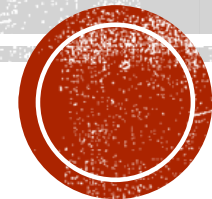
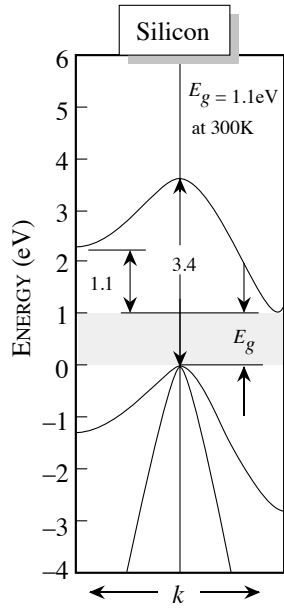


ANEXO A

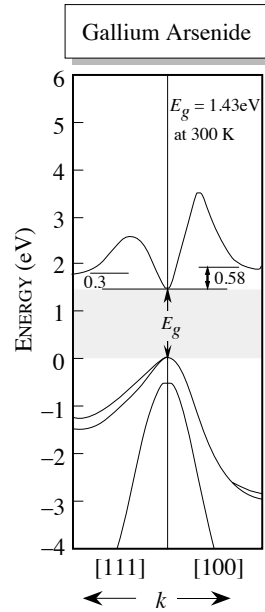
ANEXO AL TEMA 4 FÍSICA DEL ESTADO SÓLIDO II



ESTRUCTURA DE BANDAS E INTERVALO DE ENERGÍA PROHIBIDA PARA ALGUNOS SEMICONDUCTORES

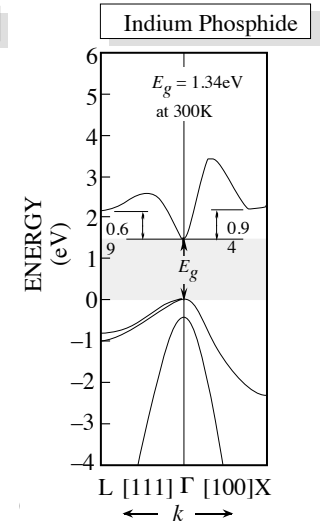
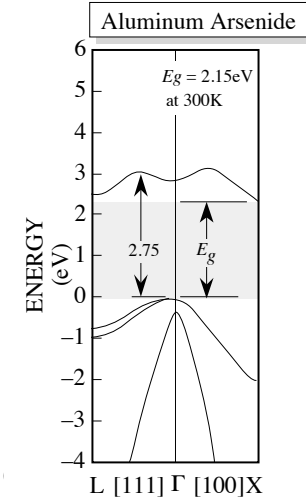
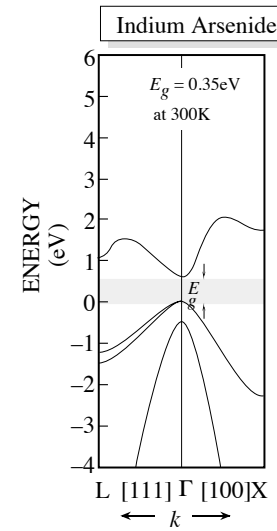
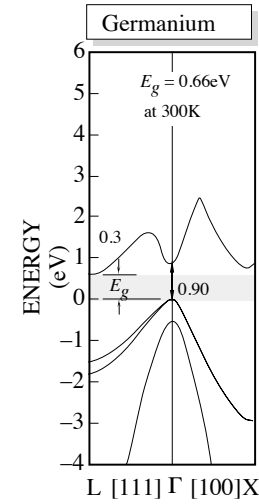


$$E_g = 1.17 - \frac{4.37 \times 10^{-4} T^2}{T - 636} \text{ (eV)} \quad T = \text{Temperature in K}$$

