

Tema 2: Semiconductores intrínsecos y extrínsecos

Cap. 3: K. Kano

- Introducción
- Densidad de Estados (DeE)
- Función de distribución de Fermi-Dirac
- Densidad de portadores en semiconductores intrínsecos.
Nivel de Fermi
- Semiconductores extrínsecos: tipo p y tipo n
- Densidad de portadores en semiconductores extrínsecos
- Nivel de Fermi en semiconductores extrínsecos

Introducción

Objetivo

Calcular la densidad de portadores en semiconductores puros y poco dopados

Motivo

Poder determinar los comportamientos característicos tensión/corriente de los dispositivos

Esquema

$$\left. \begin{array}{l} \text{Densidad de estados} \\ \times \\ \text{Probabilidad de ocupación} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{Densidad de portadores}$$

Concepto: *Equilibrio térmico*

Es el estado en que un proceso es acompañado por otro, igual y opuesto (estado dinámico), mientras que el sistema se mantiene a la misma temperatura, sin intercambios de energía con el exterior.

Densidad de estados

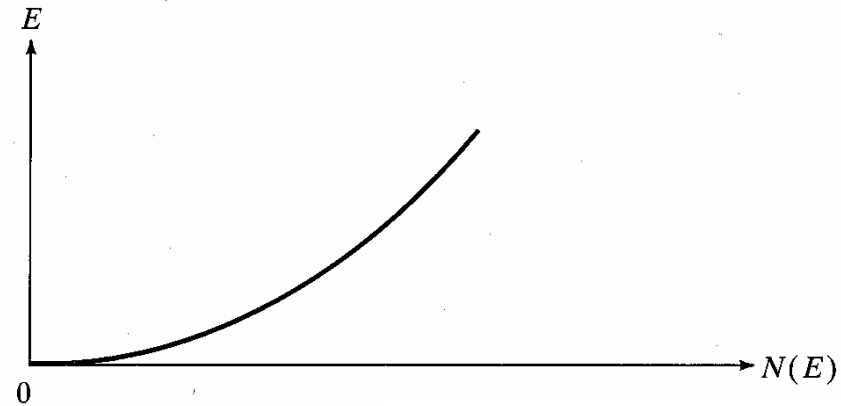
Definición

La **densidad de estados** es el número de estados electrónicos posibles por unidad de volumen y por unidad de energía.

En un metal (*los electrones son libres*):

$$N(E) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{8m}{h^2} \right)^{3/2} \sqrt{E} \quad [1]$$

Apéndice C
K. Kano



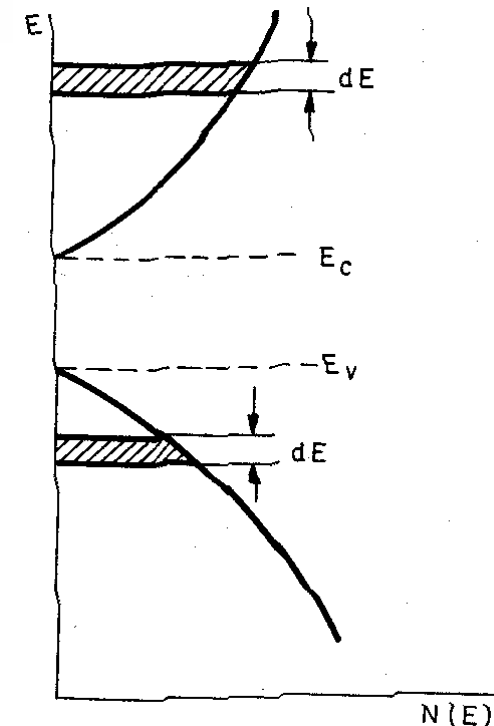
Puede considerarse como una función continua en E

Esta expresión también será válida para un semiconductor cristalino (*electrones quasi-libres, ligados a un potencial periódico*)

Para adaptarla, hemos de introducir E_C , E_V y m^*

$$N_n(E) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{8m_n^*}{h^2} \right)^{3/2} \sqrt{E - E_C} \quad \text{para } E > E_C \quad [2]$$

$$N_p(E) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{8m_p^*}{h^2} \right)^{3/2} \sqrt{E_V - E} \quad \text{para } E < E_V \quad [3]$$



Función de distribución de Fermi-Dirac

Los electrones son *fermiones*, i. e., partículas que cumplen el principio de exclusión de Pauli

Así, vendrán gobernados por la estadística de Fermi:

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} \quad [4]$$

$f(E)$ es la probabilidad que un estado de energía E esté ocupado, E_F es el nivel de Fermi, k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura absoluta.

