



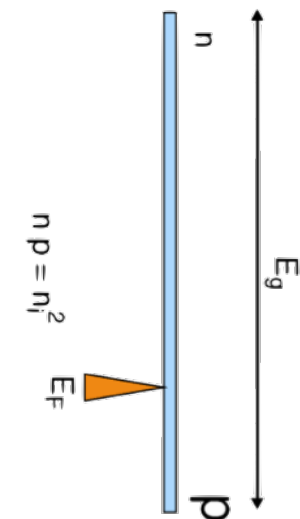
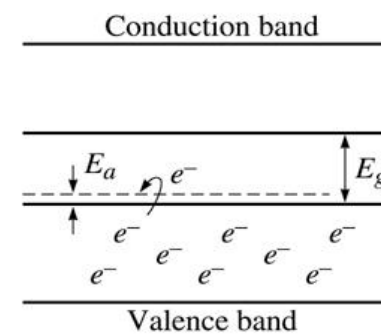
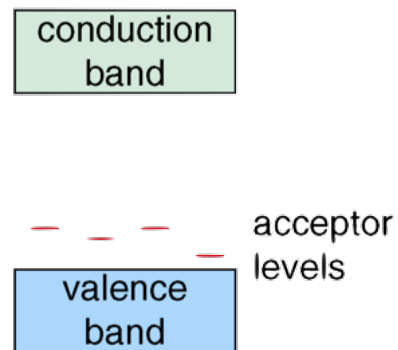
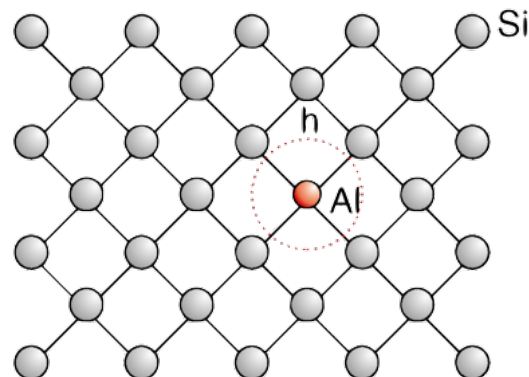
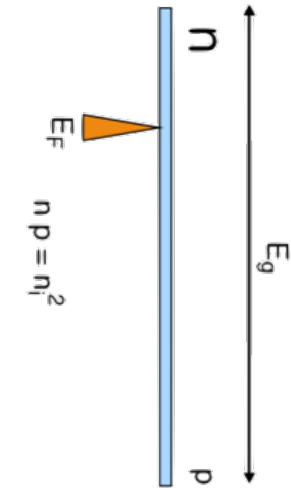
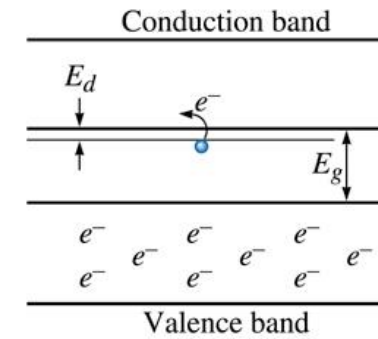
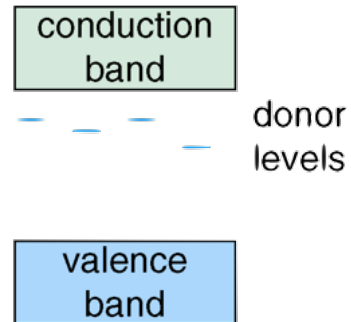
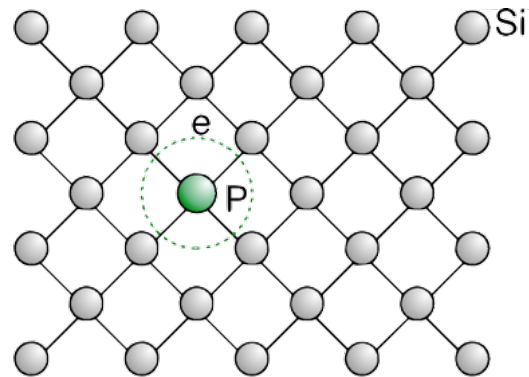
UNIVERSIDAD  
COMPLUTENSE  
MADRID

## 4.- PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS SÓLIDOS

# 4. Propiedades eléctricas de los sólidos

- Semiconductores extrínsecos.
- Dieléctricos.
- Ferroelectricidad.
- Piezoelectricidad.