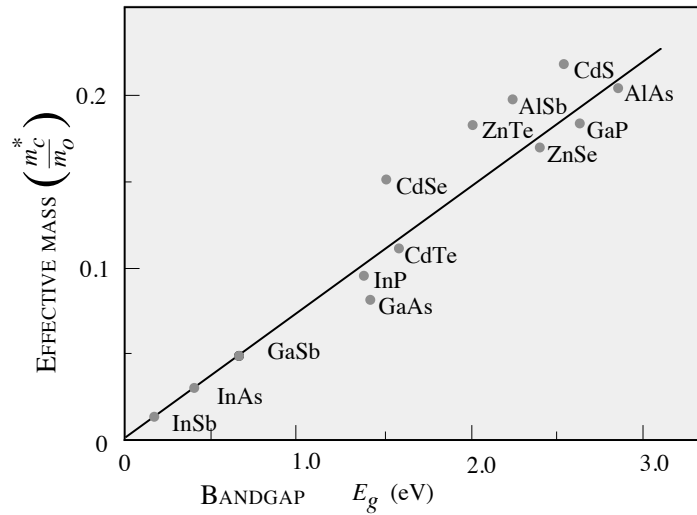


$$E_g = 1.519 - \frac{5.4 \times 10^{-4} T^2}{T + 204} \text{ (eV)}$$

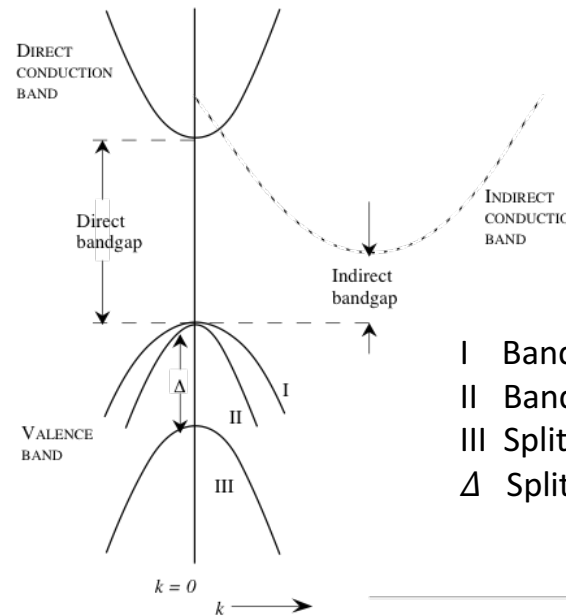
T = Temperature in K



MASA EFECTIVA EN BANDA DE CONDUCCIÓN PARA SEMICONDUCTORES MÁS TÍPICOS



$$E_c(\mathbf{k}) = E_c(0) + \frac{\hbar^2 \mathbf{k}^2}{2m_c^*}$$



- I Banda de huecos ligeros
- II Banda huecos pesados
- III Split-Off banda de Valencia
- Δ Split-Off energía

