



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

4.- PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS SÓLIDOS

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

FISICA DEL ESTADO SOLIDO II

4. Propiedades eléctricas de los sólidos

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

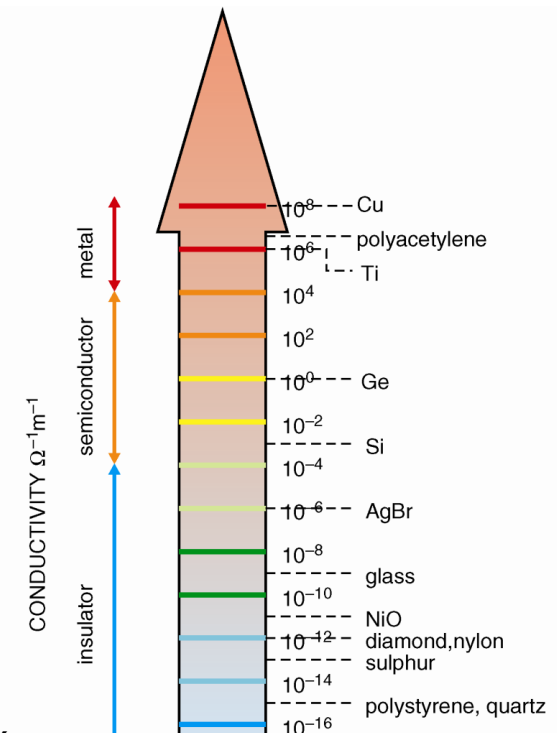
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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.

