



FÍSICA DEL ESTADO SÓLIDO



TEMA 4

SEMICONDUCTORES HOMOGÉNEOS

CONTENIDO

Semiconductores

Mecanismos de conducción

Intrínseco

Extrínseco

Estructura de bandas de algunos semiconductores

Semiconductores de *gap* indirecto

Semiconductores de *gap* directo

Concentración de portadores en equilibrio

Semiconductores no degenerados

Ley de acción de masas

Degeneración de semiconductores

Semiconductores intrínsecos

Concentración de portadores

Nivel de Fermi

Ecuación de neutralidad eléctrica

Semiconductores extrínsecos: regímenes de conductividad

Activación de impurezas

Saturación de impurezas

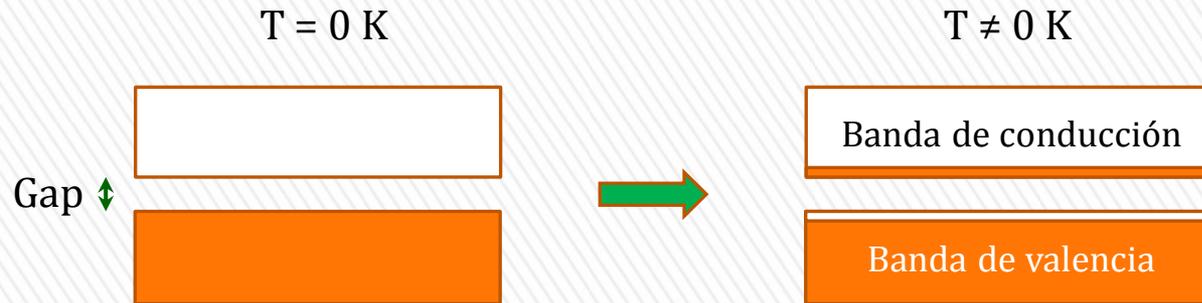
Activación de huecos

Régimen cuasi-intrínseco

Conductividad eléctrica

SEMICONDUCTORES

Sólidos aislantes en el estado fundamental, pero que pueden conducir a temperaturas finitas.

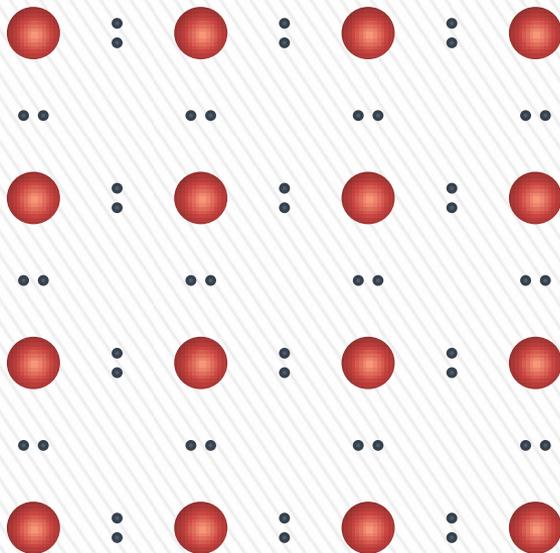


Elementos	ϵ_g (eV)
Si	1.11
Ge	0.67
$\alpha - \text{Sn}$	0.08
Se	1.80
Te	0.35
B	1.50

Compuestos		ϵ_g (eV)
GaAs		1.43
GaP		2.25
GaSb	III - V	0.70
AlSb		1.5
InAs		0.35
InSb		0.18
ZnTe	II - VI	2.26