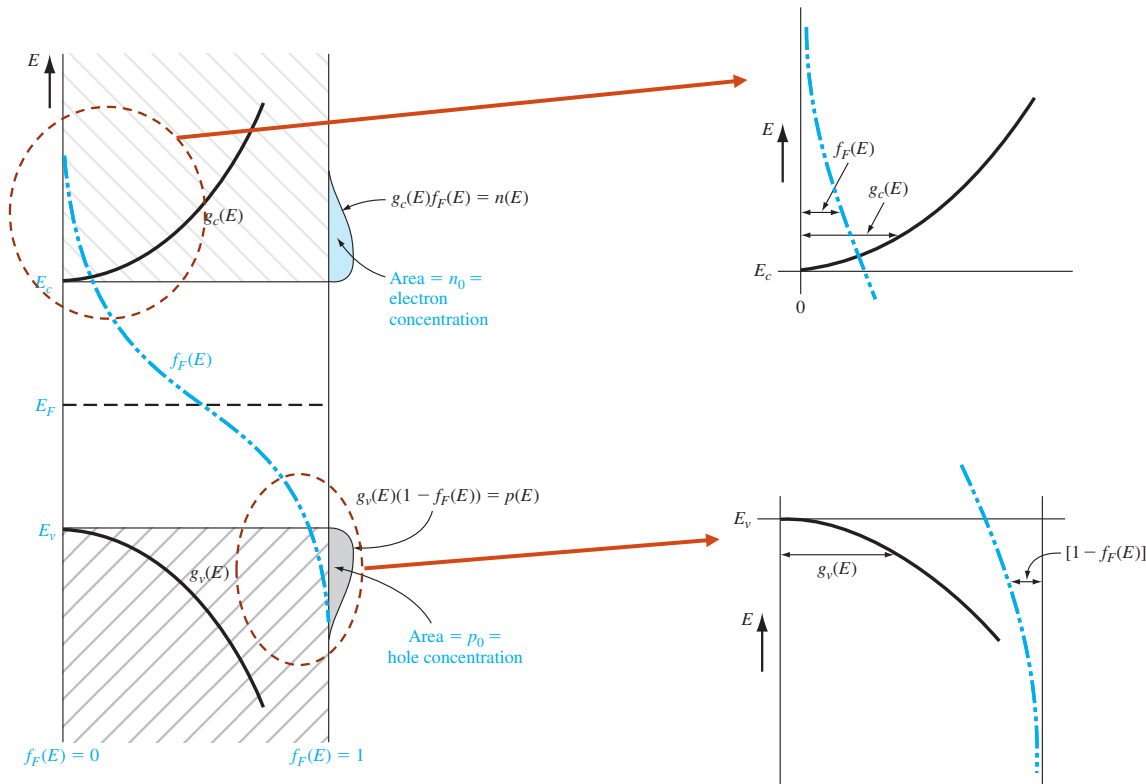


Material	Bandgap (eV)	Relative Dielectric Constant	Material	Electron Mass (m_0)	Hole Mass (m_0)
C	5.5, I	5.57	AlAs	0.1	
Si	1.124, I	11.9	AlSb	0.12	$m_{dos}^* = 0.98$
Ge	0.664, I	16.2	GaN	0.19	$m_{dos}^* = 0.60$
SiC	2.416, I	9.72	GaP	0.82	$m_{dos}^* = 0.60$
GaAs	1.424, D	13.18	GaAs	0.067	$m_{lh}^* = 0.082$ $m_{hh}^* = 0.45$
AlAs	2.153, I	10.06	GaSb	0.042	$m_{dos}^* = 0.40$
InAs	0.354, D	15.15	Ge	$m_l = 1.64$ $m_t = 0.082$ $m_{dos} = 0.56$	$m_{lh}^* = 0.044$ $m_{hh}^* = 0.28$
GaP	2.272, I	11.11	InP	0.073	$m_{dos}^* = 0.64$
InP	1.344, D	12.56	InAs	0.027	$m_{dos}^* = 0.4$
InSb	0.230, D	16.8	InSb	0.13	$m_{dos}^* = 0.4$
CdTe	1.475, D	10.2	Si	$m_l = 0.98$ $m_t = 0.19$ $m_{dos} = 1.08$	$m_{lh}^* = 0.16$ $m_{hh}^* = 0.49$
AlN	6.2, D	9.14			
GaN	3.44, D	10.0			
ZnSe	2.822, D	9.1			
ZnTe	2.394, D	8.7			

Propiedades de algunos semiconductores. D e I indican transición directa e indirecta respectivamente. Los datos mostrados corresponden con una temperatura de 300K.