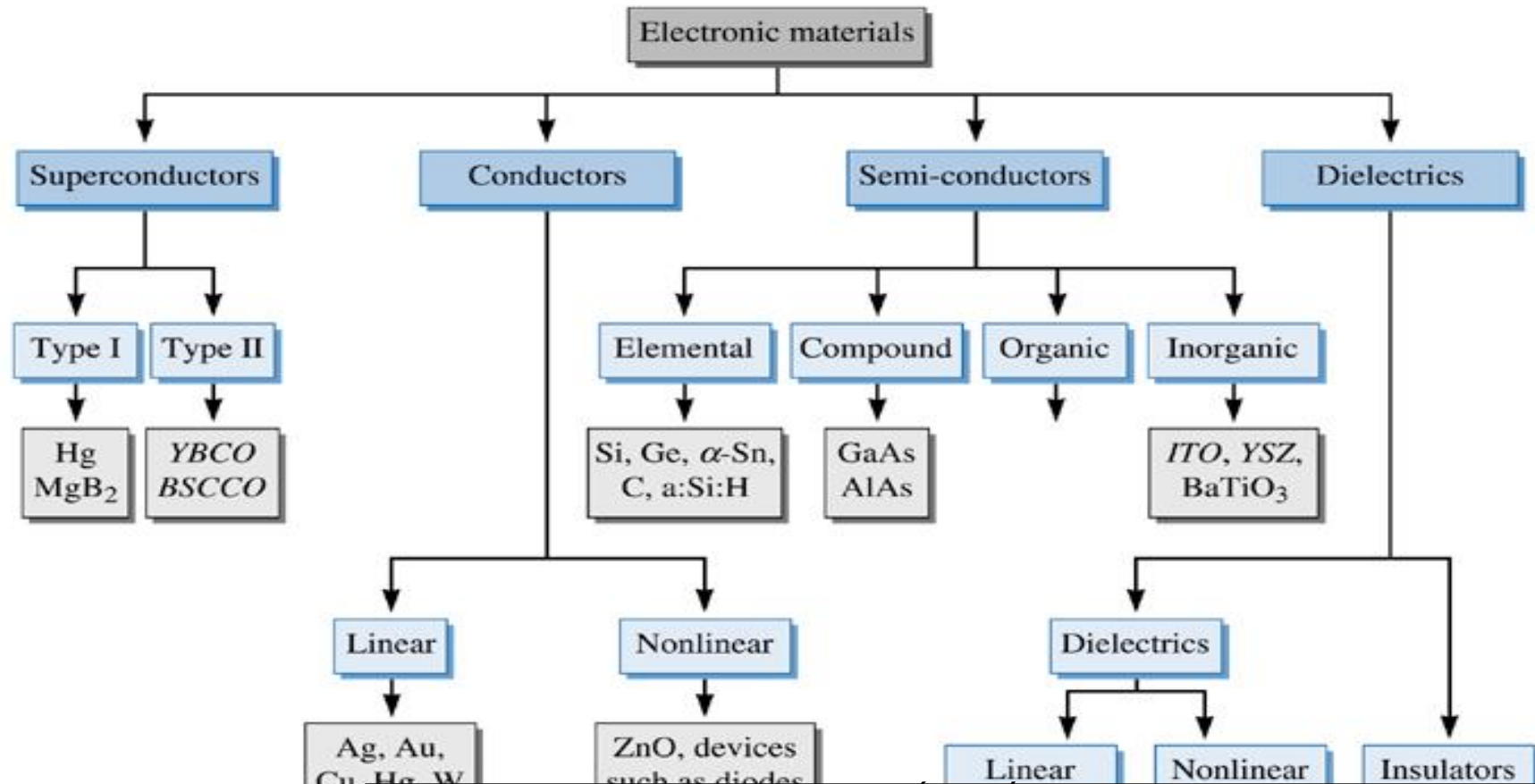


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

 ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

Conductividad Eléctrica

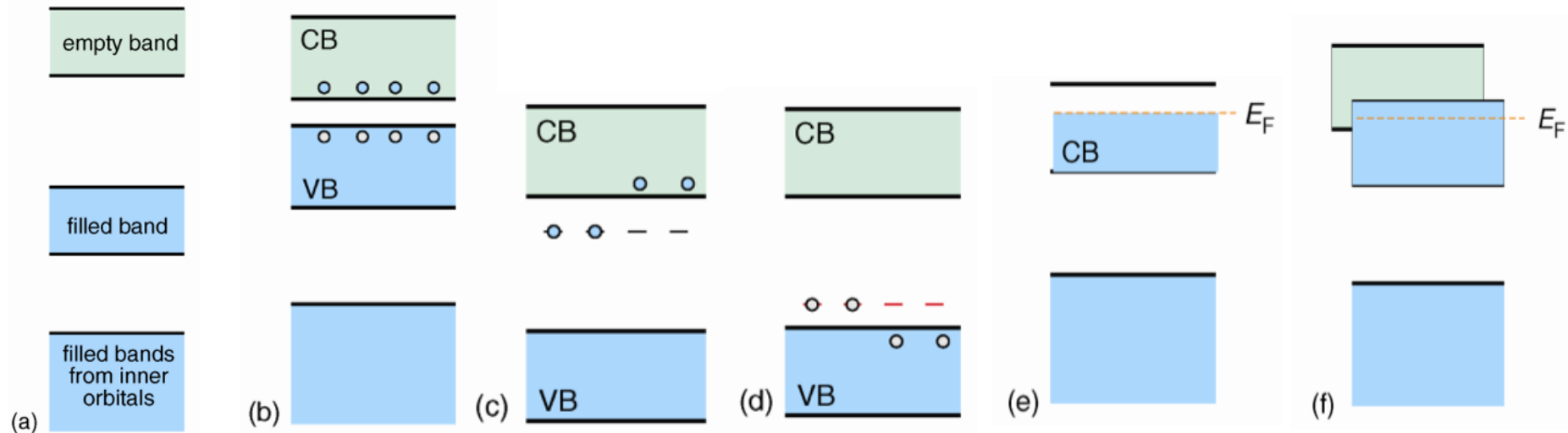


Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Conductividad Eléctrica



Representación de las bandas de energía de diferentes materiales:

- Aislante
- Semiconductor intrínseco.
- Semiconductor extrínseco tipo n
- Semiconductor extrínseco tipo p

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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:	

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 (<i>ITO</i>)	
Yttria-stabilized zirconia (<i>YSZ</i>)	
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}

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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.