# Semiconductores Extrínsecos



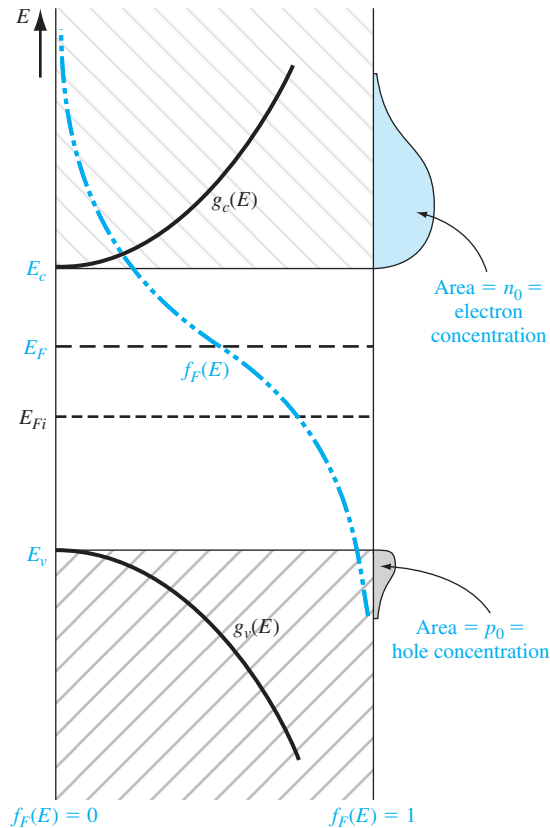
# Semiconductores Extrínsecos

**TABLE 18-7** ■ *The donor and acceptor energy gaps (in electron volts) when silicon and germanium semiconductors are doped*

Dopant	Silicon		Germanium	
	$E_d$	$E_a$	$E_d$	$E_a$
P	0.045		0.0120	
As	0.049		0.0127	
Sb	0.039		0.0096	
B		0.045		0.0104
Al		0.057		0.0102
Ga		0.065		0.0108
In		0.160		0.0112

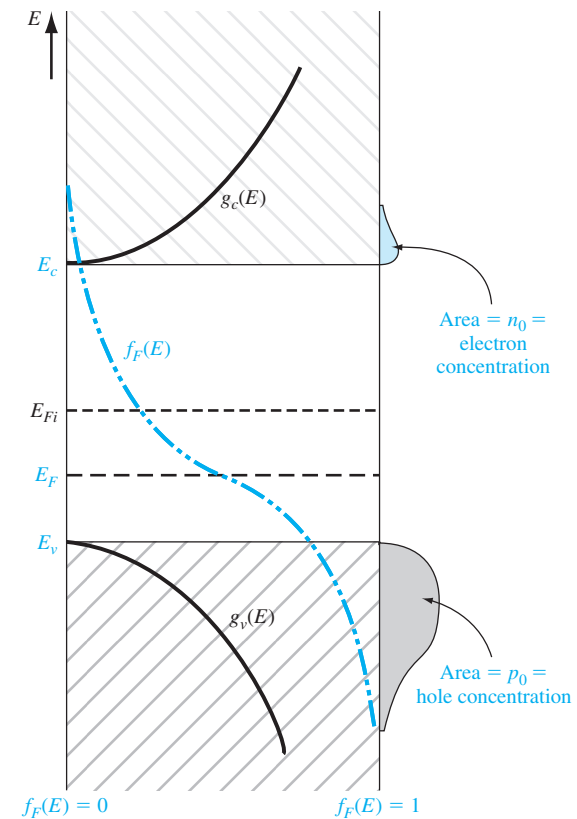
Niveles de energía introducidos por impurezas en Silicio y Germanio.

# Semiconductores Extrínsecos

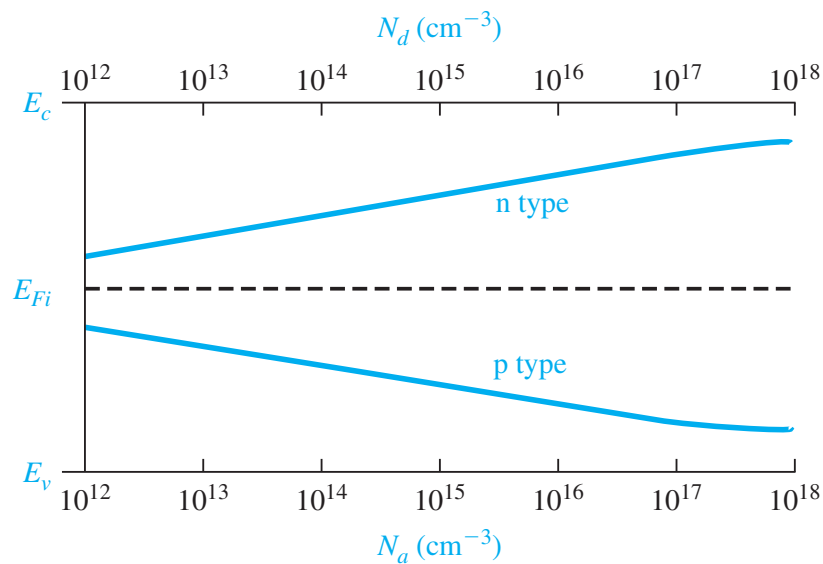


Densidad de estados, función de Fermi y áreas representando la concentración de electrones y huecos para el caso en el que la Energía de Fermi está por encima del nivel intrínseco.