ELECTRONES Y HUECOS EN UN SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO

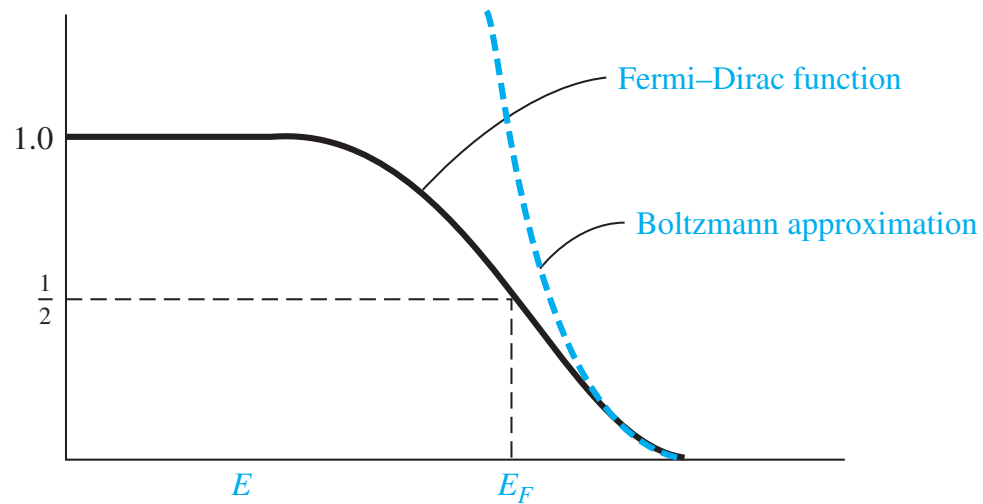


Densidad de estados en banda de valencia y conducción y función de Fermi. Las áreas representan la concentración de electrones y huecos en el caso de que el nivel de Fermi esté en el centro del intervalo de energía prohibida. Mostramos ampliación de las zonas cerca de los bordes de banda de valencia y banda de conducción.



ELECTRONES Y HUECOS EN UN SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO

Aproximación de Maxwell-Boltzman:



FERMI - DIRAC

$$f_F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$



$$f_{MB}(E) \approx \exp\left(\frac{-(E - E_F)}{kT}\right)$$

MAXWELL - BOLTZMANN



ELECTRONES Y HUECOS EN UN SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO

En un semiconductor intrínseco y bajo la aproximación de Maxwell-Boltzman:

$$n = \int_{E_C}^{\infty} g_c(E) f_F(E) dE \approx \int_{E_C}^{\infty} g_c(E) f_{MB}(E) dE \approx 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-(E_C - E_F)}{kT}\right) = N_c \exp\left(\frac{-(E_C - E_F)}{kT}\right)$$

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} g_v(E) (1 - f_F(E)) dE \approx \int_{-\infty}^{E_V} g_c(E) (1 - f_{MB}(E)) dE \approx 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-(E_F - E_V)}{kT}\right) =$$

$$p = N_v \exp\left(\frac{-(E_F - E_V)}{kT}\right)$$

En todo semiconductor intrínseco **n = p**



ELECTRONES Y HUECOS EN UN SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO

Consecuencias:

$$n = p \Rightarrow N_C \exp\left(\frac{-(E_C - E_F)}{kT}\right) = N_V \exp\left(\frac{-(E_F - E_V)}{kT}\right) \Rightarrow \text{operando}$$

$$E_F = \frac{1}{2} (E_V + E_C) + \frac{1}{2} \left[kT \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) \right] = \frac{1}{2} (E_V + E_C) + \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right) \approx \frac{1}{2} (E_V + E_C) = \frac{1}{2} E_{gap}$$

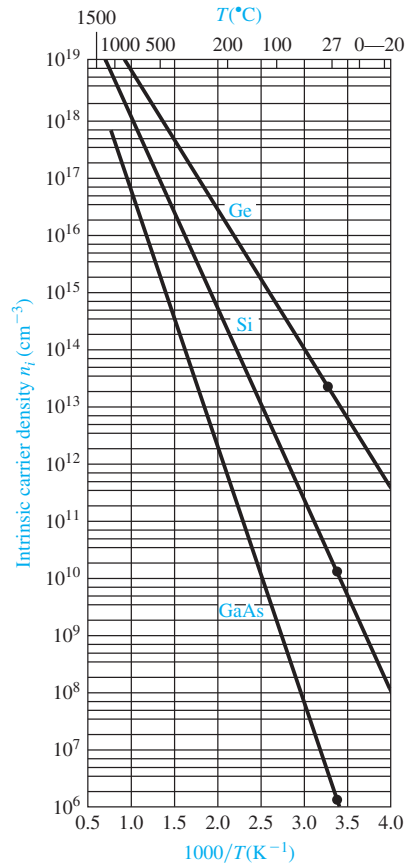
$$n \cdot p = n_i^2 = N_C N_V \exp\left(\frac{-E_{gap}}{kT}\right) = cte.$$