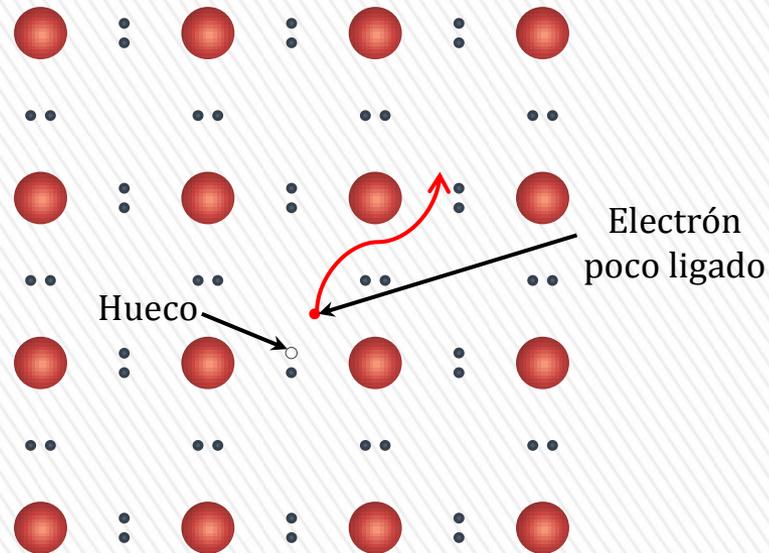
MECANISMOS DE CONDUCCIÓN

$T = 0 \text{ K}$



Mecanismo intrínseco

$T \neq 0 \text{ K}$

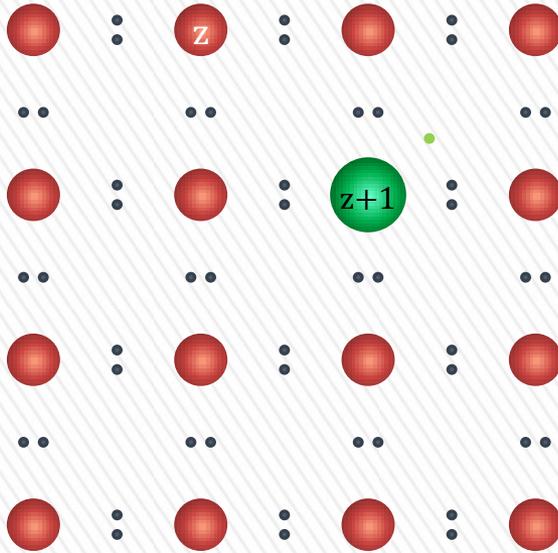


Muestras puras

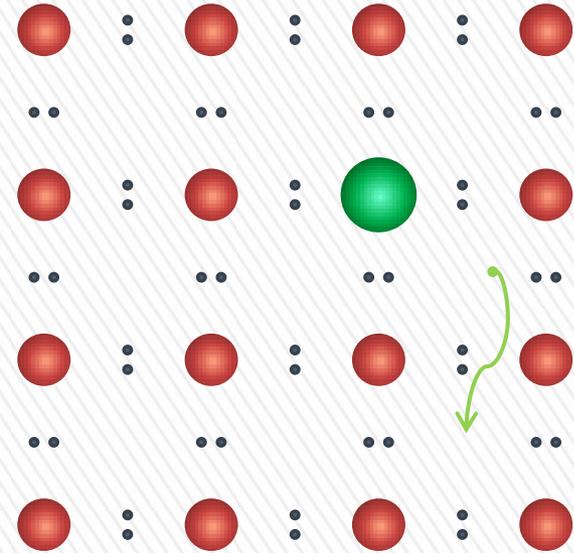
$$n_i(T) = p_i(T)$$

MECANISMOS DE CONDUCCIÓN

$T = 0 \text{ K}$



$T \neq 0 \text{ K}$



Mecanismo extrínseco

Muestras dopadas

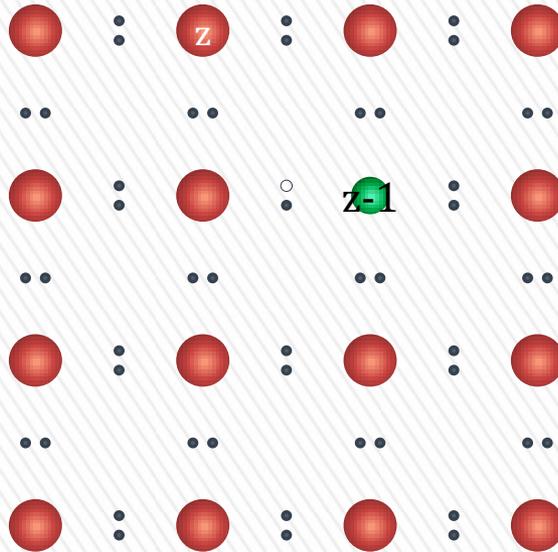
Impurezas donadoras

Semiconductor tipo n

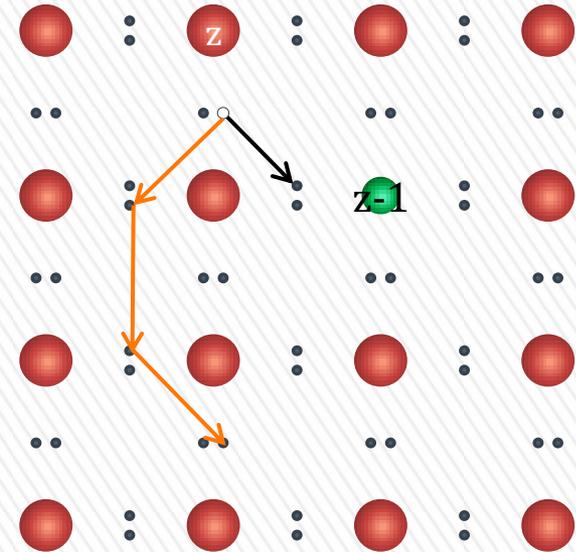
$$n(T) > p(T)$$

MECANISMOS DE CONDUCCIÓN

$T = 0 \text{ K}$



$T \neq 0 \text{ K}$



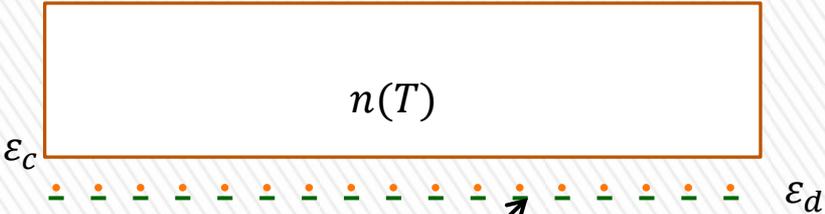
Mecanismo extrínseco

Impurezas aceptoras

Semiconductor tipo p

$$n(T) < p(T)$$

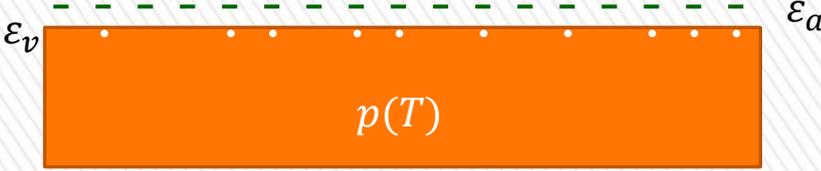
MECANISMOS DE CONDUCCIÓN



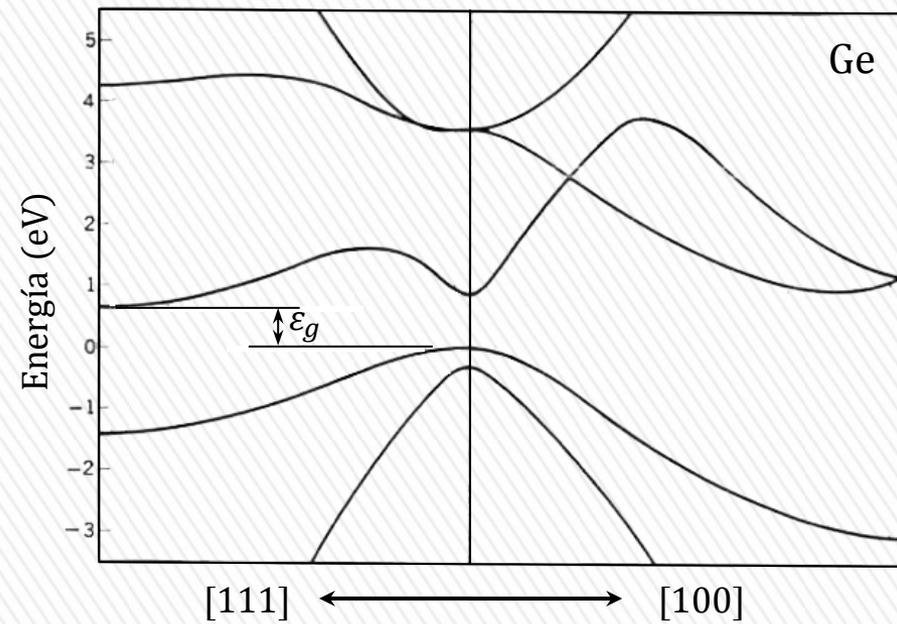
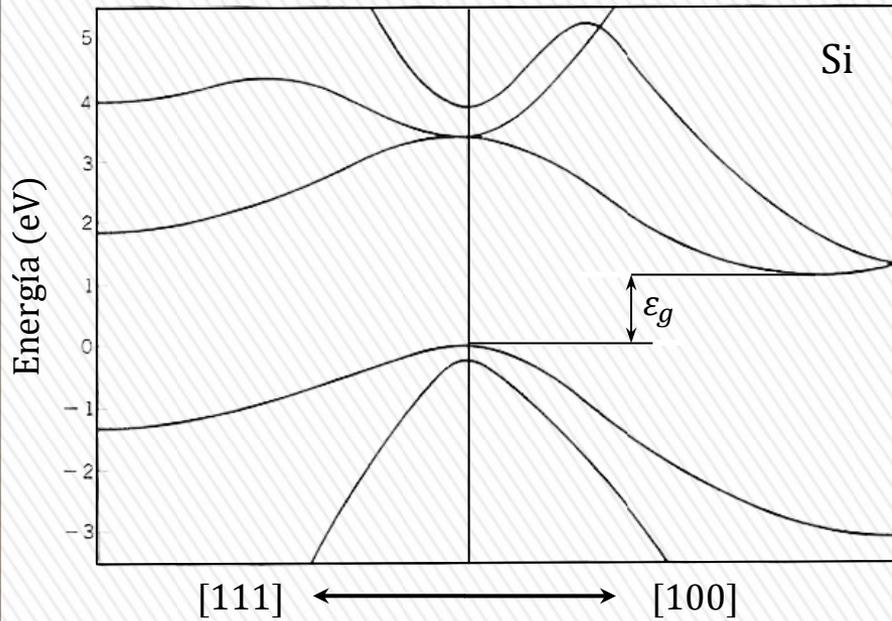
Niveles donadores



Niveles aceptores

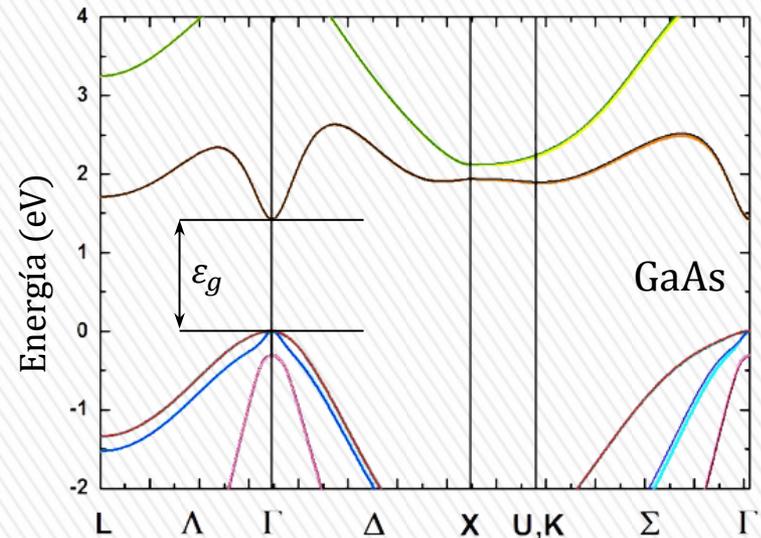


ESTRUCTURA DE BANDAS DE ALGUNOS SEMICONDUCTORES



Semiconductores de gap indirecto

Semiconductores de gap directo



CONCENTRACIÓN DE PORTADORES EN EQUILIBRIO

Concentración de electrones en la banda de conducción:

$$n(T) = \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_{\text{máx}}} g_c(\varepsilon) n(\varepsilon, T) d\varepsilon$$