<http://jas2.eng.buffalo.edu/applets/education/semicon/fermi/functionAndStates/functionAndStates.html>

Comentarios

Un estado con energía $E > E_F$ tendrá mas posibilidades de ser ocupado a mayor temperatura.

A una temperatura T , la probabilidad de ocupación disminuye si aumenta la energía

Para cualquier T , la probabilidad de encontrar un electrón con una energía E_F es 1/2.

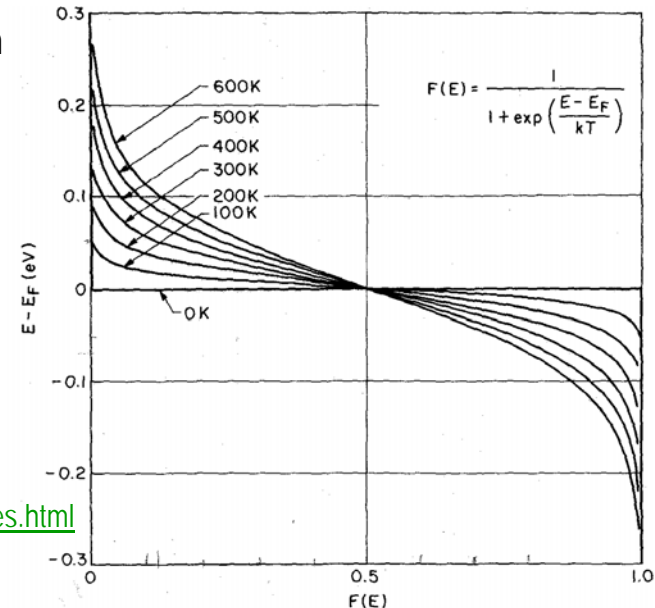
A $T=0$, la probabilidad de encontrar un electrón con $E > E_F$ es 0 y con $E < E_F$ es 1

Si la probabilidad de encontrar un electrón es $f(E)$, la probabilidad de no encontrarlo es $1-f(E)$

Aproximación de Boltzmann (facilitará los cálculos posteriores)

electrones $\rightarrow f_C(E) = f(E) \cong \exp[-(E - E_F)/kT]$ para $(E - E_F) > 3kT$ [5]

huecos $\rightarrow f_V(E) = 1 - f(E) \cong \exp[-(E_F - E)/kT]$ para $(E_F - E) > 3kT$ [6]



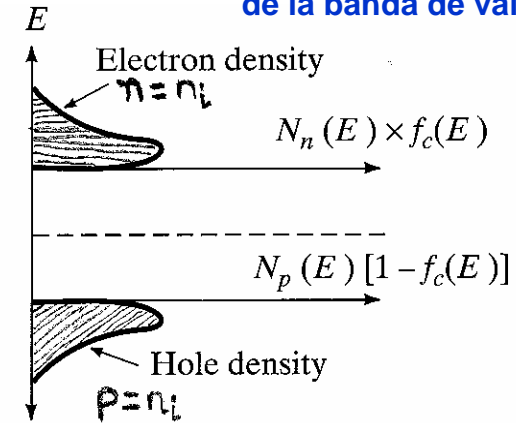
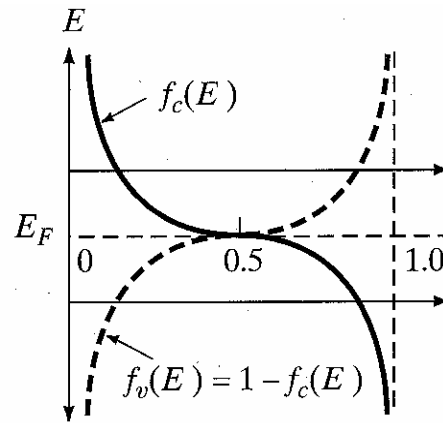
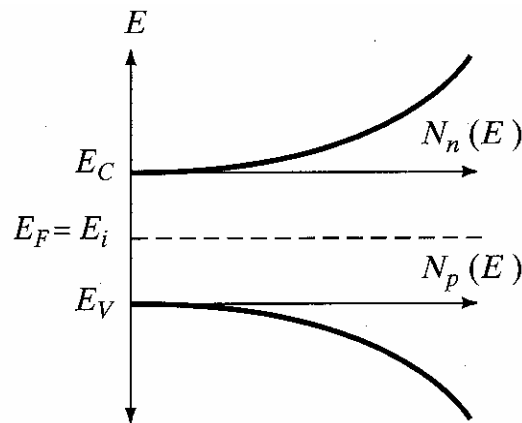
Densidad de portadores