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

Material	n_i (cm ⁻³)
Si	1,5 x10 ¹⁰
GaAs	1,8 x10 ⁶
Ge	2,4 x10 ¹⁰



ELECTRONES Y HUECOS EN UN SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO



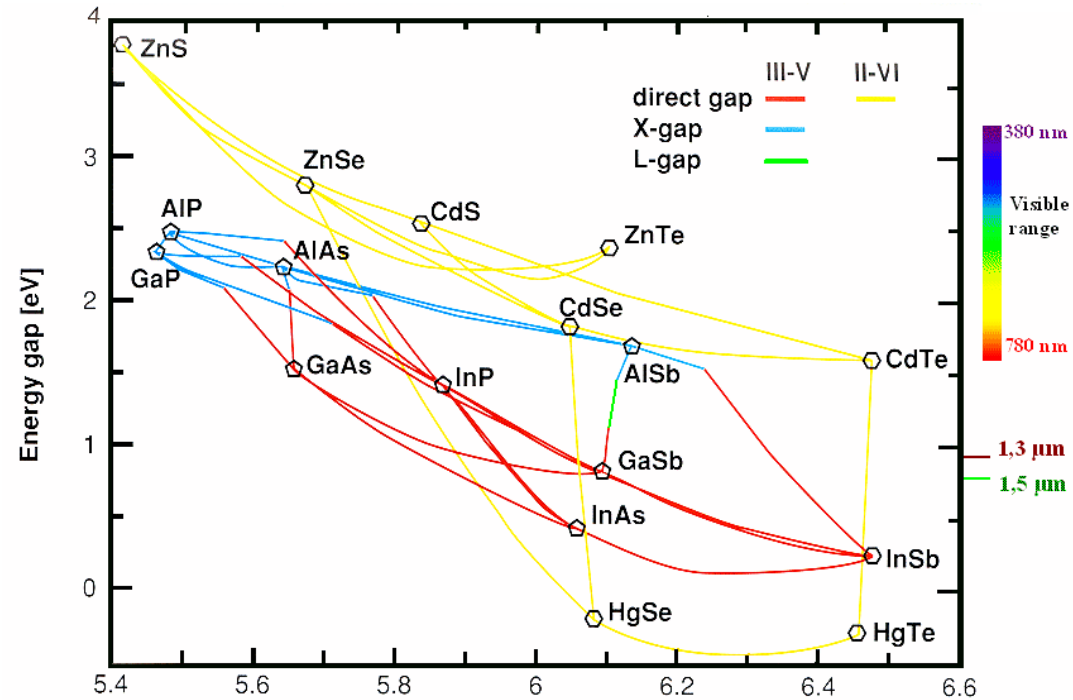
Concentración de portadores intrínsecos en diferentes semiconductores en función de la temperatura.

$$\begin{aligned} \sigma(\text{total}) &= n e \mu_e + p e \mu_h = \\ &= 4.826 \times 10^{21} \left(\frac{m_e^* m_h^*}{m_e^2} \right)^{3/4} T^{3/2} e (\mu_e + \mu_h) \exp\left(\frac{-E_{gap}}{2kT}\right) = \\ &= 773.1 \left(\frac{m_e^* m_h^*}{m_e^2} \right)^{3/4} T^{3/2} (\mu_e + \mu_h) \exp\left(\frac{-E_{gap}}{2kT}\right) \\ \sigma(\text{total}) &= \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_{gap}}{2kT}\right) \end{aligned}$$