Concentración de huecos en la banda de valencia:

$$p(T) = \int_{\varepsilon_{\text{mín}}}^{\varepsilon_v} g_v(\varepsilon) [1 - n(\varepsilon, T)] d\varepsilon$$

Las transiciones se producen cerca de los extremos de las bandas

$$\varepsilon_n(\vec{k}) = \varepsilon_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_n^*} \quad \varepsilon_p(\vec{k}) = \varepsilon_v - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_p^*}$$

$$g_c(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_n^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (\varepsilon - \varepsilon_c)^{1/2}$$

$$g_v(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_p^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (\varepsilon_v - \varepsilon)^{1/2}$$

$$n(T) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_n^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_{\text{máx}}} \frac{(\varepsilon - \varepsilon_c)^{1/2}}{e^{(\varepsilon - \mu)/k_B T} + 1} d\varepsilon$$

$$p(T) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_p^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_{\varepsilon_{\text{mín}}}^{\varepsilon_v} \frac{(\varepsilon_v - \varepsilon)^{1/2}}{e^{(\mu - \varepsilon)/k_B T} + 1} d\varepsilon$$



CONCENTRACIÓN DE PORTADORES EN EQUILIBRIO

COMENTARIOS

μ es el potencial químico de los electrones



Nivel de Fermi

Los límites de integración se pueden extender a ∞ (en BC) y $-\infty$ (en BV)

$$n(T) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_n^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_{\varepsilon_c}^{\infty} \frac{(\varepsilon - \varepsilon_c)^{1/2}}{e^{(\varepsilon - \varepsilon_F)/k_B T} + 1} d\varepsilon$$

$$\xi = \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{k_B T}$$

$$n(T) = n_c(T) F_{1/2}(\eta)$$

$$F_{1/2}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{y^{1/2} dy}{e^{y-x} + 1}$$

$$n_c(T) = \frac{1}{4} \left(\frac{2m_n^* k_B T}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

$$n_v(T) = \frac{1}{4} \left(\frac{2m_p^* k_B T}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_F - \varepsilon_c}{k_B T}$$

$$\xi_g = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_v}{k_B T}$$

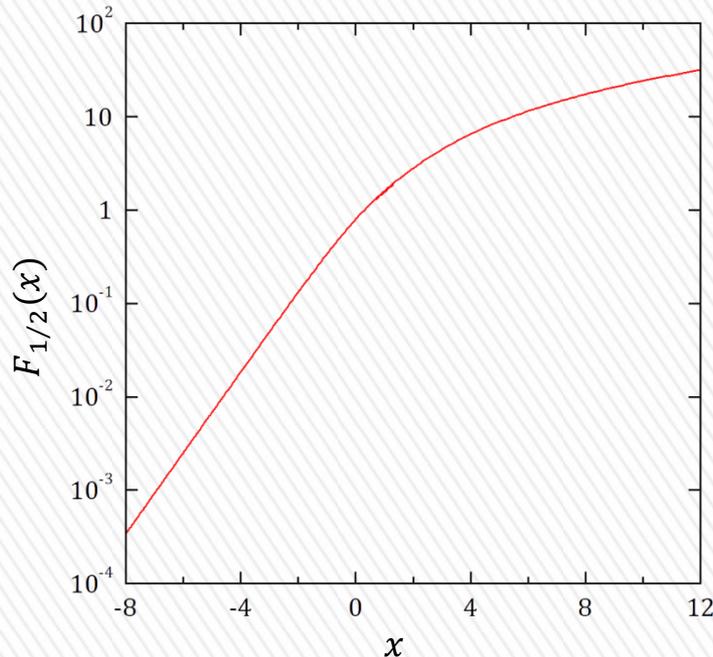
$$p(T) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_p^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_{-\infty}^{\varepsilon_v} \frac{(\varepsilon_v - \varepsilon)^{1/2} d\varepsilon}{e^{(\varepsilon_F - \varepsilon)/k_B T} + 1}$$

$$\xi = \frac{\varepsilon_v - \varepsilon}{k_B T}$$

$$p(T) = n_v(T) F_{1/2}(-\eta - \xi_g)$$

Integral de Fermi de orden 1/2

CONCENTRACIÓN DE PORTADORES EN EQUILIBRIO



$$F_{1/2}(x) = \begin{cases} e^x & -\infty < x < -1 \\ \frac{1}{0.27 + e^{-x}} & -1 < x < 2 \\ \frac{4}{3\sqrt{\pi}} x^{3/2} & 2 < x < +\infty \end{cases}$$

Supongamos que $\eta < -1$ y que $-(\eta + \xi_g) < -1$

$$n(T) = \frac{1}{4} \left(\frac{2m_n^* k_B}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2} T^{3/2} e^{(\varepsilon_F - \varepsilon_c)/k_B T}$$

$$p(T) = \frac{1}{4} \left(\frac{2m_p^* k_B}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2} T^{3/2} e^{(\varepsilon_v - \varepsilon_F)/k_B T}$$

SEMICONDUCTORES NO DEGENERADOS

Supongamos que $\eta > 2$ y que $-(\eta + \xi_g) > 2$

$$n(T) = \frac{1}{3\pi^2} \left(\frac{2m_n^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (\varepsilon_F - \varepsilon_c)^{3/2}$$

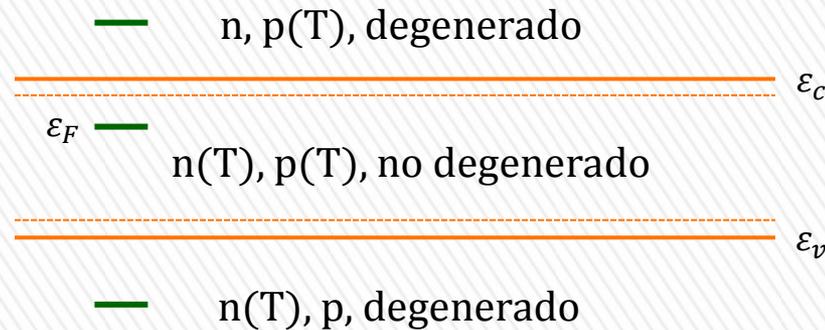
$$p(T) = \frac{1}{3\pi^2} \left(\frac{2m_p^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (\varepsilon_v - \varepsilon_F)^{3/2}$$

SEMICONDUCTORES DEGENERADOS

DEGENERACIÓN DE SEMICONDUCTORES

El carácter degenerado o no degenerado depende de la posición del nivel de Fermi

$$\left. \begin{array}{l} \eta < -1 \\ -(\eta + \xi_g) < -1 \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} \varepsilon_F < \varepsilon_c - k_B T \\ \varepsilon_F > \varepsilon_v + k_B T \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \eta > 2 \\ -(\eta + \xi_g) > 2 \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} \varepsilon_F > \varepsilon_c + 2k_B T \\ \varepsilon_F < \varepsilon_v - 2k_B T \end{array}$$



LEY DE ACCIÓN DE MASAS

$$n(T)p(T) = n_c(T)n_v(T)e^{-\varepsilon_g/k_B T}$$

$$n(T)p(T) = \frac{1}{2} \left(\frac{k_B}{\pi \hbar^2} \right)^3 (m_n^* m_p^*)^{3/2} T^3 e^{-\varepsilon_g/k_B T}$$