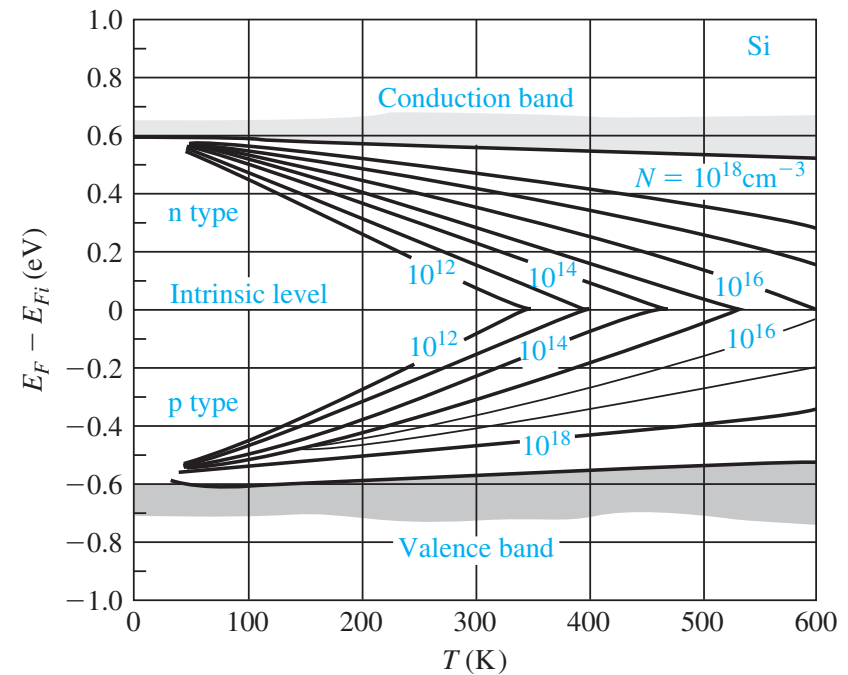
Densidad de estados, función de Fermi y áreas representando la concentración de electrones y huecos para el caso en el que la Energía de Fermi está por debajo del nivel intrínseco.



# Semiconductores Extrínsecos

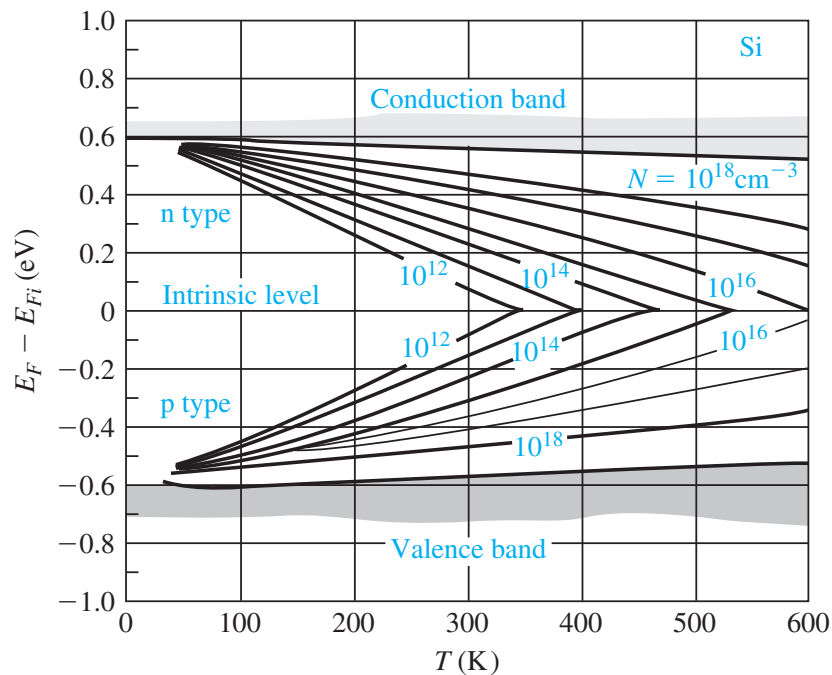


Posición del nivel de Fermi en función de la concentración de donores (tipo n) y aceptores (tipo p)