ELECTRONES Y HUECOS EN UN SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO

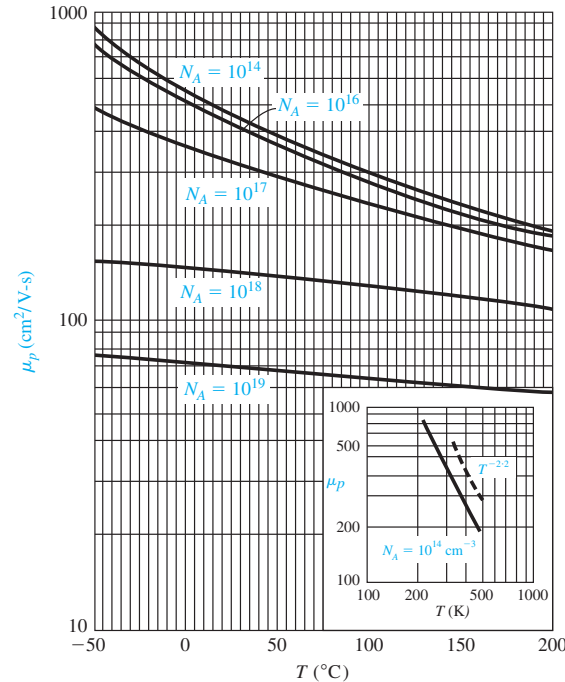
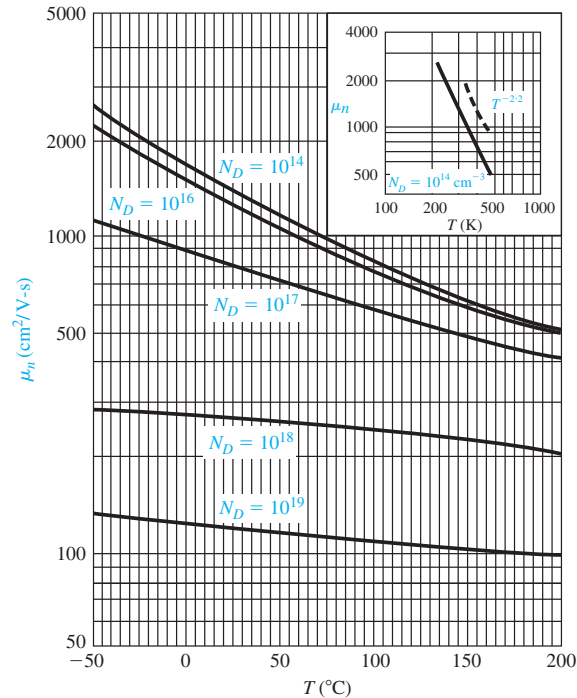
$$\sigma(\text{total}) = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_{\text{gap}}}{2kT}\right)$$



El intervalo de energía prohibida depende del parámetro de red del material



MOVILIDAD EN UN SEMICONDUCTOR



$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I}$$

Variación de la movilidad de electrones y huecos en silicio en función de la temperatura y en función de la concentración de dopantes. Los "insets" muestran la dependencia con la temperatura para una muestra intrínseca.