Sólo para semiconductores no degenerados

SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

$$n_i(T) = p_i(T)$$



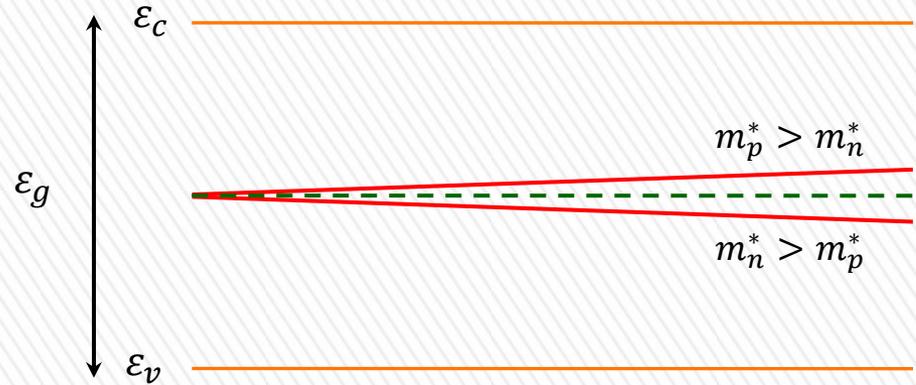
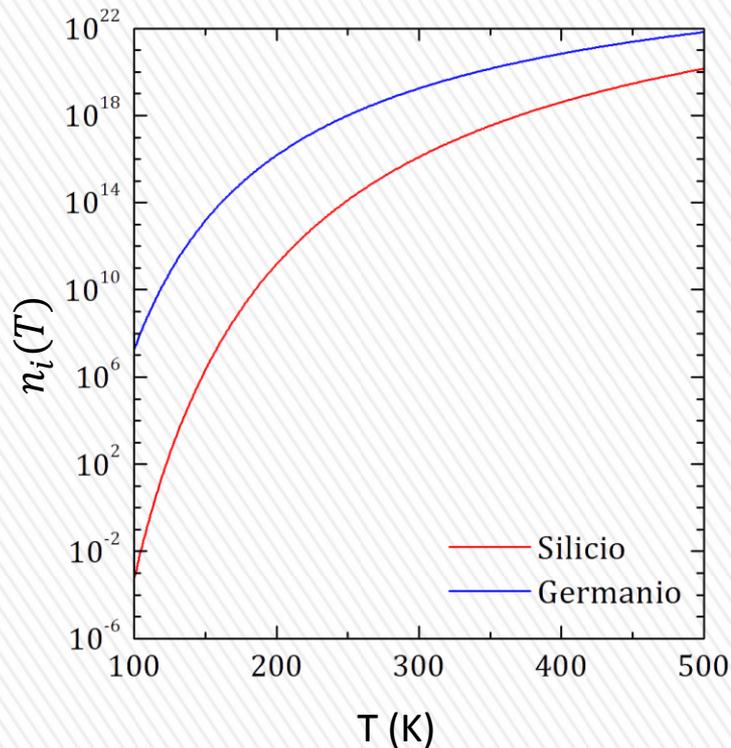
$$n_i(T) = p_i(T) = [n_c(T)n_v(T)]^{1/2} e^{-\varepsilon_g/2k_B T}$$

La concentración de portadores intrínseca depende sólo de la temperatura

$$n_c(T) e^{(\varepsilon_F - \varepsilon_c)/k_B T} = n_v(T) e^{(\varepsilon_v - \varepsilon_F)/k_B T}$$



$$\varepsilon_F = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_v}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln \frac{m_p^*}{m_n^*}$$



Temperatura

ECUACIÓN DE NEUTRALIDAD ELÉCTRICA

Semiconductor dopado con N_d impurezas donadoras y N_a impurezasceptoras (por unidad de volumen)

Cargas negativas: $n(T), n_a(T)$

$$n(T) + n_a(T) = p(T) + p_d(T)$$

Cargas positivas: $p(T), p_d(T)$

ECUACIÓN DE NEUTRALIDAD ELÉCTRICA

Estadística de impurezas

$$\left. \begin{array}{l} n_d(T) = N_d v_d(T) \\ p_d(T) = N_d - n_d(T) \end{array} \right\} v_d(T) = \frac{1}{\frac{1}{2} e^{(\varepsilon_d - \varepsilon_F)/k_B T} + 1}$$

$$p_d(T) = \frac{N_d}{2e^{(\varepsilon_F - \varepsilon_d)/k_B T} + 1}$$

$$\left. \begin{array}{l} p_a(T) = N_a v_a(T) \\ n_a(T) = p_a(T) - N_a \end{array} \right\} v_a(T) = \frac{e^{(\varepsilon_F - \varepsilon_a)/k_B T} + 1}{\frac{1}{2} e^{(\varepsilon_F - \varepsilon_a)/k_B T} + 1}$$

$$n_a(T) = \frac{N_a}{2e^{(\varepsilon_a - \varepsilon_F)/k_B T} + 1}$$

$$n(T) + \frac{N_a}{2e^{(\varepsilon_a - \varepsilon_F)/k_B T} + 1} = p(T) + \frac{N_d}{2e^{(\varepsilon_F - \varepsilon_d)/k_B T} + 1}$$

SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS: REGÍMENES DE CONDUCTIVIDAD

Semiconductor no degenerado tipo n dopado con N_d impurezas por unidad de volumen

$$n_c(T)e^\eta = n_v(T)e^{-\eta-\xi_g} + \frac{N_d}{2e^{\eta+\xi_d} + 1} \quad \xi_d = \frac{\epsilon_c - \epsilon_d}{k_B T}$$

$$e^{3\eta} + \frac{1}{2}e^{-\xi_d}e^{2\eta} - \left(\frac{N_d}{2n_c(T)}e^{-\xi_d} + \frac{n_v(T)}{n_c(T)}e^{-\xi_g} \right)e^\eta - \frac{n_v(T)}{2n_c(T)}e^{-(\xi_d+\xi_g)} = 0$$

RANGOS DE TEMPERATURA

1) Temperatura tal que la transición BV \rightarrow BC sea poco probable



$$n(T) \approx p_d(T)$$

$$n_c(T)e^\eta \approx \frac{N_d}{2e^{\eta+\xi_d} + 1} \quad \longrightarrow \quad e^{2\eta} + \frac{1}{2}e^{-\xi_d}e^\eta - \frac{N_d}{2n_c(T)}e^{-\xi_d} = 0$$

$$e^\eta = \frac{1}{4}e^{-\xi_d} \left[\sqrt{1 + \frac{8N_d}{n_c(T)}e^{\xi_d}} - 1 \right]$$

SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS: REGÍMENES DE CONDUCTIVIDAD

$$n(T) = \frac{n_c(T)}{4} e^{\frac{\varepsilon_d - \varepsilon_c}{k_B T}} \left[\sqrt{1 + \frac{8N_d}{n_c(T)} e^{\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_d}{k_B T}} - 1} \right]$$

$$\varepsilon_F(T) = \varepsilon_d + k_B T \ln \left\{ \frac{1}{4} \left[\sqrt{1 + \frac{8N_d}{n_c(T)} e^{\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_d}{k_B T}} - 1} \right] \right\}$$

ACTIVACIÓN DE IMPUREZAS

$$e^{\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_d}{k_B T}} \gg \frac{n_c(T)}{N_d}$$