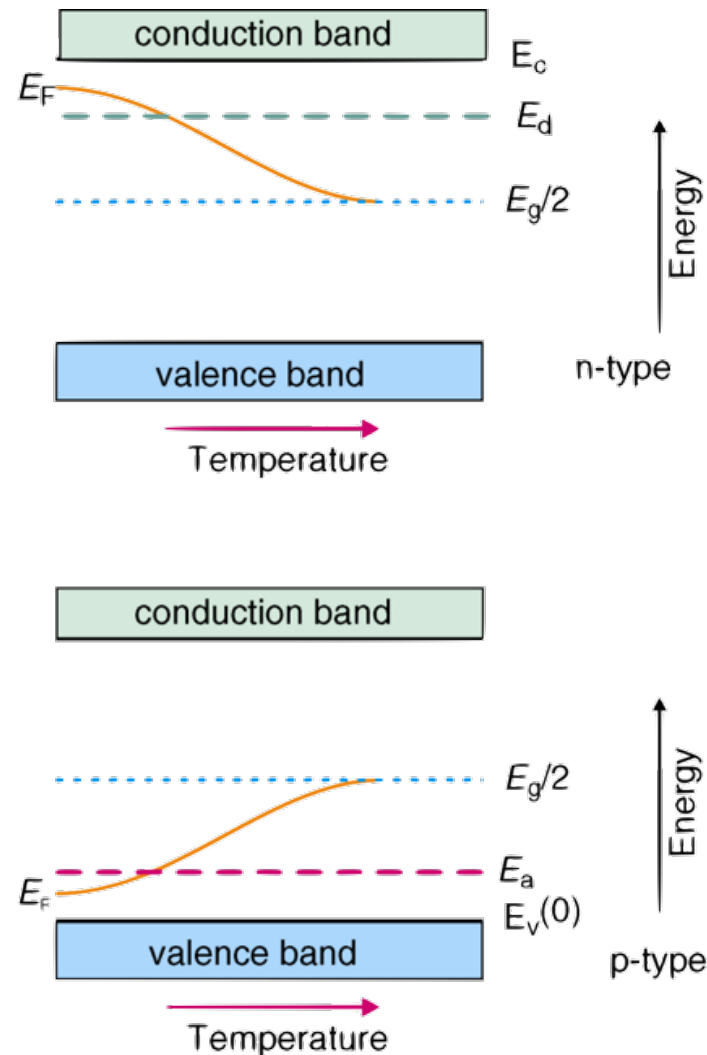


Posición del nivel de Fermi en función de la temperatura para varios concentraciones de dopantes.

# Semiconductores Extrínsecos



Posición del nivel de Fermi en función de la temperatura para varios concentraciones de dopantes.



# Semiconductores Extrínsecos

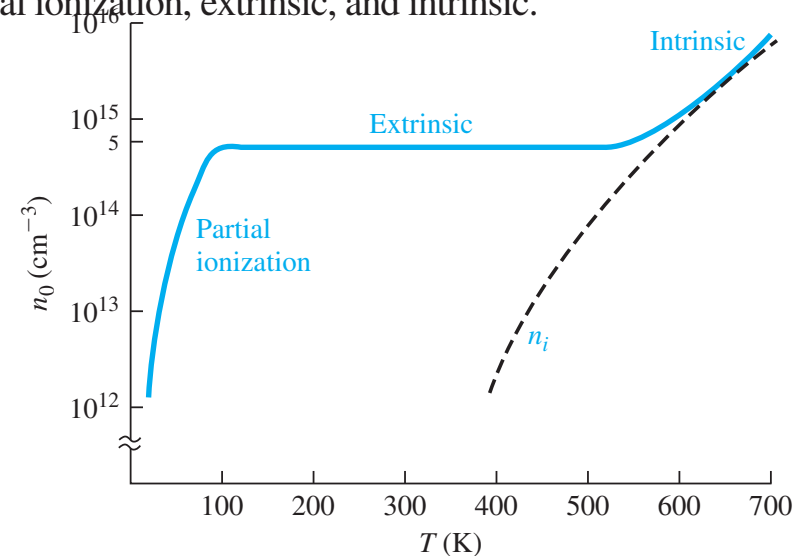
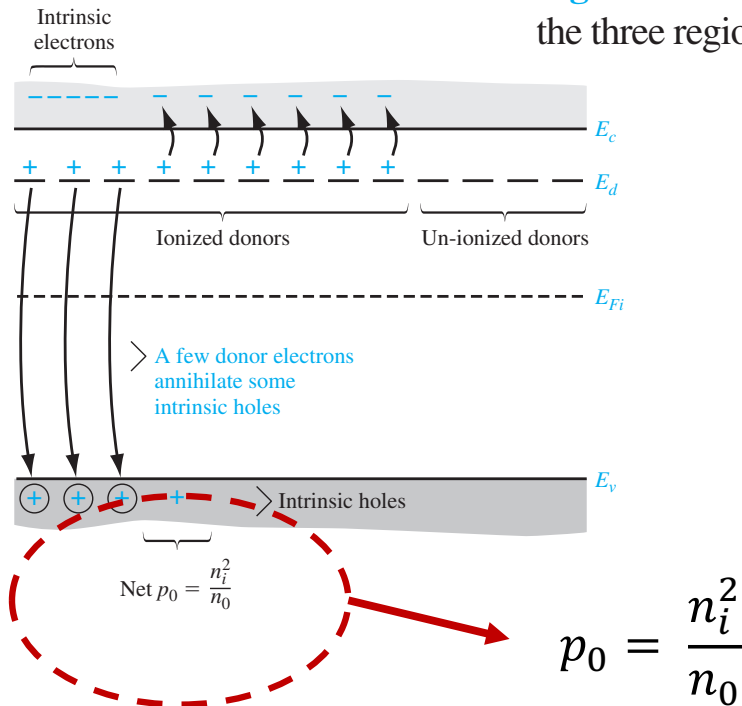
$$\left. \begin{aligned} n &= N_c \exp\left[-\frac{(E_c - E_F)}{kT}\right] = n_i \exp\left[-\frac{(E_F - E_{Fi})}{kT}\right] \\ p &= N_v \exp\left[-\frac{(E_F - E_V)}{kT}\right] = n_i \exp\left[-\frac{(E_F - E_{Fi})}{kT}\right] \end{aligned} \right\} \Rightarrow n \cdot p = n_i^2$$

En un semiconductor extrínseco  $n \neq p$  pero en todo caso  $n \cdot p = n_i^2$



# Semiconductores Extrínsecos

**Figure 4.16** | Electron concentration versus temperature showing the three regions: partial ionization, extrinsic, and intrinsic.