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

Regla Mathissen



$m_e^* \quad m_e^* \quad m_e^* \quad m_e^*$

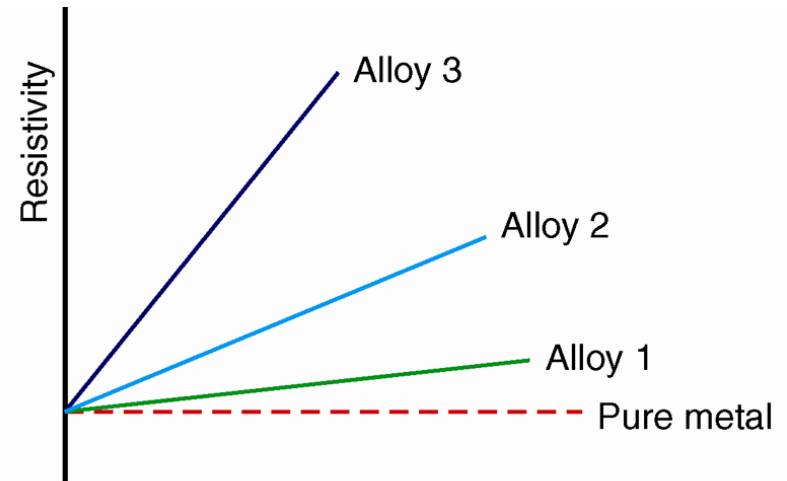
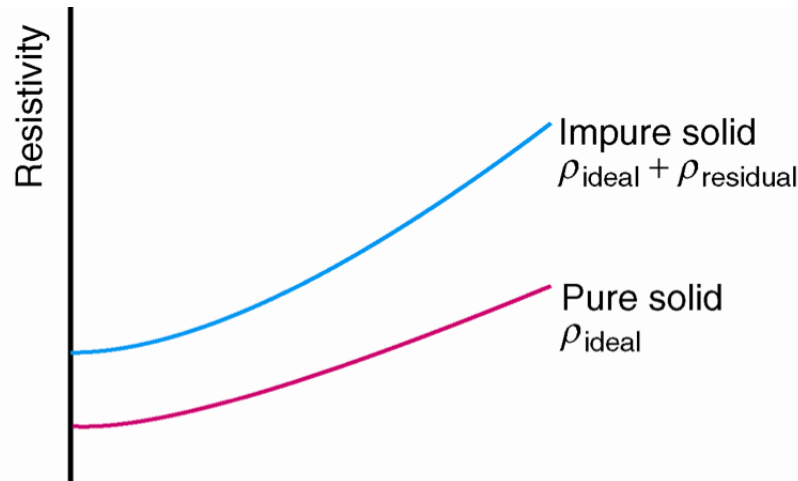
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Conductividad Eléctrica

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

$$\rho = \rho_{Ideal} + \rho_{Residual} \begin{cases} \rho_{Ideal} = \text{Fonones} \\ \rho_{Residual} = \text{Contrib. extrínsecas} \end{cases}$$

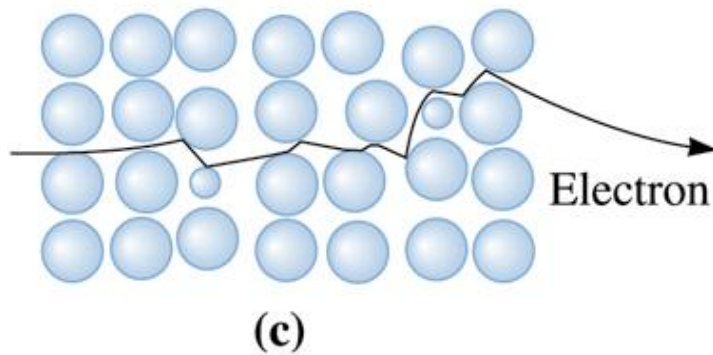
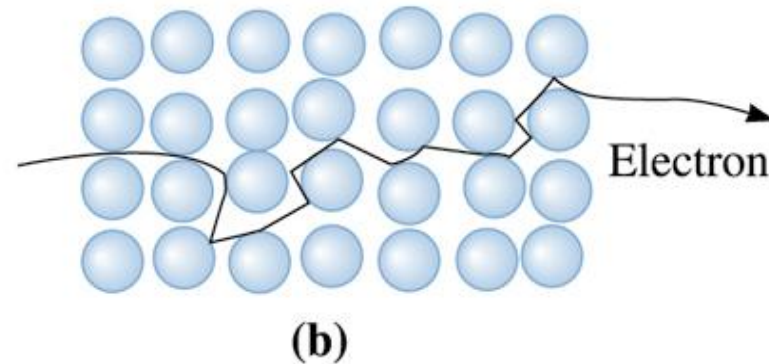
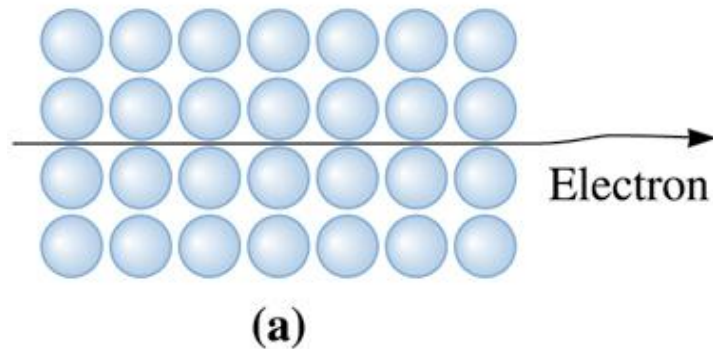


CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

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.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Conductividad Eléctrica (METALES)

Control de la conductividad en metales

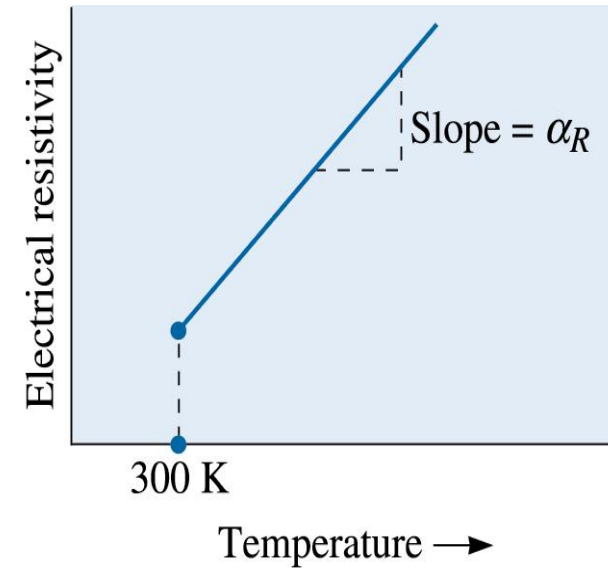
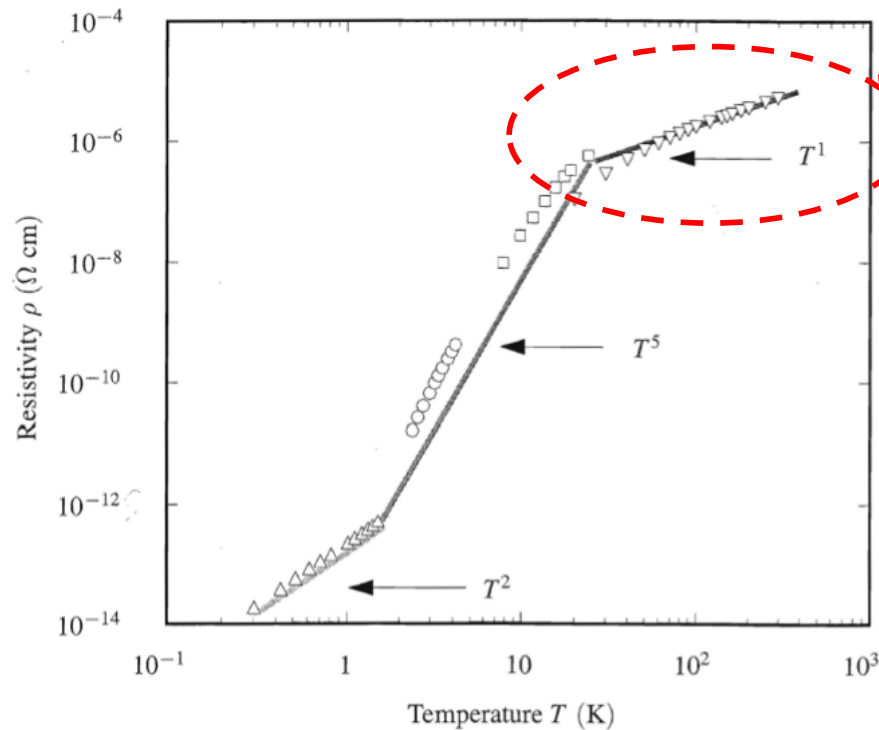
- ✓ **Recorrido libre medio** – distancia promedio que recorren los electrones de carga sin ser dispersados por los átomos.
- ✓ **Temperatura** – al aumentar la temperatura de un metal, los átomos vibran, fonones de la red.
- ✓ **Defectos a nivel atómico** – las imperfecciones de la red dispersan electrones, 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 procesado y reforzado**

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Conductividad Eléctrica (METALES)



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

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Conductividad Eléctrica (METALES)