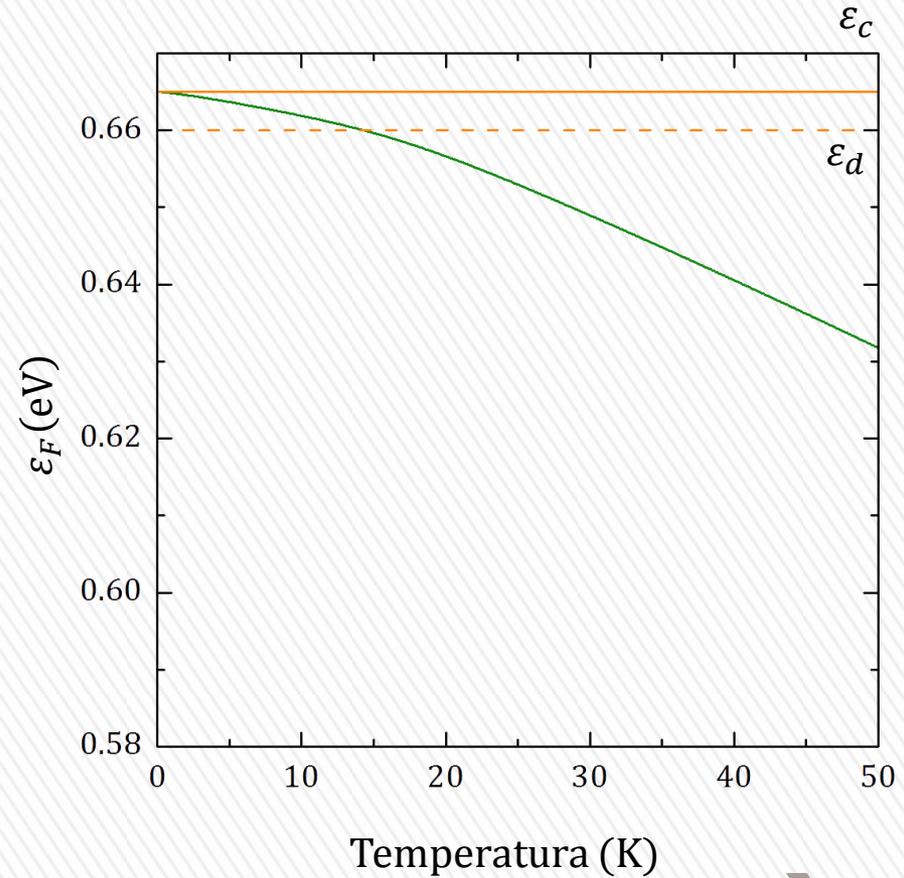
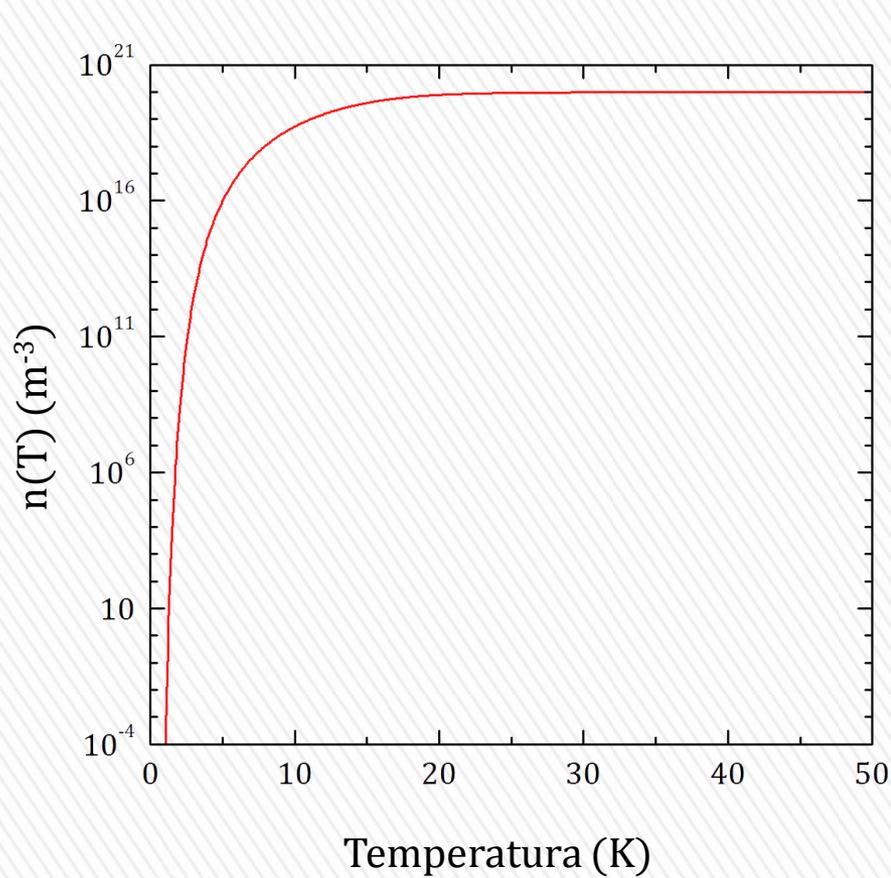


$$\varepsilon_F(T) \approx \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_d}{2} + \frac{k_B T}{2} \ln \frac{N_d}{2n_c(T)}$$

$$n(T) = \left(\frac{N_d n_c(T)}{2} \right)^{1/2} e^{-\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_d}{2k_B T}}$$

SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS: REGÍMENES DE CONDUCTIVIDAD

Germanio dopado con 10^{20} m^{-3} impurezas de antimonio



SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS: REGÍMENES DE CONDUCTIVIDAD

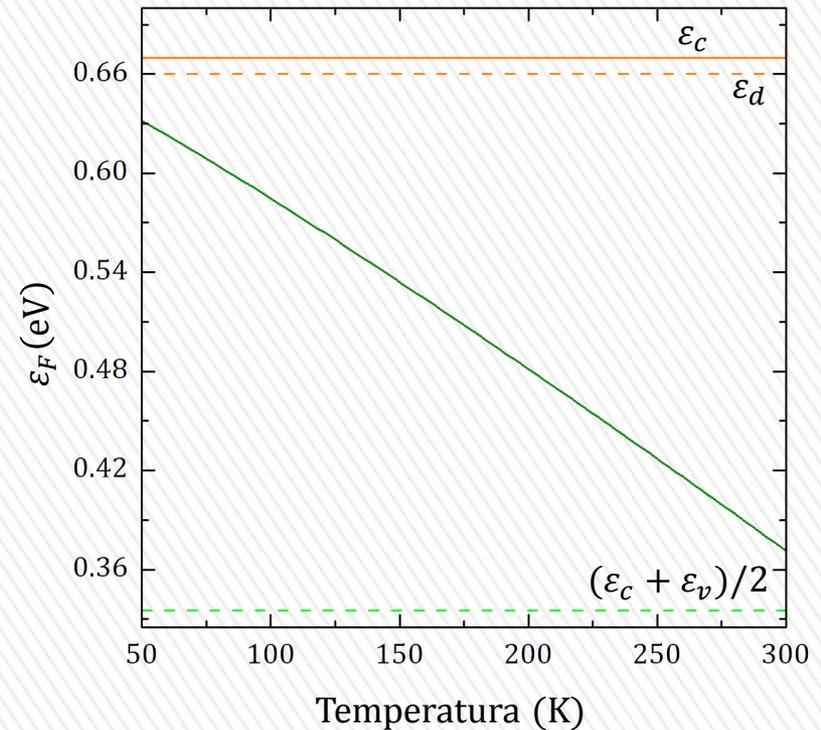
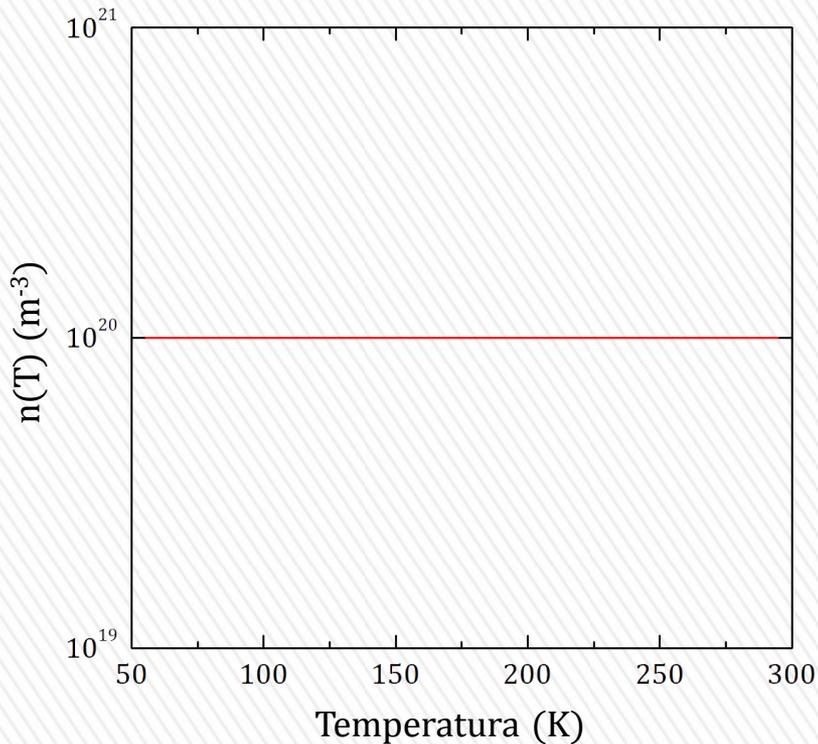
2) Temperatura tal que todas las impurezas están ionizadas, pero la transición BV \rightarrow BC sigue siendo poco probable



$$n(T) \approx N_d$$

$$\varepsilon_F(T) = \varepsilon_c - k_B T \ln \frac{n_c(T)}{N_d}$$

SATURACIÓN DE IMPUREZAS



SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS: REGÍMENES DE CONDUCTIVIDAD