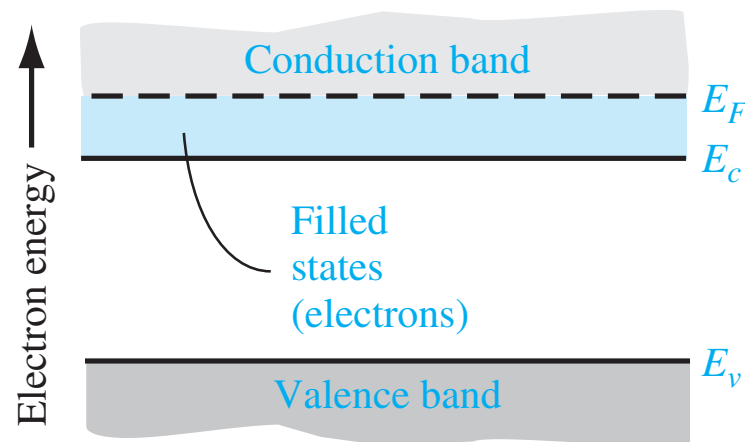


Concentración de electrones vs. Temperatura mostrando tres regiones: ionización parcial, extrínseco e intrínseco

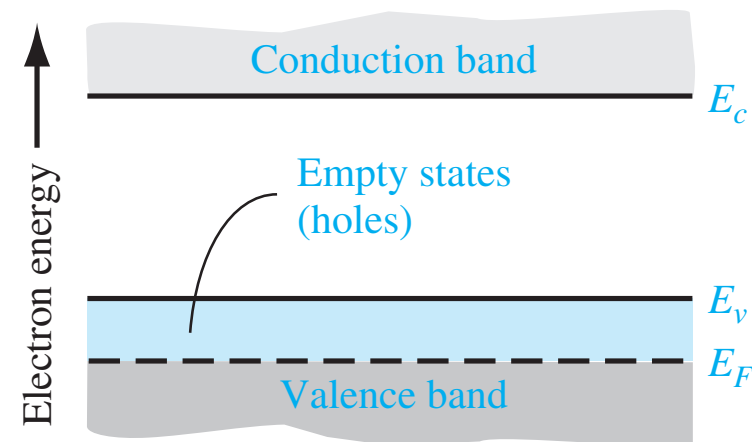
Diagrama de bandas de energía mostrando la redistribución de electrones cuando se añade un donador a un semiconductor.

# Semiconductores Extrínsecos (Degeneración)

Diagramas de bandas simplificados para (a) semiconductor tipo n degenerado y (b) semiconductor tipo p degenerado



(a)



(b)

Si la concentración de impurezas es muy alta, la distancia entre ellas decrece hasta tal punto que interaccionan entre ellas. Cuando esto ocurre los niveles discretos de las impurezas comienzan a solaparse y formar una banda de energía. El desdoblamiento de estos niveles formando una banda puede llegar a alcanzar la banda de conducción (tipo n) o de valencia (tipo p). Cuando la concentración de portadores excede la densidad de estados ( $N_c$  o  $N_v$ ) el nivel de Fermi se sitúa dentro de la banda de conducción (o valencia) y hablamos de un semiconductor degenerado.