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

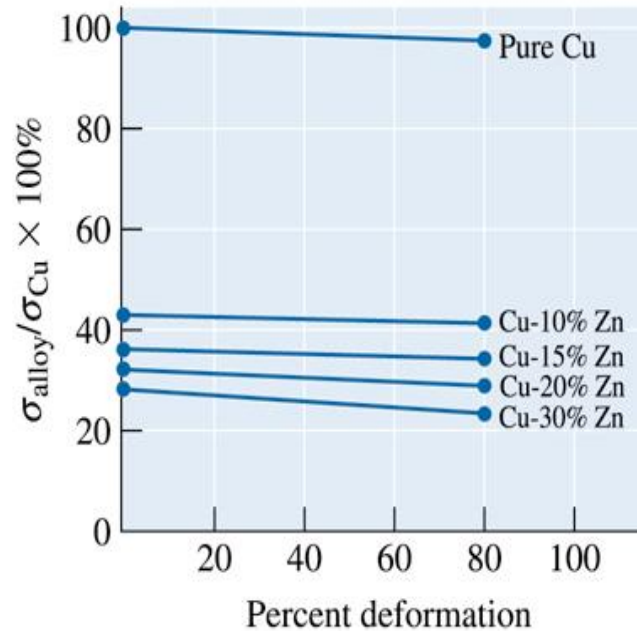
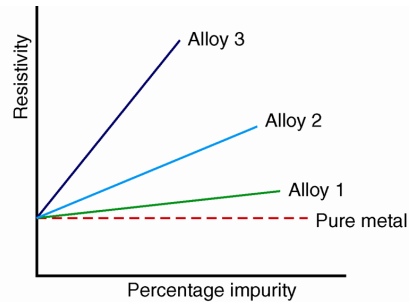
Metal	Room Temperature Resistivity (ohm · cm)	Temperature Resistivity Coefficient (α_R) (ohm/ohm · °C)
Be	4.0×10^{-6}	0.0250
Mg	4.45×10^{-6}	0.0037
Ca	3.91×10^{-6}	0.0042
Al	2.65×10^{-6}	0.0043
Cr	12.90×10^{-6} (0°C)	0.0030
Fe	9.71×10^{-6}	0.0065
Co	6.24×10^{-6}	0.0053
Ni	6.84×10^{-6}	0.0069
Cu	1.67×10^{-6}	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

Cartagena99

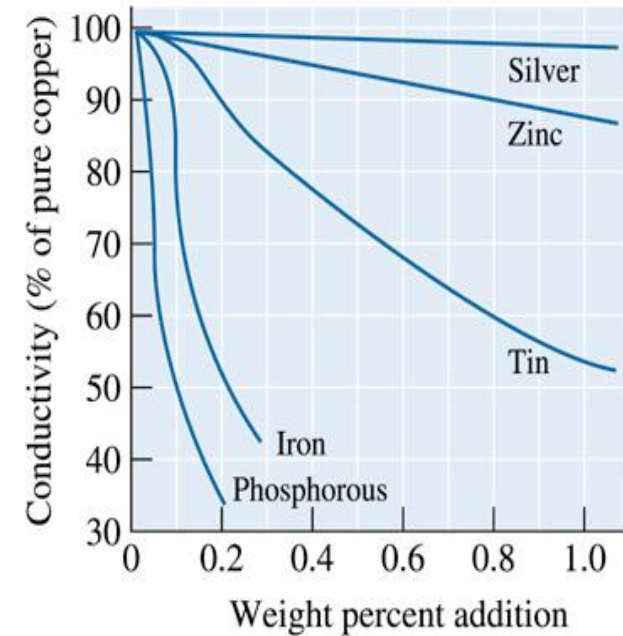
CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Conductividad Eléctrica (METALES)



(a)



(b)

CONTRIBUCIONES EXTRÍNSECAS A LA RESISTIVIDAD

(a) Efecto de endurecimiento del material en frío sobre la conductividad eléctrica del

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

Conductividad Eléctrica (METALES)