3) Temperatura a la que la transición BV \rightarrow BC empieza a ser probable



$$n(T) \approx N_d + p(T)$$

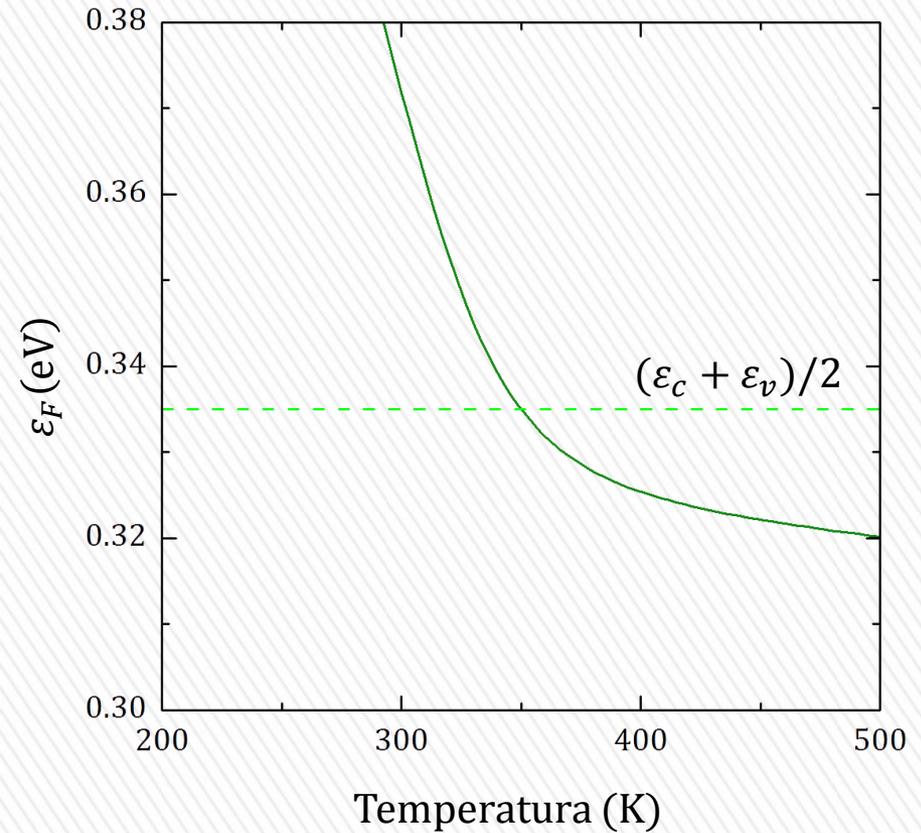
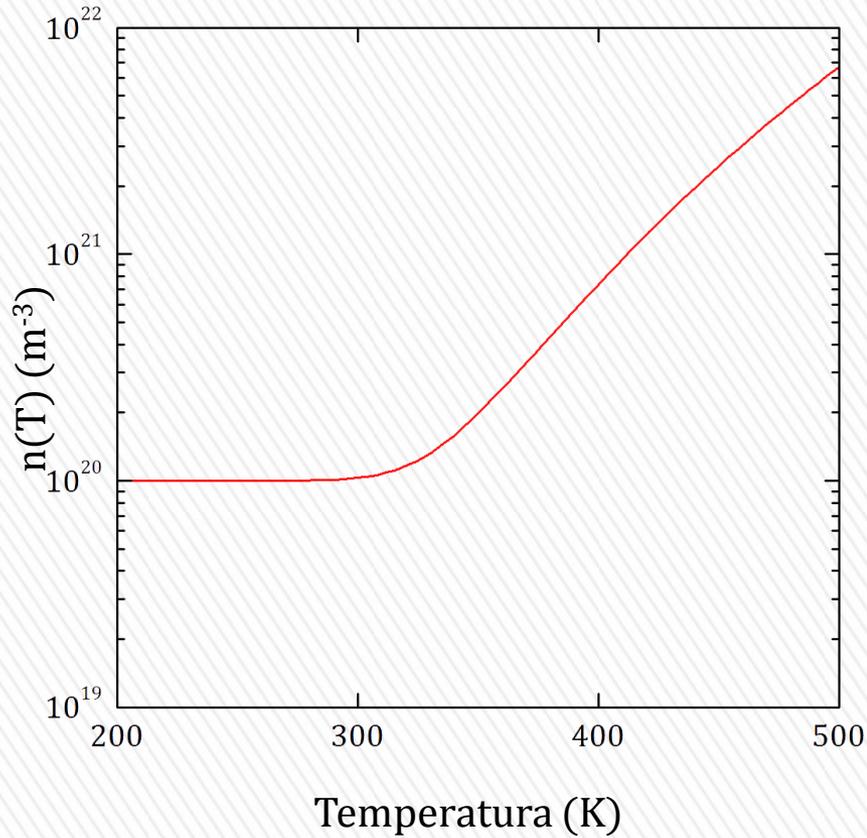
$$n^2(T) - N_d n(T) - n_i^2(T) = 0$$

$$n(T) = \frac{N_d}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2n_i(T)}{N_d} \right)^2} \right]$$

$$\varepsilon_F(T) = \varepsilon_c + k_B T \ln \left\{ \frac{N_d}{2n_c(T)} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2n_i(T)}{N_d} \right)^2} \right] \right\}$$

ACTIVACIÓN DE HUECOS

SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS: REGÍMENES DE CONDUCTIVIDAD



SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS: REGÍMENES DE CONDUCTIVIDAD

4) Temperaturas a las que la concentración de huecos en BV es mucho mayor que la de impurezas