# Semiconductores Extrínsecos (Compensación)

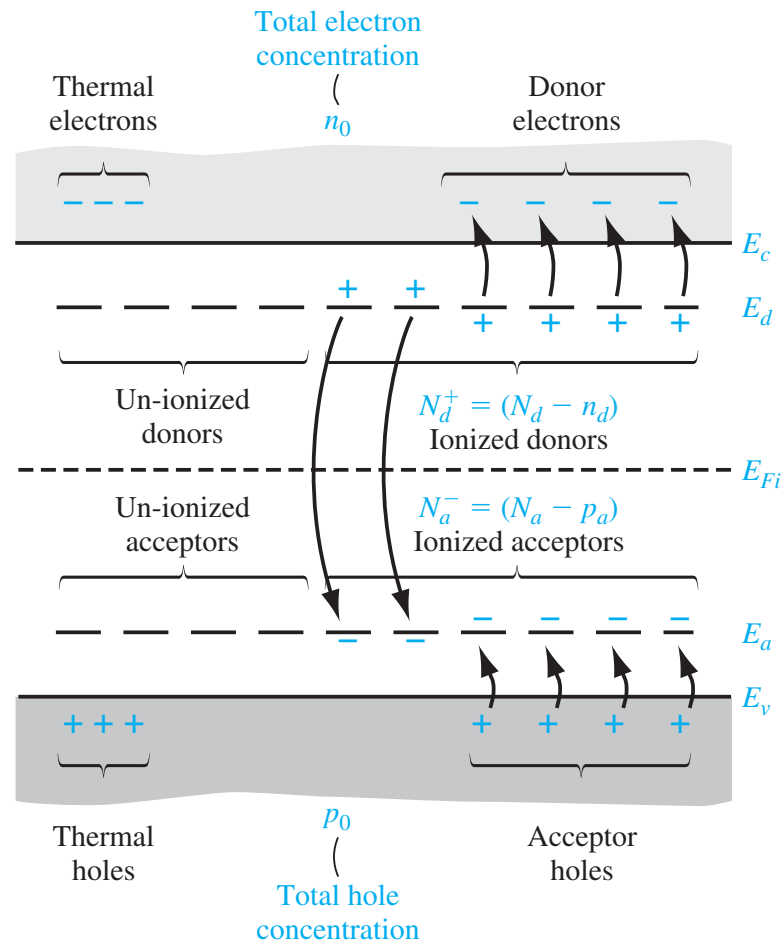


Diagrama de bandas de energía de un semiconductor compensado mostrando donores y aceptores ionizados y no ionizados.

# Densidad de corriente

Un campo eléctrico aplicado a un semiconductor produce una fuerza sobre los portadores de carga causándoles una aceleración. Este movimiento de carga debido a un campo eléctrico se llama densidad de corriente de deriva ("drift current density")

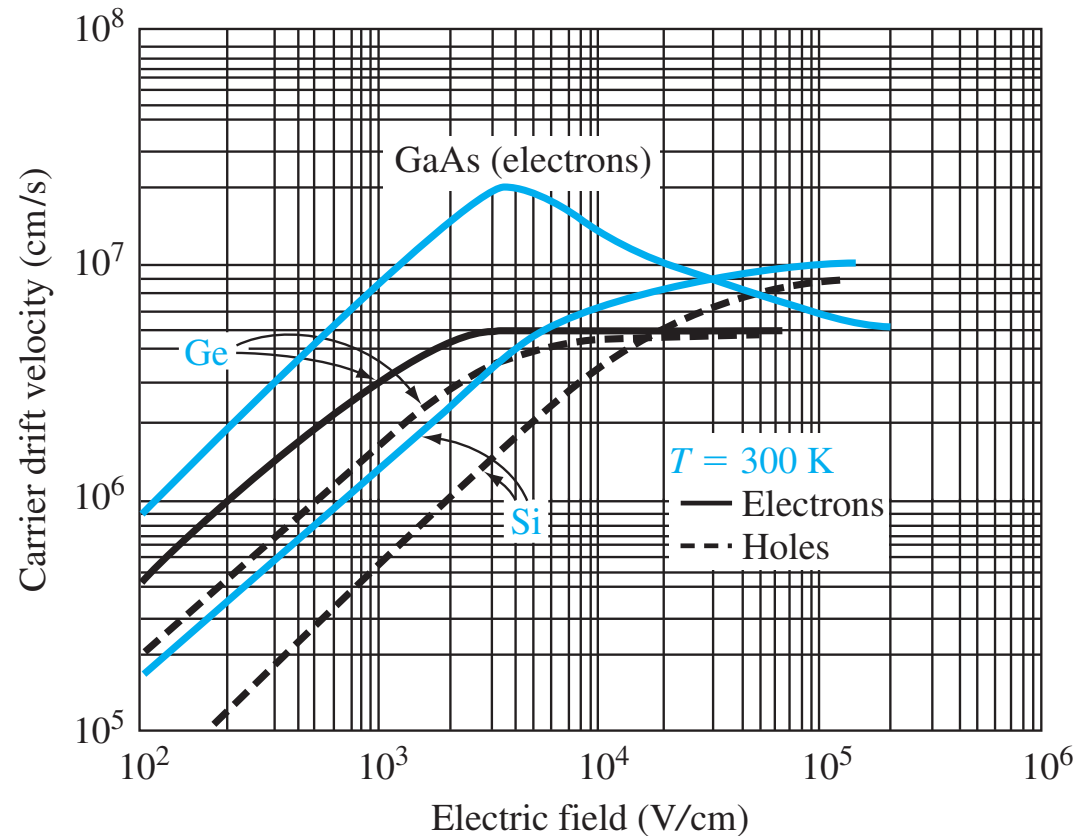
$$\overrightarrow{J}_{drift} = \rho \overrightarrow{v}_d \quad \left\{ \begin{array}{l} \rho = \text{Densidad de corriente} \\ v_d = \text{velocidad deriva} \end{array} \right.$$

Si la velocidad de deriva es causada por un campo eléctrico:

$$\overrightarrow{v}_d = \mu_{portadores} \vec{E}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{electrones} \rightarrow \overrightarrow{J}_{drift} = -en\overrightarrow{v}_d = -en(-\mu_n\vec{E}) = en\mu_n\vec{E} \\ \text{huecos} \rightarrow \overrightarrow{J}_{drift} = ep\overrightarrow{v}_d = ep(\mu_p\vec{E}) = ep\mu_p\vec{E} \end{array} \right\} \Rightarrow \overrightarrow{J}_{drift} = e(n\mu_n + p\mu_p)\vec{E}$$