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

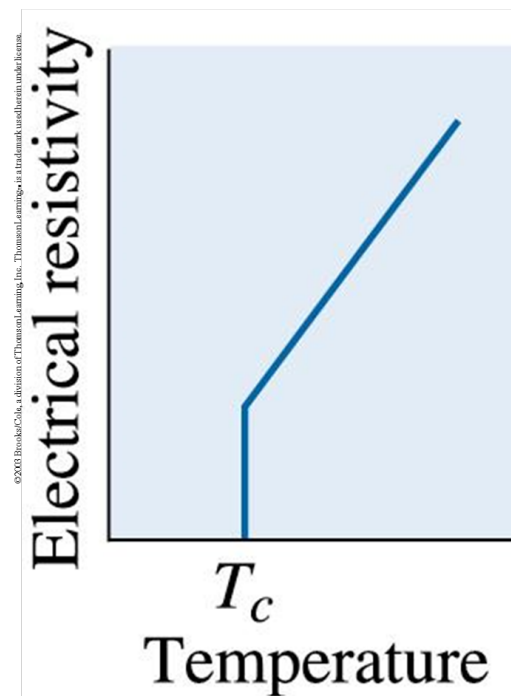
Alloy	$\frac{\sigma_{\text{alloy}}}{\sigma_{\text{Cu}}} \times 100$	Remarks
Pure annealed copper	100	Few defects to scatter electrons; the mean free path is long.
Pure copper deformed 80%	98	Many dislocations, but because of the tangled nature of the dislocation networks, the mean free path is still 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

Cartagena99

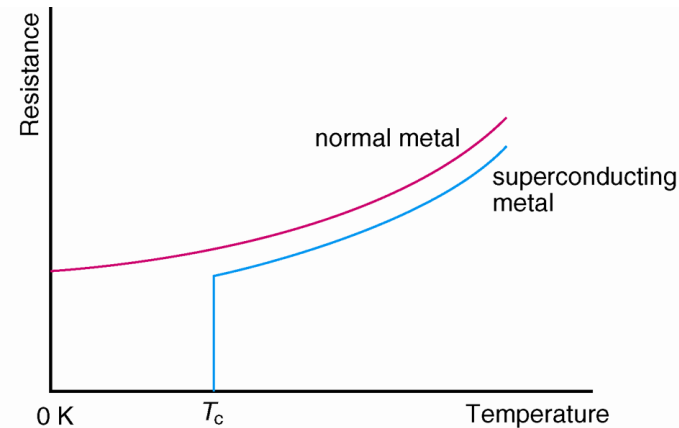
CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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.

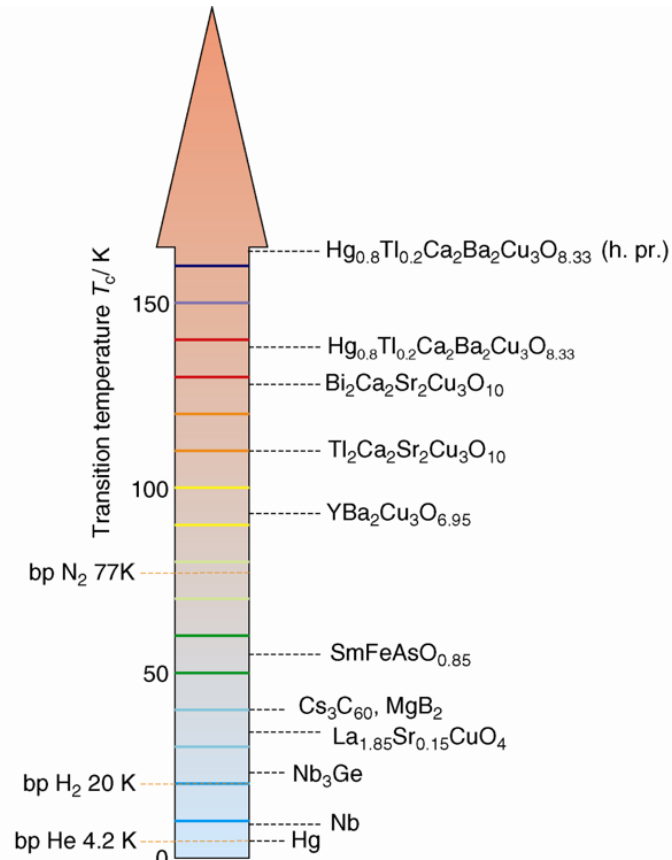


Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Conductividad Eléctrica (SUPERCONDUCTORES)



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 superconductor (T_c)**.