$$n = \int_{E_C}^{\infty} N_n(E) \times f_c(E) dE = \dots = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad \text{con} \quad N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \quad [7]$$

Densidad efectiva de estados de la banda de conducción

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} N_p(E) \times f_v(E) dE = \dots = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad \text{con} \quad N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \quad [8]$$

Densidad efectiva de estados de la banda de valencia



semiconductor	N_C (cm ⁻³)	N_V (cm ⁻³)	E_g (eV)
Si	3.22×10^{19}	1.83×10^{19}	1.12
Ge	1.03×10^{19}	5.35×10^{18}	0.66
GaAs	4.21×10^{17}	9.52×10^{18}	1.42

Densidad de portadores (*cont.*)

Densidad intrínseca de portadores: ley de acción de masas

$$n \cdot p = N_C N_V e^{\frac{E_C - E_V}{kT}} = n_i^2 \Rightarrow \boxed{n \cdot p = n_i^2} \quad [9]$$

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} (m_n^* m_p^*)^{3/4} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad [10]$$

Posición del nivel de Fermi

De ecuaciones anteriores:

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) \quad [11]$$

Si usamos la relación

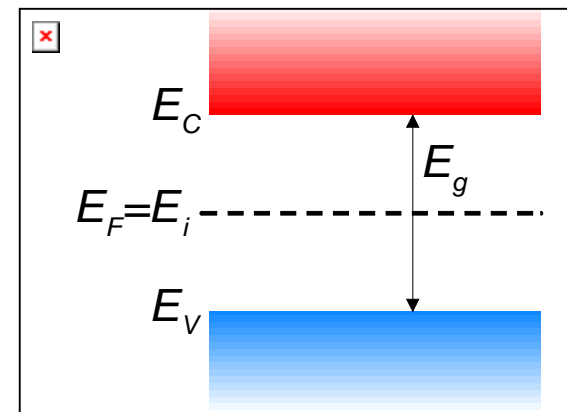
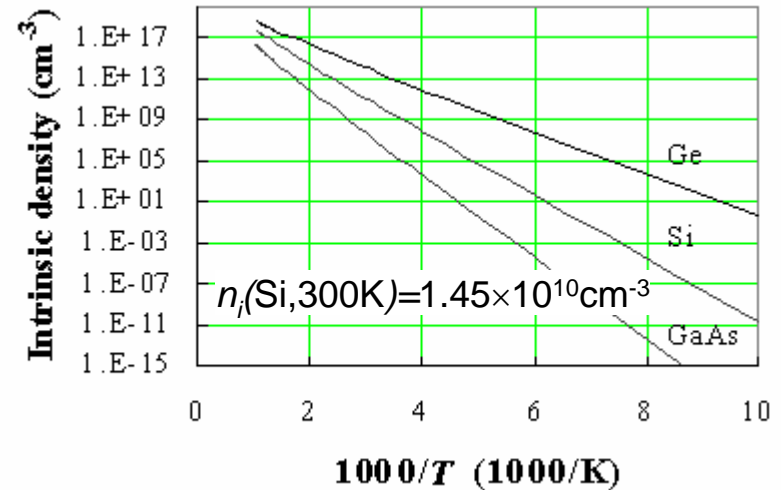
$$\frac{N_V}{N_C} = \left(\frac{m_n^*}{m_p^*}\right)^{3/2} = \left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right)^{-3/2} \quad [12]$$

Entonces

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right) = \frac{E_C + E_V}{2} - \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_n^*}{m_p^*}\right) \quad [13]$$