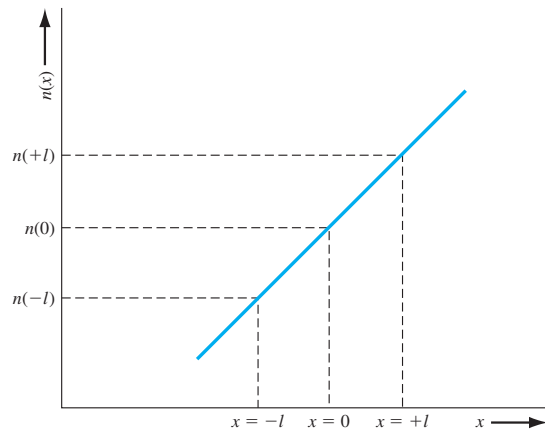
# Densidad de corriente



Velocidad de deriva de portadores en función del campo eléctrico para silicio alta pureza, germanio y arseniuro de galio.

# Densidad de corriente

También puede existir una corriente eléctrica por la existencia de un gradiente de concentración de portadores.



Concentración de portadores vs. Distancia. Hemos de suponer que  $l$  es menor que el recorrido libre medio

*El flujo neto de portadores a través de  $x=0$  será:*

$$F_n = -v_{th} l \frac{dn}{dx} \Rightarrow J_{Diff} = -eF_n = eD_n \frac{dn}{dx}$$

*Donde  $D_n$  se denomina Coeficiente de Difusión*

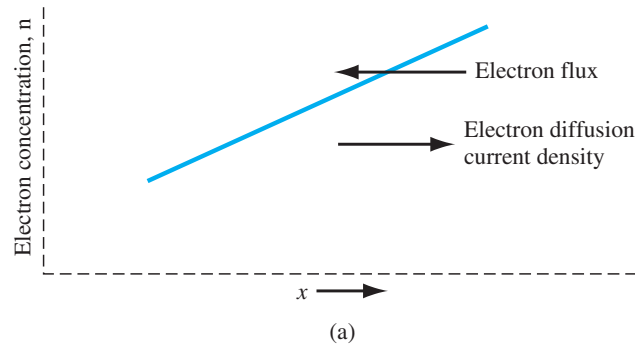
$$D_n = lv_{th}$$

$$J_{Diff} = eD_n \frac{dn}{dx} \quad \text{para electrones}$$

$$J_{Diff} = -eD_p \frac{dp}{dx} \quad \text{para huecos}$$

# Densidad de corriente

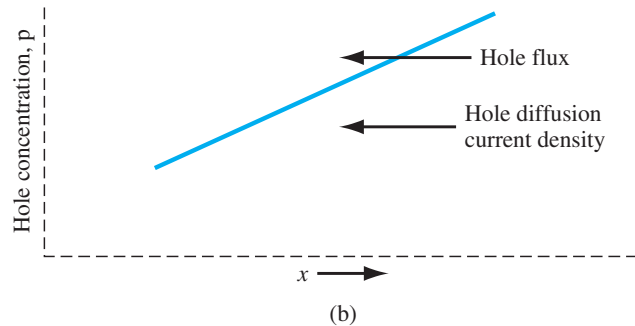
La corriente total será la suma total de cada una de las corrientes atendiendo al signo correspondiente.



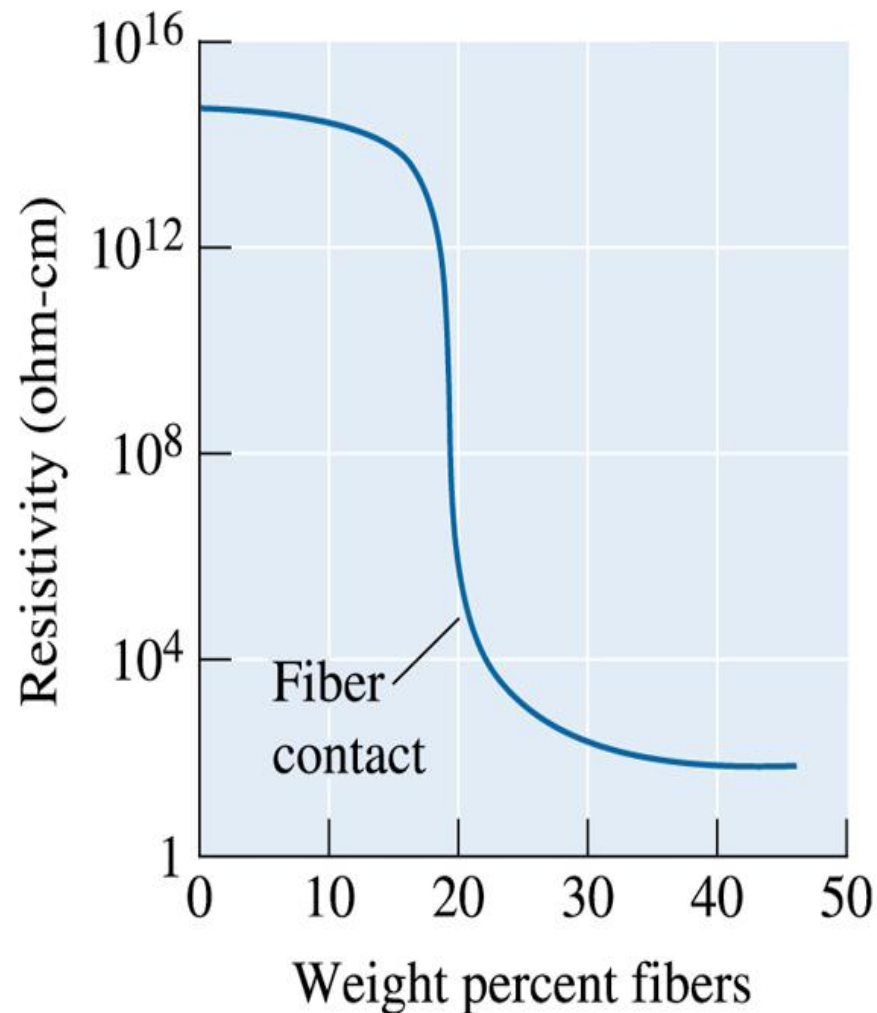
$$J = en\mu_n E_x + ep\mu_p E_x + eD_n \frac{dn}{dx} - eD_p \frac{dp}{dx}$$

