

Materiales Eléctricos

Semiconductores

Materiales Eléctricos

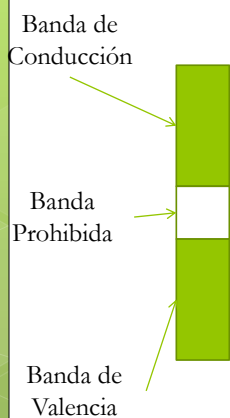
Repaso valores de Resistividad

Material	$\rho \Omega m$	$(/\alpha)^\circ C$	
Plata	$1,62 \cdot 10^{-8}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	PTC
Cobre	$1,69 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	PTC
Aluminio	$2,75 \cdot 10^{-8}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	PTC
Platino	$10,6 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	PTC
Hierro	$9,68 \cdot 10^{-8}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	PTC
Silicio Intrínseco	$2,5 \cdot 10^3$	$-70 \cdot 10^{-3}$	NTC

Coefficiente de Temperatura

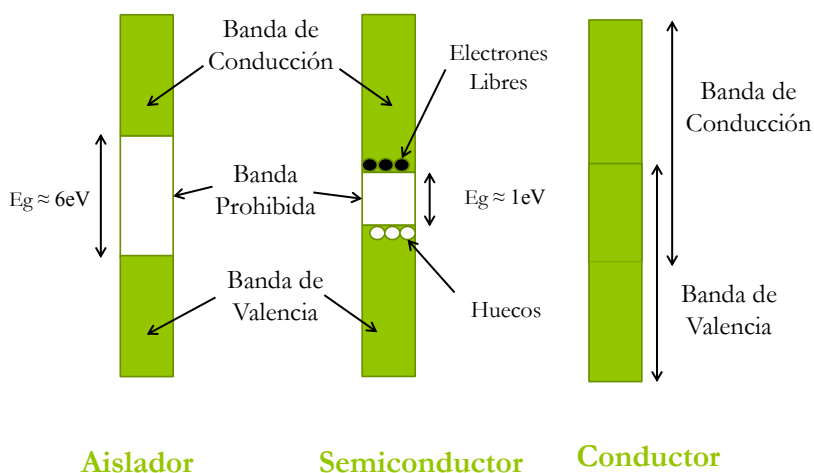
$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad \bar{\alpha} = \frac{1}{\rho^\circ} \frac{(\rho - \rho^\circ)}{(T - T^\circ)}$$

Semiconductores



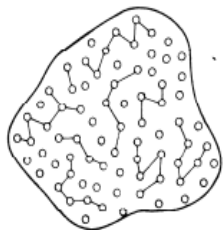
- Los semiconductores más conocidos son: Silicio ($E_g \approx 1.21\text{eV}$) Germanio ($E_g \approx 0.785\text{eV}$) Arseniuro de Galio ($E_g \approx 1.38\text{eV}$)
- A bajas temperaturas, la banda de valencia permanece llena y la de conducción vacía, comportándose como un aislante.
- A medida que la temperatura aumenta, algunos electrones de la banda de valencia pueden adquirir energía térmica (kT) mayor que E_g , y por lo tanto saltar a la banda de conducción.
- A partir de este momento, son electrones libres en el sentido de que pueden moverse libremente en la banda de conducción bajo la influencia de un campo exterior aplicado.

En Resumen

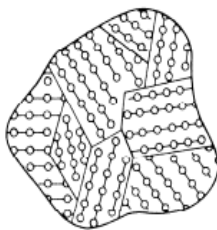


Semiconductores

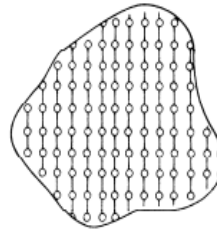
- De acuerdo a la disposición atómica, un semiconductor puede ser:



Amorfo
No existe orden
a largo alcance



Policristalino
Totalmente ordenado
por segmentos



Cristalino
Los átomos en el
sólido forman un
conjunto totalmente
ordenado

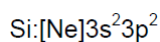
- Sólido Amorfo:** no se reconoce ningún orden a largo alcance, es decir, la disposición atómica en cualquier porción de este material es totalmente distinta a la de cualquier otra porción.
- Sólido Policristalino:** está formado por subsecciones cristalinas no homogéneas entre sí.
- Sólido Cristalino:** los átomos están distribuidos en un conjunto tridimensional ordenado.