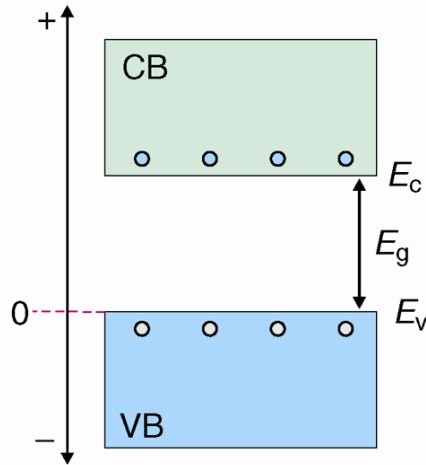
La mayoría de los metales son superconductores por debajo de los 10K. El actual record de temperatura T_c está en los **138 K**.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

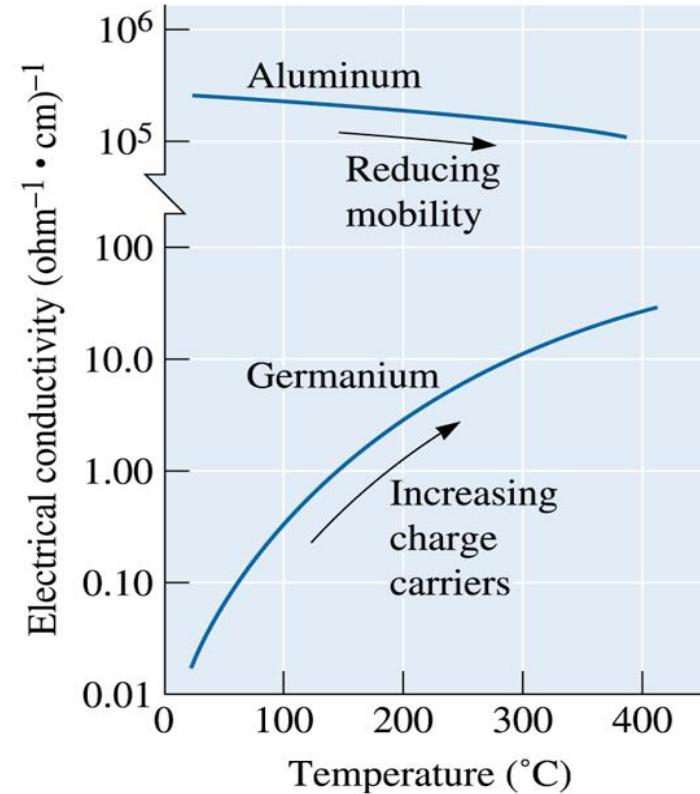
Cartagena99

Conductividad Eléctrica (SEMICONDUCTORES)



- CB conduction band
- VB valence band
- E_g band gap
- mobile electrons
- mobile holes

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



Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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

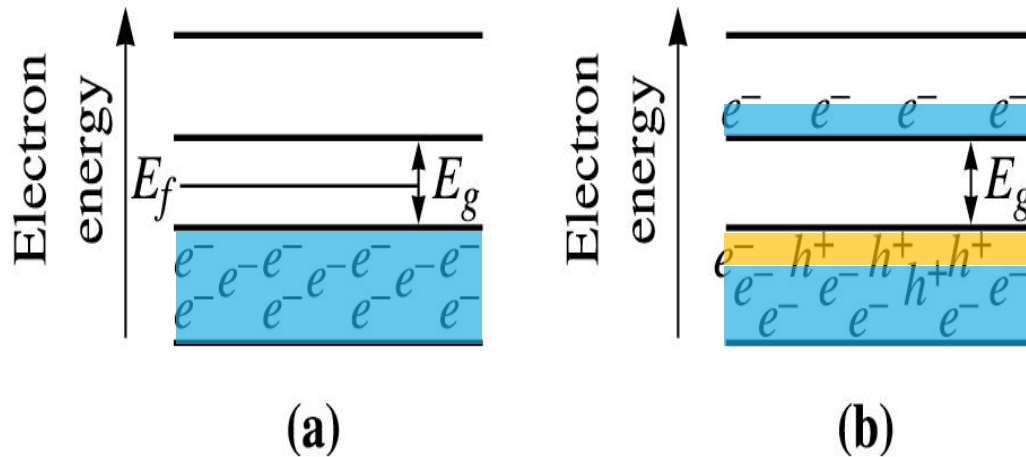
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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 :