$$n(T) \approx p(T)$$

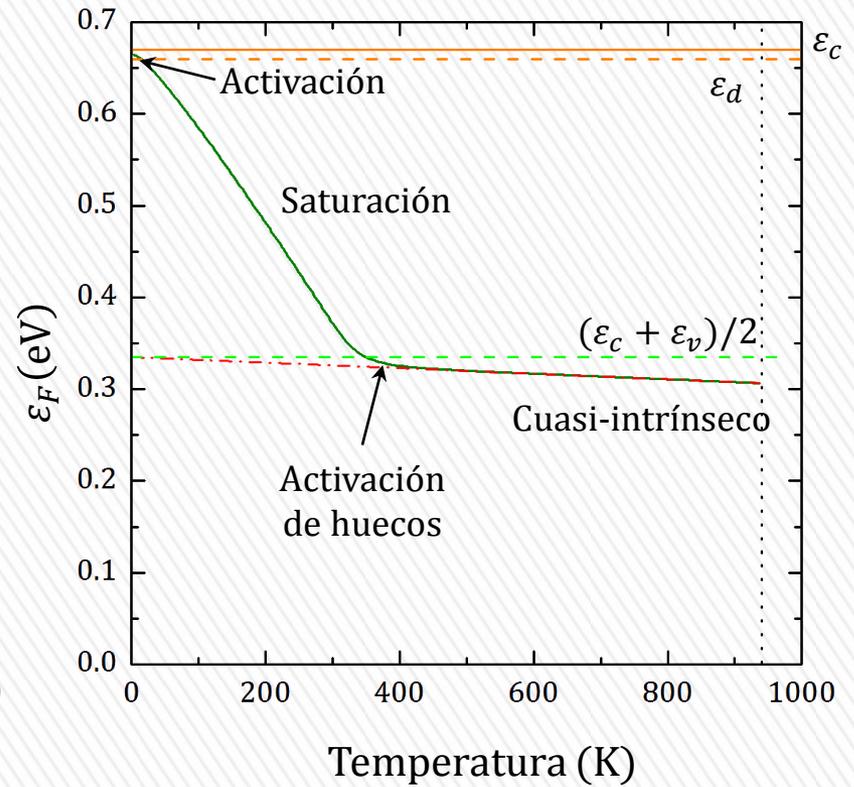
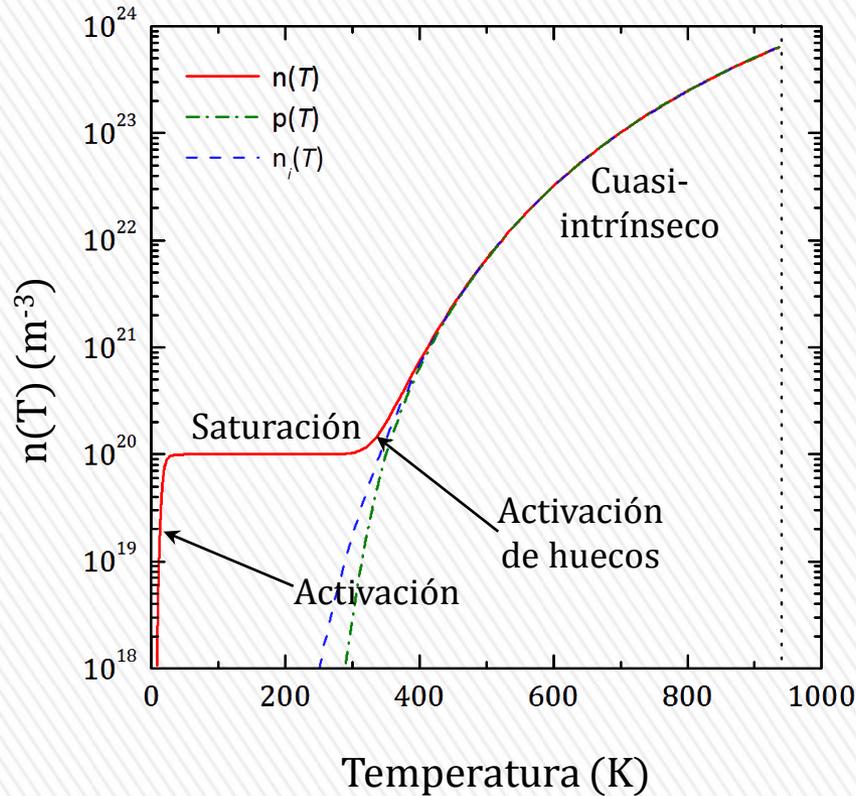
$$n(T) = p(T) = 2 \left(\frac{k_B}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_n^* m_p^*)^{3/4} T^{3/2} e^{-\varepsilon_g/2k_B T}$$

$$\varepsilon_F(T) = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_v}{2} + \frac{k_B T}{2} \ln \frac{n_v(T)}{n_c(T)}$$

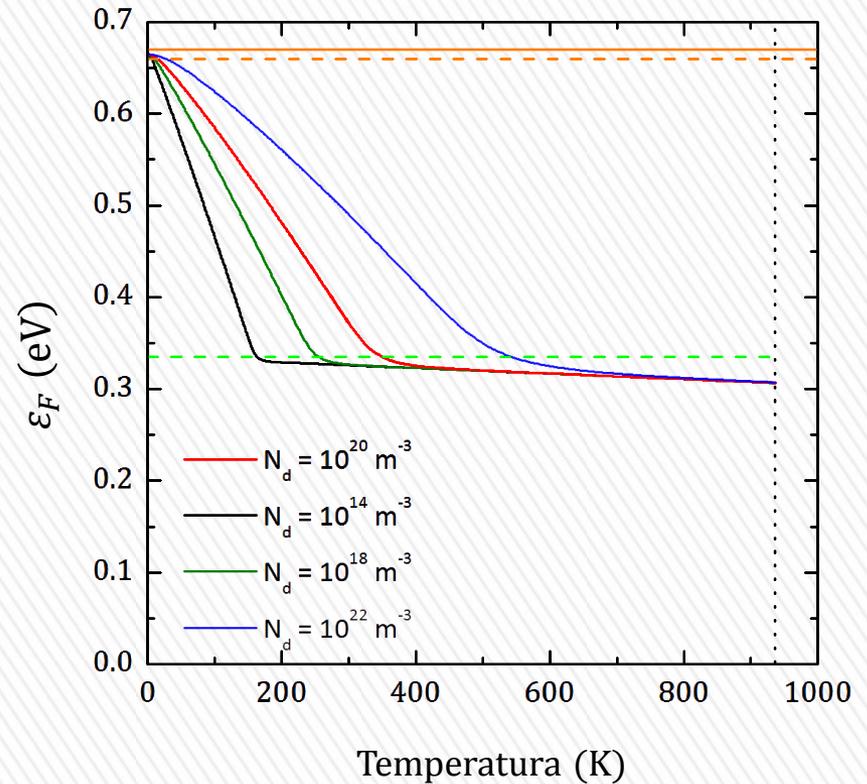
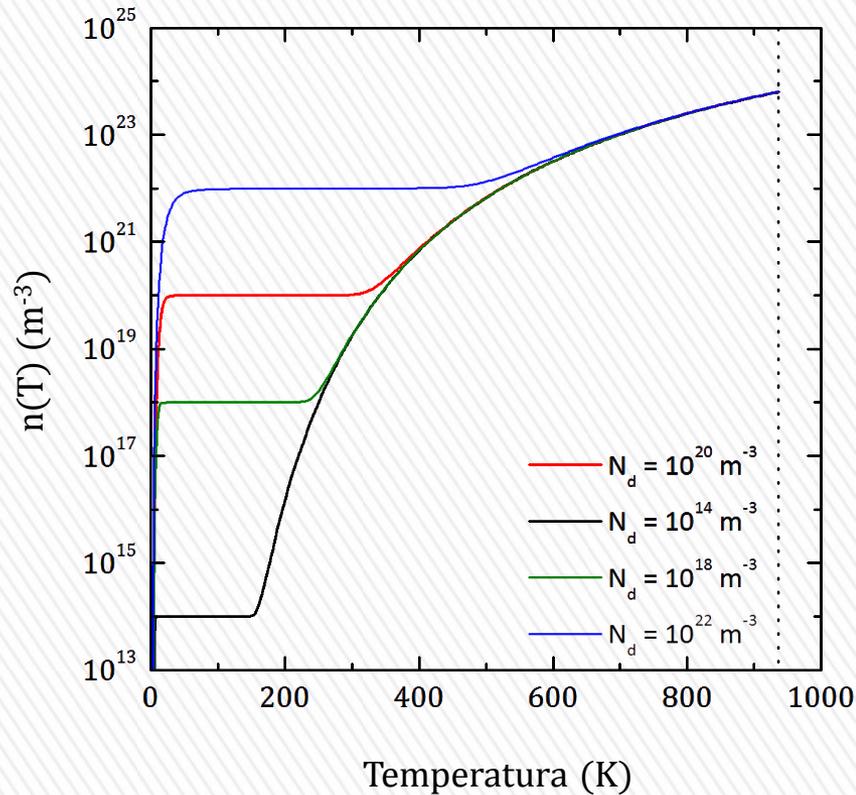
RÉGIMEN CUASI-INTRÍNSECO

El semiconductor extrínseco se comporta como intrínseco sólo a efectos de la concentración de impurezas

SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS: REGÍMENES DE CONDUCTIVIDAD



SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS: REGÍMENES DE CONDUCTIVIDAD



SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS: REGÍMENES DE CONDUCTIVIDAD

Semiconductor no degenerado tipo p dopado con N_a impurezas por unidad de volumen