Semiconductores

- A temperatura ambiente son malos conductores y malos aislantes y su $10^{-3} \leq \rho \leq 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$.
- A bajas temperaturas pueden ser muy buenos aislantes y a muy altas temperaturas pueden llegar a ser buenos conductores.
- Para poder comprender a esta peculiaridad en su comportamiento eléctrico, vamos a fijarnos en su estructura cristalina, esto es, en su disposición atómica.

Semiconductores

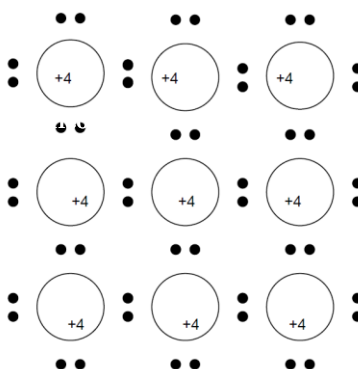
La configuración electrónica del Si



Esto significa que las capas mas cercanas al núcleo son idénticas al gas Neón y están completas.

La capa siguiente es la **3s** que tiene dos estados ocupados de los dos permitidos y la capa mas externa **3p** tiene dos estados ocupados de los 6 disponibles

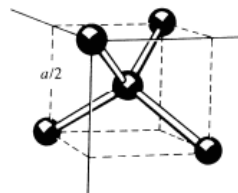
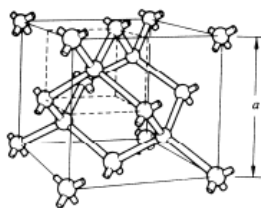
Estos cuatro estados libres tratan de ser ocupados por electrones de los átomos vecinos formando una unión Covalente Saturada



Semiconductores

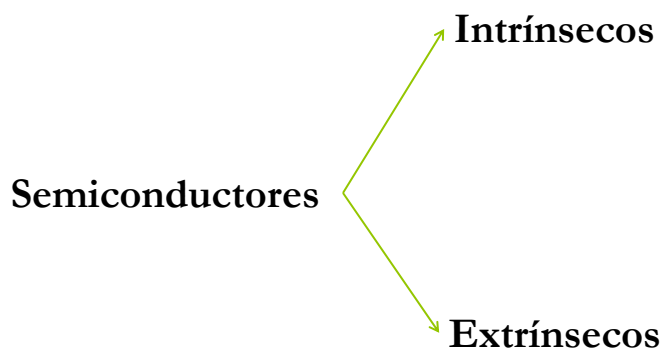
En los semiconductores mas usuales (Si, Ge) la estructura cristalina tiene una su disposición espacial como la que aparece en la figura.

Poseen cuatro e- de valencia, formando una unión covalente saturada



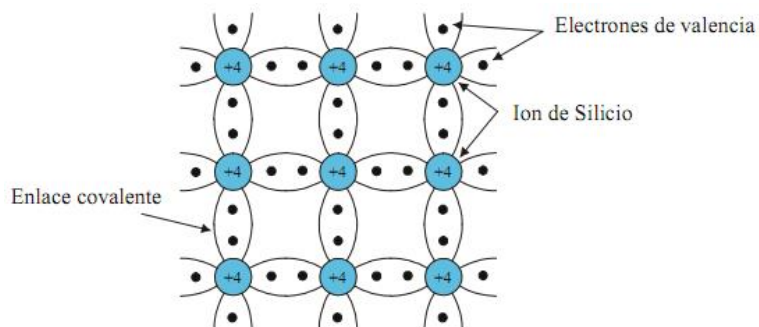
(a) Celda unitaria de la estructura de diamante. (b) ampliación del vértice superior de la red de diamante de (a)