Para un semiconductor intrínseco:

$$E_i = E_F = E_V + \frac{E_g}{2} - \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_n^*}{m_p^*}\right) \quad [14]$$



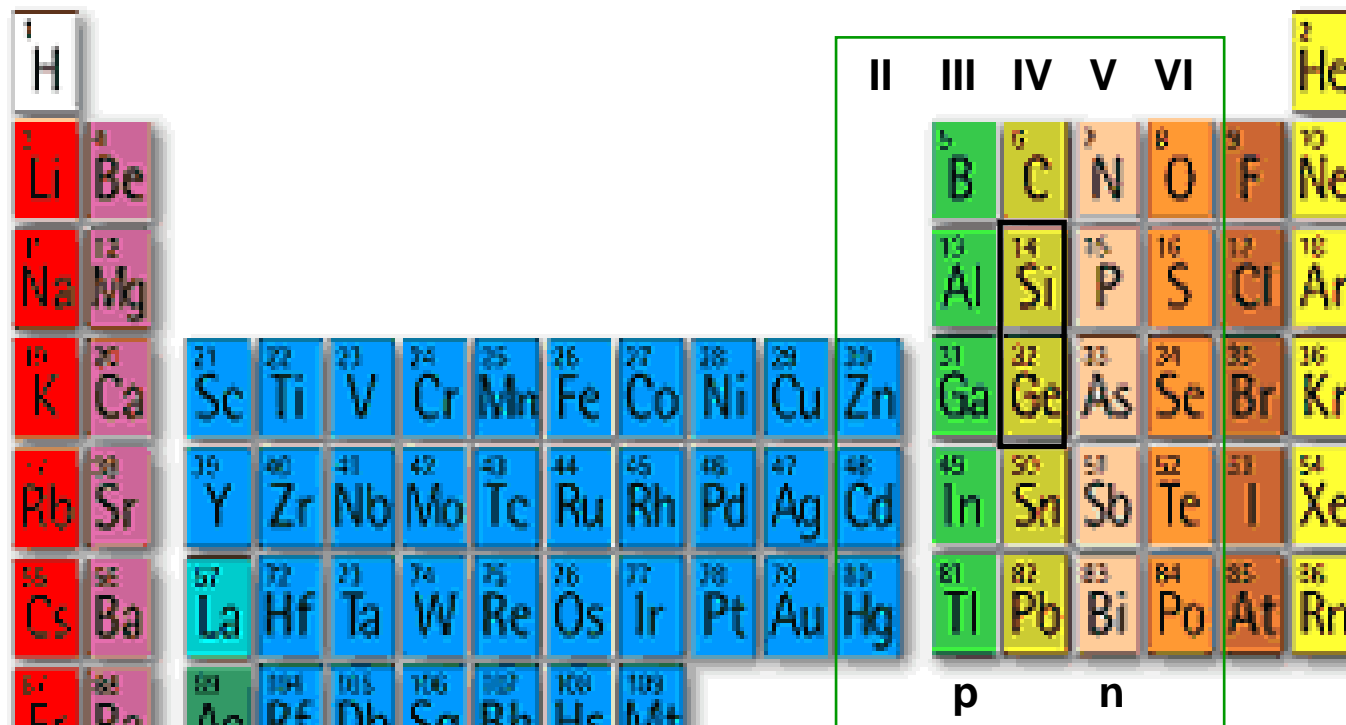
Semiconductores extrínsecos

Los **semiconductores extrínsecos** se forman añadiendo *pequeñas* cantidades de *impurezas* a los semiconductores *puros*. El objetivo es modificar su comportamiento eléctrico al alterar la densidad de portadores de carga *libres*.

Estas impurezas se llaman **dopantes**. Así, podemos hablar de semiconductores **dopados**.

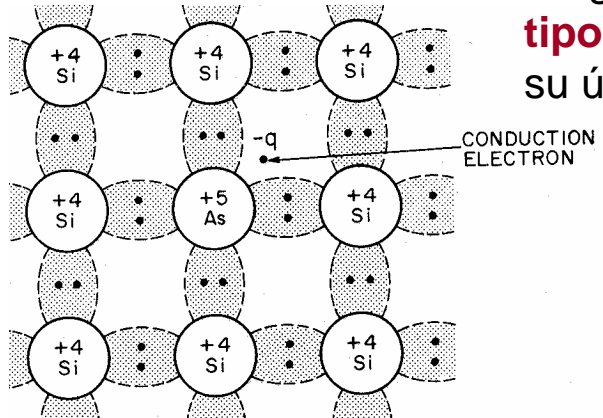
En función del tipo de dopante, obtendremos semiconductores dopados **tipo p** o **tipo n**.