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

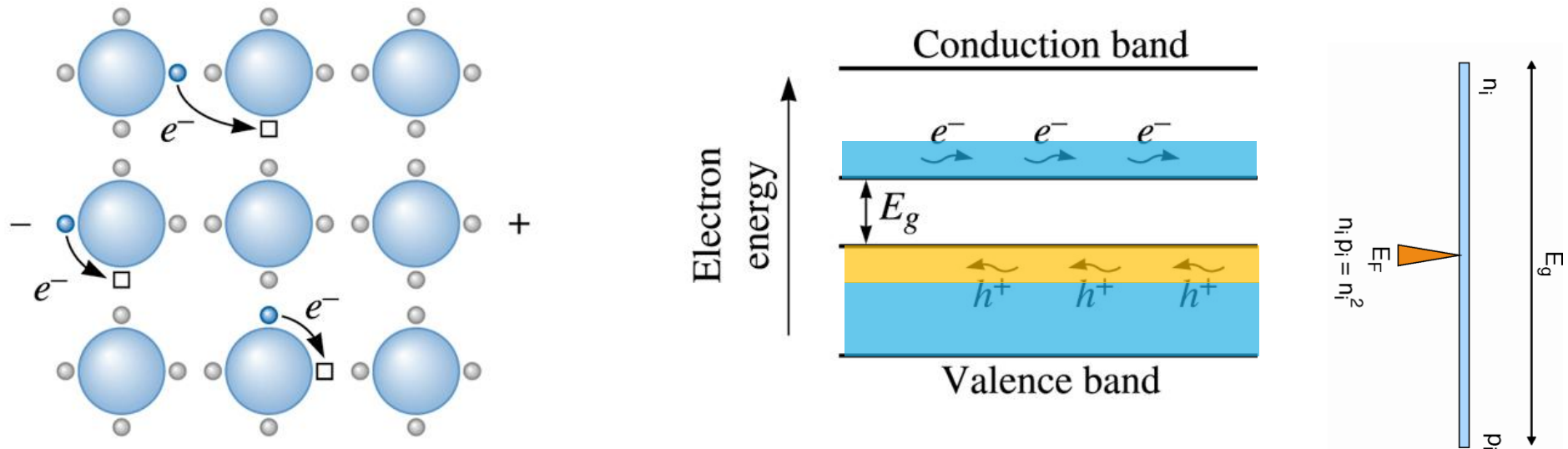
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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

CLASES PARTICULARES, TUTORIAS TECNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

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:

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

Dado que la conductividad es proporcional a la concentración de portadores

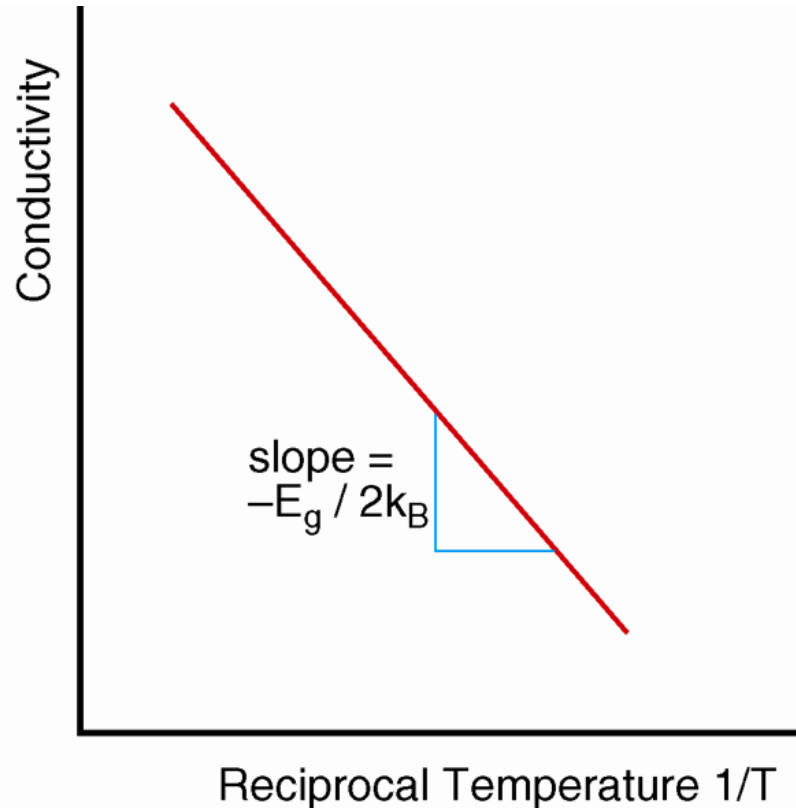
Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

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.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Conductividad Eléctrica (SEMICONDUCTORES)

SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO

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

Las ecuaciones anteriores demuestran que $n \cdot p = constante$ 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).

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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99

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:

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

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:

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Conductividad Eléctrica (SEMICONDUCTORES)

SOLUCIÓN (Continuación):

Por último, el valor de n_0 será:

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

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

PROPIEDADES ELÉCTRICAS