## RELACIÓN DE EINSTEIN

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{e}$$



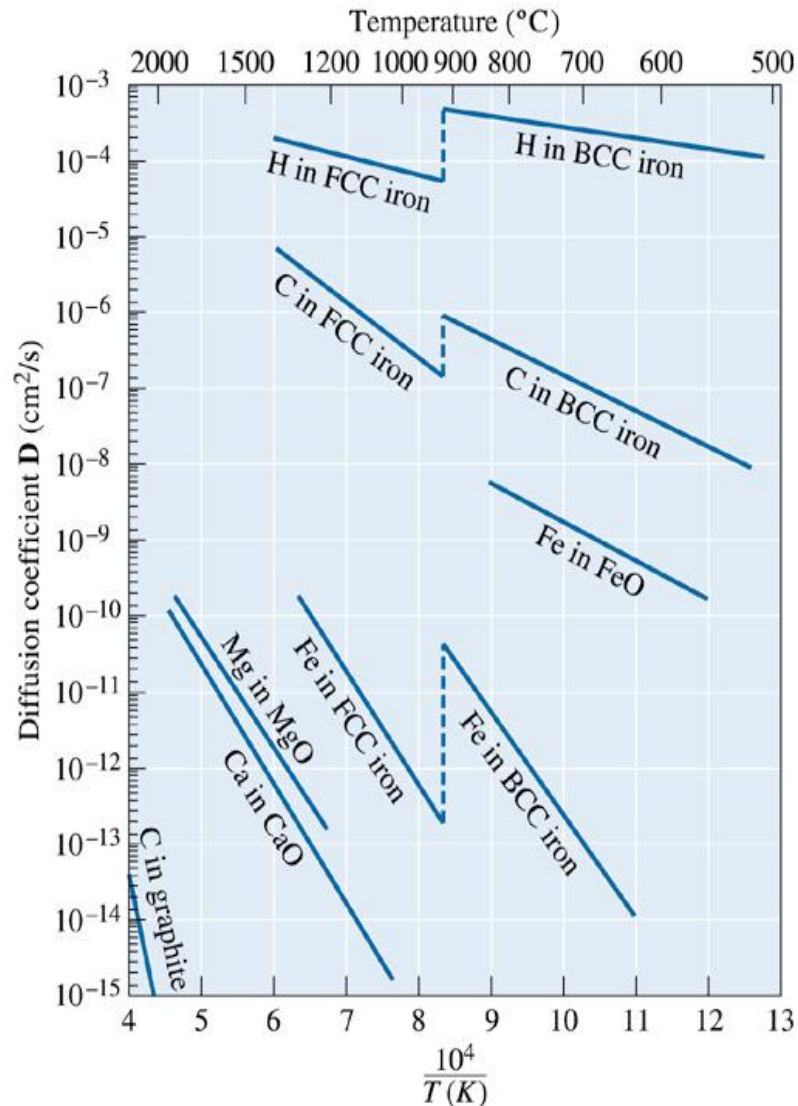
# Conductividad Iónica



- ✓ **Conduction in Ionic Materials** - Conduction in ionic materials often occurs by movement of entire ions, since the energy gap is too large for electrons to enter the conduction band. Therefore, most ionic materials behave as insulators.
- ✓ **Conduction in Polymers** - Because their valence electrons are involved in covalent bonding, polymers have a band structure with a large energy gap, leading to low-electrical conductivity.



# Conductividad Iónica



Coeficiente de difusión  $D$  como función del recíproco de la temperatura para alguno metales y cerámicas.

En el gráfico de Arrhenius,  $D$  representa la velocidad del proceso de difusión. Una pendiente pronunciada denota una energía de activación alta.

En un conductor iónico, la movilidad viene dada por:

$$\mu = \frac{qD}{kT} \quad \left\{ \begin{array}{l} q = \text{Carga del ión} \\ D = \text{coef. difusión} \end{array} \right.$$



UNIVERSIDAD  
COMPLUTENSE  
MADRID