Tipos de Semiconductores

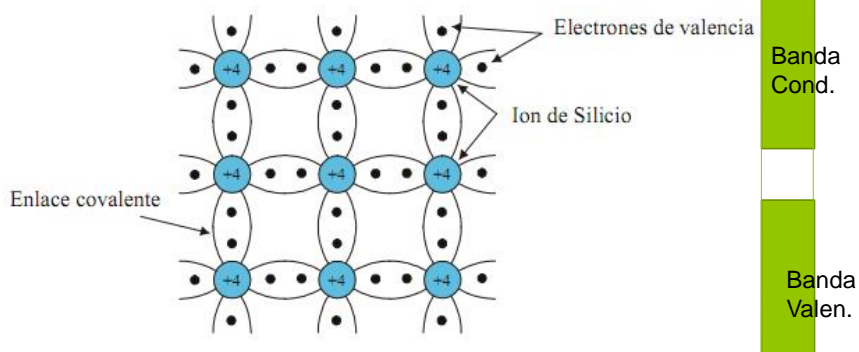


Semiconductores Intrínsecos

En esta estructura diamantina, cada átomo está rodeado de 4 átomos vecinos compartiendo uno de sus 4 e- de valencia con cada uno de los 4 átomos vecinos de los que toma otro e- en proceso análogo.



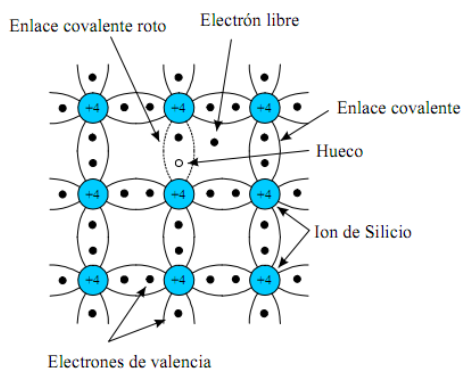
Semiconductores Intrínsecos



Sem. Intrínsecos

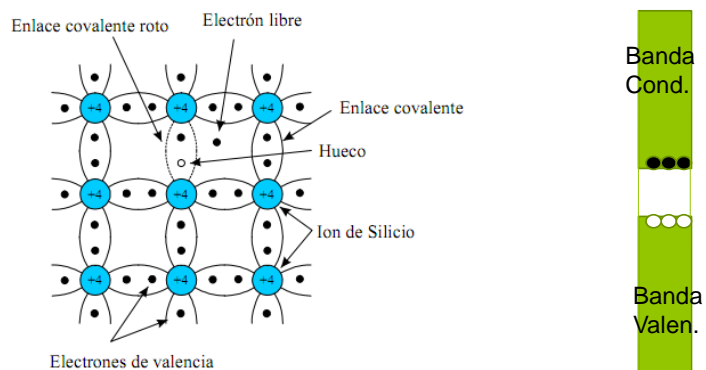
A medida que la temperatura aumenta, la vibración térmica de los átomos de la red cristalina da lugar a sacudidas en las que se rompen algunos enlaces covalentes disponiéndose, en tal caso, de cargas libres que pueden moverse por todo el cristal.

La energía térmica kT necesaria para romper un enlace covalente, ha de ser $\geq EG$ Banda Prohibida



Cristal de silicio con un enlace covalente roto.

Semiconductores Intrínsecos



Cristal de silicio con un enlace covalente roto.

