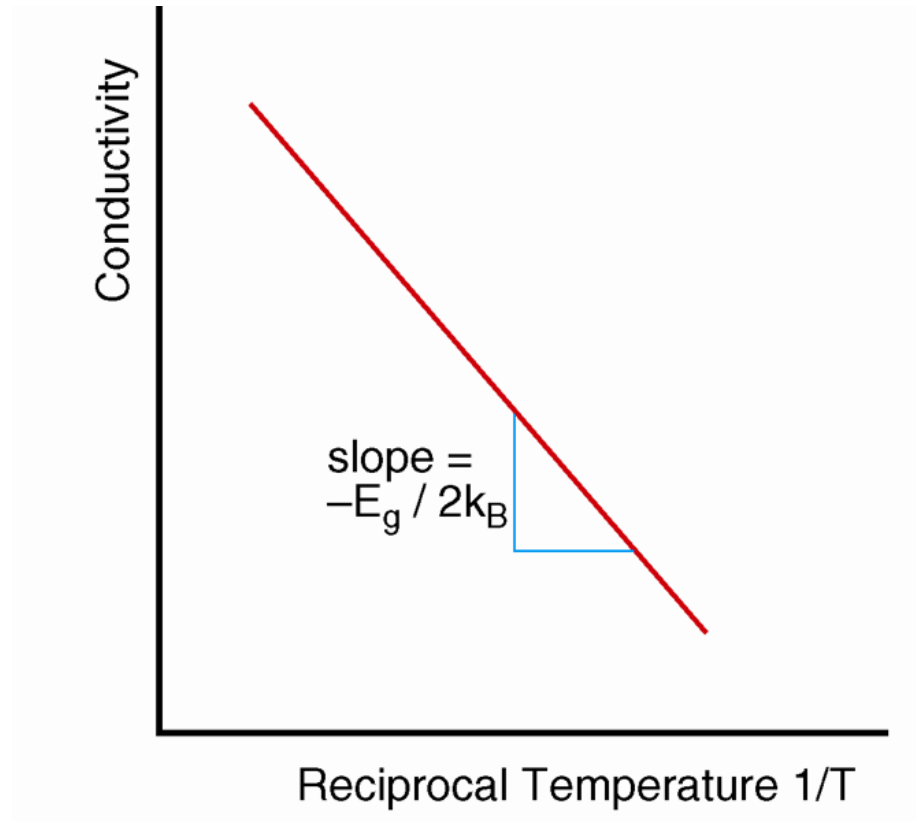
$$n \propto \exp \left(-\frac{E_g}{2kT} \right) \qquad p \propto \exp \left(-\frac{E_g}{2kT} \right)$$

Dado que la conductividad es proporcional a la concentración de portadores

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left(-\frac{E_g}{2kT} \right) \quad \longrightarrow \quad \ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2kT}$$

Conductividad Eléctrica (SEMICONDUCTORES)

SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO



Comportamiento de la conductividad en un semiconductor intrínseco.

La representación de la conductividad frente al inverso de la temperatura es lineal y la pendiente está relacionada con el **intervalo de energía prohibida** (E_g) del semiconductor.

Conductividad Eléctrica (SEMICONDUCTORES)

SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO

En un semiconductor intrínseco tenemos que $n = p = n_i = p_i$

Las ecuaciones anteriores demuestran que $n \cdot p = \text{constante}$ a una temperatura dada.

$$np = 2.33 \times 10^{43} \left(\frac{m_e^* m_h^*}{m_e^2} \right)^{3/2} T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \longrightarrow np \propto T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

En general en un semiconductor intrínseco el nivel de Fermi está situado en el centro del intervalo prohibido de energía (en primera aproximación).

$$E_F = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right) \approx \frac{1}{2} E_g$$

Conductividad Eléctrica (SEMICONDUCTORES)

Considérese el Germanio a 25 °C. Estímese (a) el número de portadores de carga, (b) la fracción del total de electrones en la banda de valencia que se excitan a la banda de conducción y (c), el valor de la constante n_0

SOLUCIÓN:

De los datos indicados anteriormente, $\rho = 43 \, \Omega \cdot \text{cm}$ a 25 °C; por lo tanto

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = 0.023 \, \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$$

De la misma tabla extraemos que **E_g (germanio) = 0.67 eV** a 25 °C

Las movilidades para huecos y electrones vienen dadas por:

$$\mu_n = 3900 \, \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} \quad ; \quad \mu_p = 1900 \, \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$2k_B T = (2) \left(8.63 \times 10^{-5} \, \frac{\text{eV}}{\text{K}} \right) (273 + 25) = 0.0514 \, \text{eV} \quad (\text{a } 25 \, ^\circ\text{C})$$

Conductividad Eléctrica (SEMICONDUCTORES)

SOLUCIÓN (Continuación):

Por lo tanto y atendiendo a las expresiones ya indicadas:

$$\sigma^{Total} = \sigma^{elec} + \sigma^{hue} = nq\mu_n + pq\mu_p = nq(\mu_n + \mu_p)$$

$$n = \frac{\sigma}{q(\mu_n + \mu_p)} = \frac{0.023}{(1.6 \times 10^{-19})(3900 + 1900)} = 2.5 \times 10^{13} \frac{\text{electrones}}{\text{cm}^3}$$

(b) El parámetro de red del germanio cúbico tipo diamante es 5.6575×10^{-8} cm. Por tanto el número total de electrones en la banda de valencia del germanio será:

$$\text{Electrones totales} = \frac{(8 \text{ átomos/celda})(4 \text{ elect/átomo})}{(5.6575 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 1.77 \times 10^{23}$$

$$\text{Fracción excitada} = \frac{2.5 \times 10^{13}}{1.77 \times 10^{23}} = 1.41 \times 10^{-10}$$

Conductividad Eléctrica (SEMICONDUCTORES)

SOLUCIÓN (Continuación):

Por último, el valor de n_0 será:

$$n_0 = \frac{n}{\exp\left(-E_g/2k_bT\right)} = \frac{2.5 \times 10^{13}}{\exp(-0.67/0.0514)} = 1.14 \times 10^{19} \frac{\text{portadores}}{\text{cm}^3}$$