1) Activación de impurezas



$$p(T) \approx n_a(T)$$

2) Saturación de impurezas



$$p(T) \approx N_a$$

3) Activación de electrones



$$p(T) \approx N_a + n(T)$$

4) Régimen cuasi-intrínseco



$$p(T) \approx n(T)$$

Baja temperatura

$$\varepsilon_F = \varepsilon_a - k_B T \ln \left\{ \frac{1}{4} \left[\sqrt{1 + \frac{8N_a}{n_v(T)} e^{\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_v}{k_B T}}} - 1 \right] \right\}$$

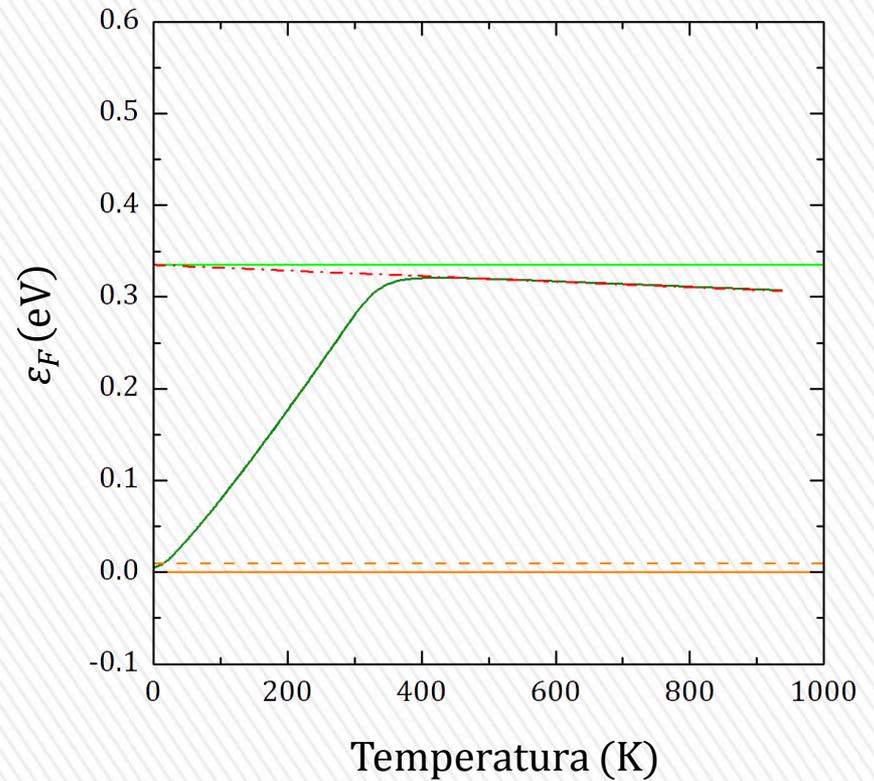
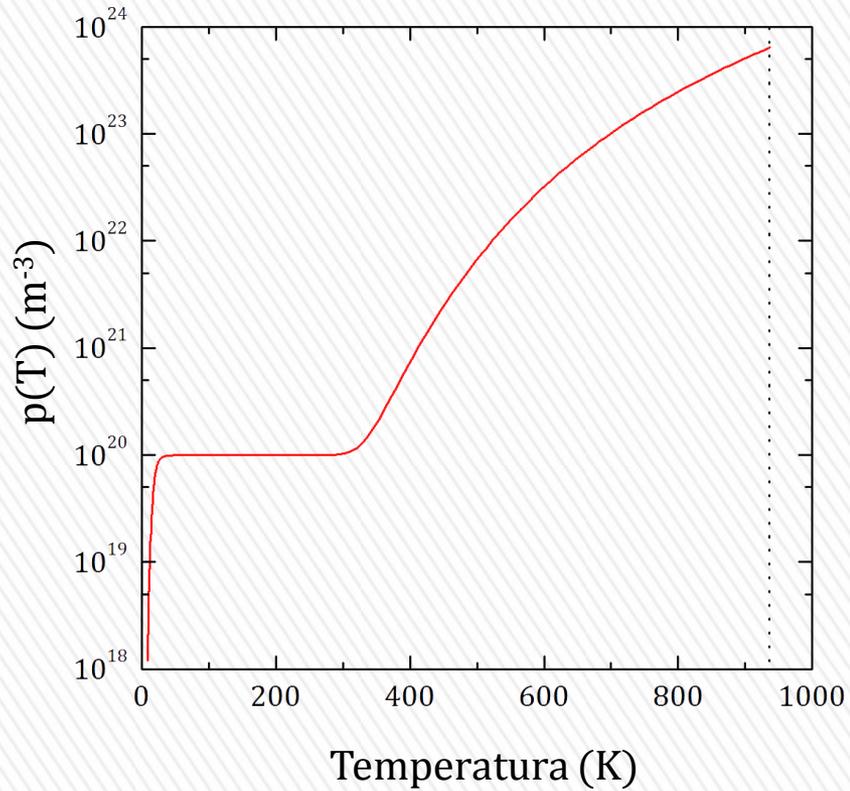
$$p(T) = \frac{n_v(T)}{4} e^{\frac{\varepsilon_v - \varepsilon_a}{k_B T}} \left[\sqrt{1 + \frac{8N_a}{n_v(T)} e^{\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_v}{k_B T}}} - 1 \right]$$

Alta temperatura

$$\varepsilon_F = \varepsilon_v - k_B T \ln \left\{ \frac{N_a}{2n_v(T)} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2n_i(T)}{N_a} \right)^2} \right] \right\}$$

$$p(T) = \frac{N_a}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2n_i(T)}{N_a} \right)^2} \right]$$

SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS: REGÍMENES DE CONDUCTIVIDAD



CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

A temperaturas finitas, un campo eléctrico aplicado sobre el conductor da lugar a la aparición de una densidad de corriente eléctrica

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

Ley de Ohm

$$\vec{j}_n = -n(T)e\langle\vec{v}_n\rangle$$

$$\langle\vec{v}_n\rangle = -\mu_n\vec{E}$$

$$\mu_n = \frac{v_n}{E}$$

Movilidad de los electrones

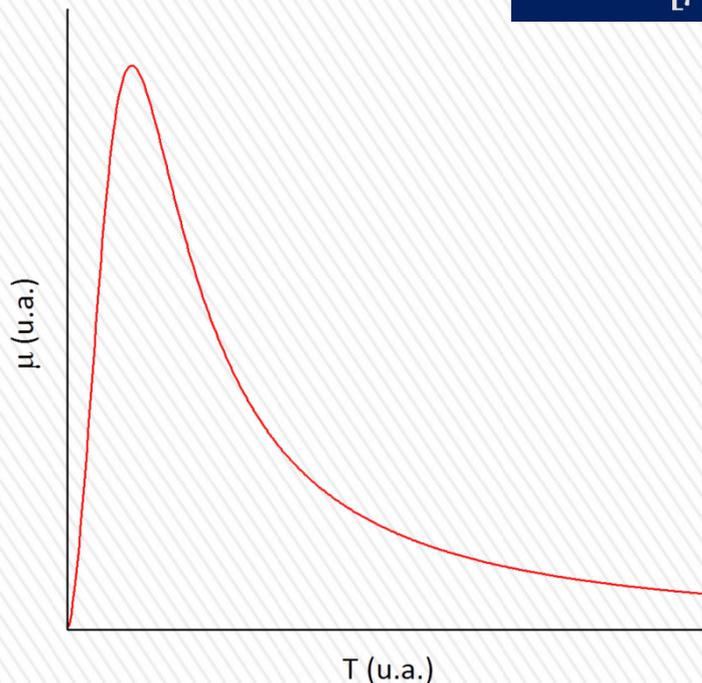
$$\vec{j}_p = +p(T)e\langle\vec{v}_p\rangle$$

$$\langle\vec{v}_p\rangle = \mu_p\vec{E}$$

$$\mu_p = \frac{v_p}{E}$$

Movilidad de los huecos

$$\sigma = e[\mu_n n(T) + \mu_p p(T)]$$



$$\mu_{impurezas} = \mu_{i,0} T^{3/2}$$

$$\mu_{fonones} = \mu_{f,0} T^{-3/2}$$

$$\frac{1}{\mu(T)} = aT^p + bT^{-p}$$

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