Semiconductores Intrínsecos

- Esta **vacante** dejada en el enlace covalente se comporta como si fuese una nueva partícula libre de carga positiva $+q$ ($q = 1,6 \text{ E-}19 \text{ C}$) y masa comparable a la del e^- .
- Esta partícula aparente recibe el nombre de “hueco” h^+ .
- El numero de huecos que aparecen es igual al numero de electrones, pues por cada enlace covalente que se rompe aparece un electrón libre y un hueco. Es decir la concentración de electrones por unidad de volumen es igual a la concentración de huecos por unidad de volumen.

$$n = p$$

- Esto es lo que se llama Generación Térmica y genera una concentración intrínseca $n_i = n = p$

Semiconductores Intrínsecos

- Por otra parte, cuando un e^- se encuentra en las proximidades de un h^+ se verá atraído y caerá en él desapareciendo ambos, de forma que ya no contribuyen a la conducción de corriente.
- Este proceso de aniquilación de electrones y huecos se denomina Recombinación.
- Los procesos de generación térmica de pares electrón hueco y de recombinación de los mismos coexisten. En la situación de equilibrio termodinámico el número de generaciones es igual al de recombinaciones.

$$n_i^2 = A_0 T^3 e^{-E_G/kT}$$

Semiconductores

$$n_i^2 = A_0 \cdot T^3 e^{-E_{G_0}/kT} \quad \text{donde:}$$

- A_0 es una constante
- n_i es la concentración intrínseca
- T es la temperatura en grados Kelvin.
- E_{G_0} es el ancho de la banda prohibida
- k es la constante de Boltzman
- Como puede observarse la concentración de portadores libres capaces de llevar a cabo el proceso de conducción eléctrica depende de la temperatura.
- A medida que aumenta la temperatura aumenta la cantidad de portadores

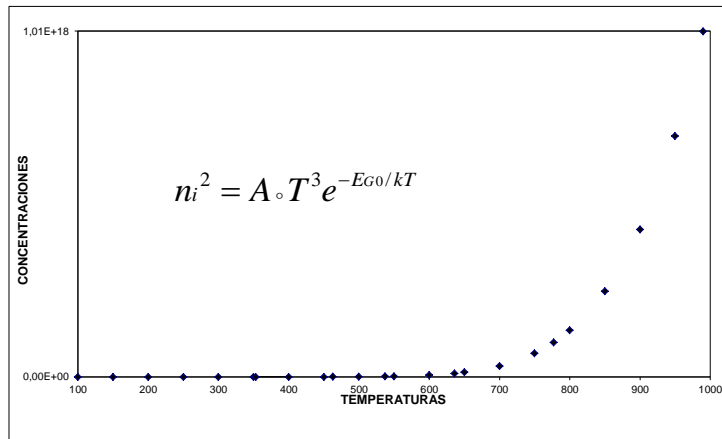
Semiconductores Intrínsecos

T [°C]	T	A ₀	T ^{1.5}	A ₀ *T ^{1.5}	2kT	E _{G0} /2kT	Exp(-E _{G0} /2kT)	n _i	T(C)
-73	200	3.87E+16	2.828,4271	1.0946E+20	0,03448	-35,09280742	5,74629E-16	6,289894E+04	-73
-23	250	3.87E+16	3.952,8471	1,52975E+20	0,0431	-28,07424594	6,41963E-13	9,820439E+07	-23
27	300	3.87E+16	5.196,1524	2,01091E+20	0,05172	-23,39520495	6,91181E-11	1,389903E+10	27
77	350	3.87E+16	6.547,9004	2,53404E+20	0,06034	-20,05303281	1,95469E-09	4,953265E+11	77
80	353	3.87E+16	6.632,2879	2,56669E+20	0,0608572	-19,88261044	2,31789E-09	5,949288E+11	80
127	400	3.87E+16	8.000,0000	3,096E+20	0,06896	-17,54640371	2,39714E-08	7,421550E+12	127
177	450	3.87E+16	9.545,9415	3,69428E+20	0,07758	-15,5968033	1,6842E-07	6,221916E+13	177
190	463	3.87E+16	9.962,5723	3,85552E+20	0,0798212	-15,1588801	2,60965E-07	1,006154E+14	190