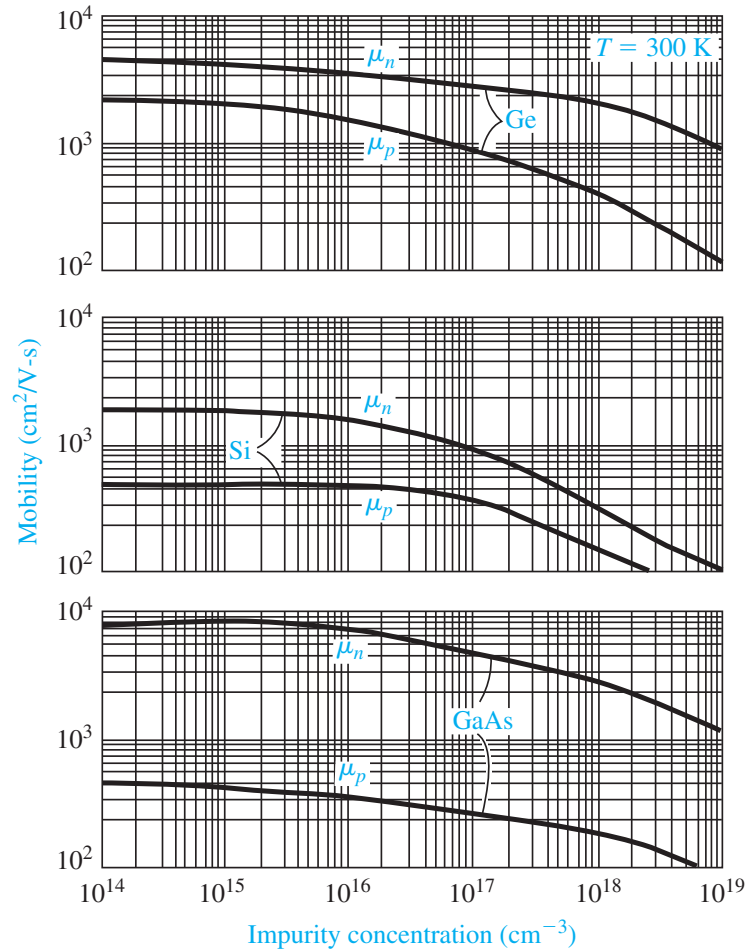
Dependencia de la movilidad con la temperatura:

La movilidad de μ_L sólo afectada por la red cristalina: $\mu_L \propto T^{-3/2}$

La movilidad de μ_I sólo afectada por impurezas ionizadas: $\mu_I \propto \frac{T^{+3/2}}{N_I}$, donde N_I es el número de impurezas ionizadas



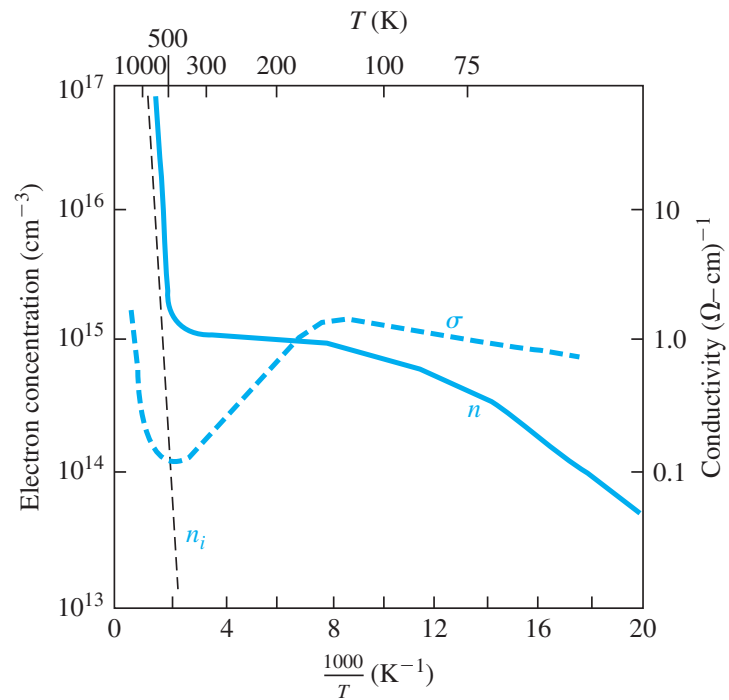
MOVILIDAD EN UN SEMICONDUCTOR



Variación de la movilidad de electrones y huecos en silicio y germanio en función de la concentración de impurezas.



DEPENDENCIA DE LA RESISTIVIDAD CON LA TEMPERATURA EN UN SEMICONDUCTOR



$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)}$$

Relación entre la concentración de electrones y la conductividad en función del inverso de la temperatura en silicio.