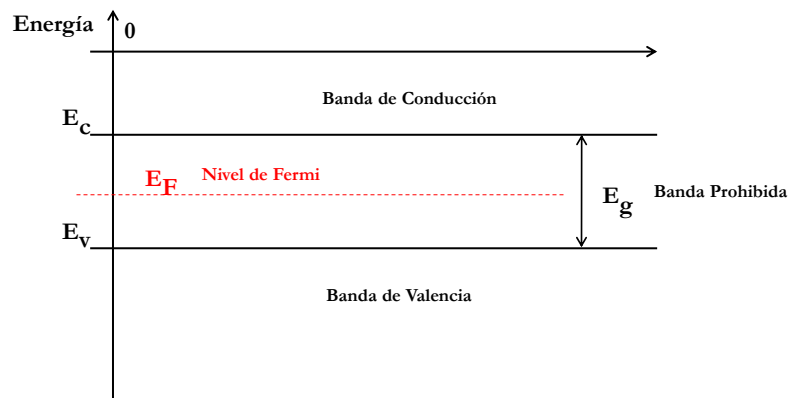
Semiconductores Intrínsecos

$$n_i = A_1 T^{1.5} \exp(-E_g/2kT)$$

$$A_0 = 3.87E+16 \quad k = \text{cte Boltzman} = 8.62E-5 \text{ eV/K}$$



Semiconductores Intrínsecos



Semiconductores

Para demostrar esta expresión $ni^2 = A_0 T^3 e^{-E_{G_0}/kT}$

Calculamos la densidad de electrones en la Banda de Conducción

$$dn = N(E)f(E)dE$$

Donde $N(E) = \gamma(E - E_C)^{\frac{1}{2}}$ para $E > E_C$ Densidad de estados permitidos en la Banda de conducción

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}} \quad \text{Función de Fermi} \quad f(E) = e^{-(E-E_F)/kT}$$

$$\text{Para } E \geq E_C \text{ y } E - E_F \gg kT$$

Semiconductores

Calculamos la concentración de electrones en la B. de Conducción

$$n = \int_{E_C}^{\infty} N(E)f(E)dE$$

$$n = \int_{E_C}^{\infty} \gamma(E - E_C)^{\frac{1}{2}} e^{-(E-E_F)/kT} dE$$



Esta integral equivale : $n = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT}$

Siendo:

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (1,60 * 10^{-19})^{\frac{3}{2}} = 2 \left(\frac{2\pi m_n \bar{k}T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Donde m_n es la masa efectiva de los electrones

Semiconductores

Calculamos la concentración de huecos en Banda de Valencia

$$P(E) = \gamma(E_V - E)^{\frac{1}{2}} \quad \text{para } E < E_V$$

$$p = N_V e^{-(E_F - E_V)/kT}$$

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (1,60 * 10^{-19})^{\frac{3}{2}} = 2 \left(\frac{2\pi m_p \bar{k}T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Donde m_p es la masa efectiva de los huecos

Semiconductores

Como el cristal debe ser eléctricamente neutro: $n_i = p_i$

Si la masa efectiva de los huecos o de los electrones Libres es la misma, $N_c = N_v$

$$E_F = \frac{E_C - E_V}{2}$$

Concentración Intrínseca $np = N_c N_v e^{-(E_C - E_V)/kT} = N_c N_v e^{-E_G/kT}$

Válida para materiales intrínsecos y extrínsecos

$$np = n_i^2$$

Semiconductores

Sustituyendo las constantes físicas por sus valores numéricos

$$N_C = 4,82 * 10^{21} \left(\frac{m_n}{m} \right)^{\frac{3}{2}} T^{\frac{3}{2}}$$

$$np = n_i^2 = (2,33 * 10^{43}) \left(\frac{m_n m_p}{m^2} \right)^{\frac{3}{2}} T^3 e^{-E_G/kT}$$

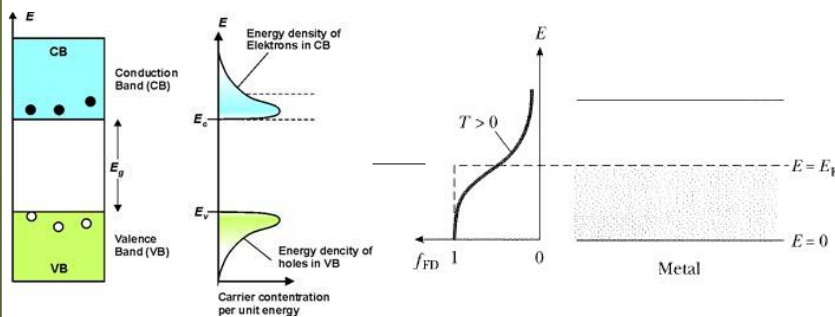
La energía de la Banda Prohibida decrece linealmente con la temperatura, tal que:

$$E_G = E_{G0} - \beta T$$

Donde E_{G0} es la diferencia de energía a 0°K

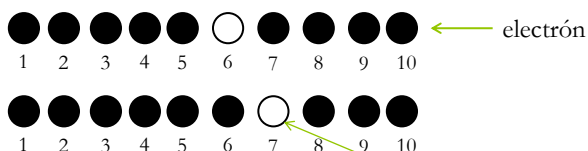
$$n_i^2 = A_0 T^3 e^{-E_{G0}/kT}$$

Semiconductores



¿Cómo se mueve el hueco bajo la acción de un campo eléctrico?

Campo eléctrico



Mecanismo por el cual el hueco contribuye a la conductividad

$$n = p = n_i \quad \text{Concentración Intrínseca}$$

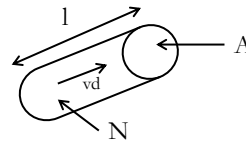
Semiconductores Intrínsecos

- Quiere decir que el Modelo CORPUSCULAR para la **conducción eléctrica** de un semiconductor es muy similar al del conductor pero donde los portadores son huecos y electrones y su concentración depende de la temperatura.
- La **conducción eléctrica** tiene lugar a consecuencia del movimiento neto de los e⁻ y los h⁺ libres al someterlos a la acción de un campo eléctrico aplicado.

Materiales Eléctricos

La contribución de los electrones a la corriente total

$$\left. \begin{aligned} I_n &= \frac{Nq}{t} = \frac{Nqv}{l} \\ J_n &= \frac{I}{A} \end{aligned} \right\} J_n = \frac{Nqv}{lA}$$



Suponiendo una distribución uniforme de la corriente

$$n = \frac{N}{lA}$$

Concentración n de electrones

Se deduce: $J_n = nqv$
Con v velocidad de deriva

Esta deducción es independiente de la forma del medio de conducción

$$J_n = nqv = nq\mu_n E = \sigma E \quad \text{donde: } \sigma = nq\mu \quad \text{Conductividad}$$

$$\text{con } \mu_n = \frac{v}{E} \quad \text{Movilidad de elect.}$$

Materiales Eléctricos

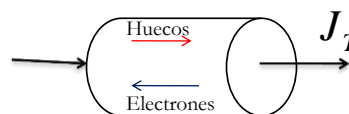
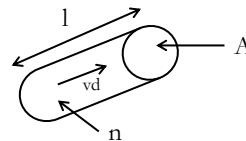
La contribución de los huecos a la corriente total

$$J_p = pqv = pq\mu_p E = \sigma_p E$$

Con p Concentración de huecos

Con μ_p Movilidad de huecos

Se deduce que la corriente total será



$$J_T = J_n + J_p = q(n\mu_n + p\mu_p)E = qn_i(\mu_n + \mu_p)E = \sigma^* E$$