Para el silicio, son dopantes de tipo n los elementos de la columna V, y tipo p los de la III

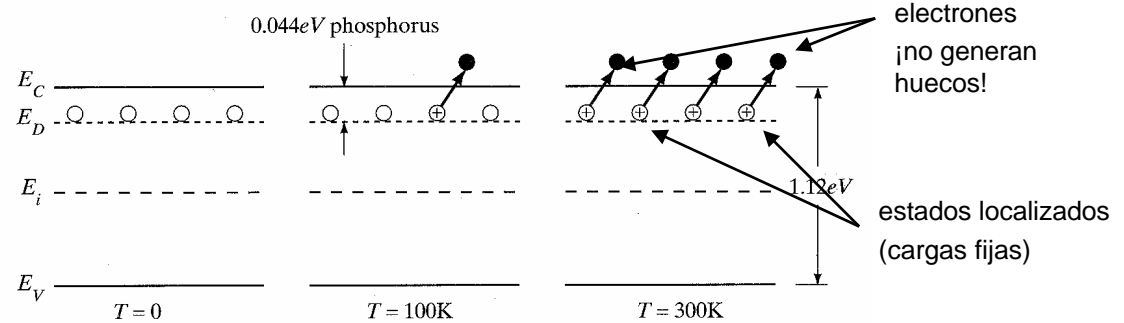


Semiconductores tipo n y tipo p

Tipo n

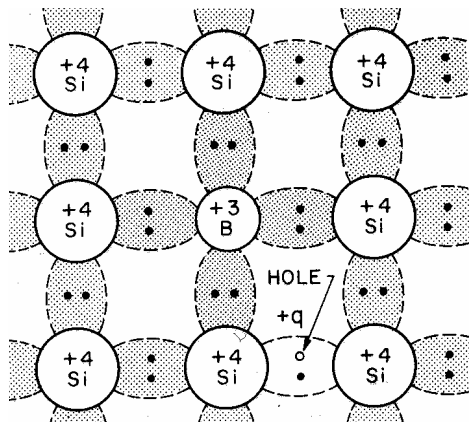


En general, los elementos de la columna V convierten al Si en **tipo n**. Estos elementos tienen cinco electrones de valencia en su última capa y se les llama **impurezas dadoras**.

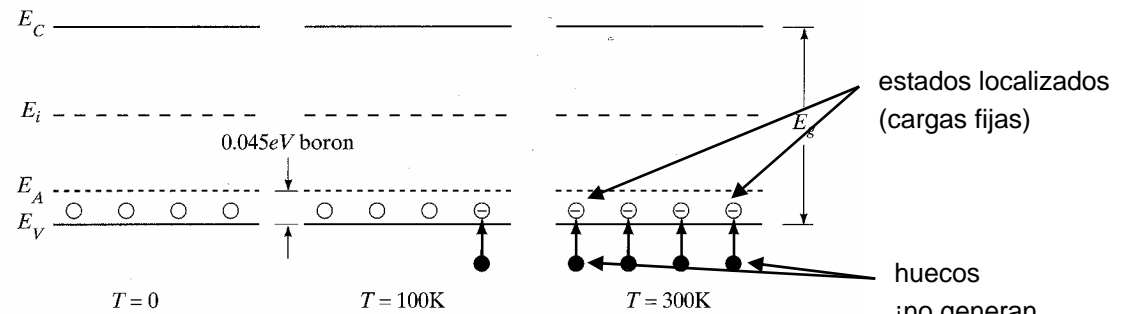


ionización completa

Tipo p



En general, los elementos de la columna III convierten al Si en **tipo p**. Estos elementos tienen tres electrones de valencia en su última capa y se les llama **impurezasceptoras**.



ionización completa

Densidad de portadores en semiconductores extrínsecos

En los semiconductores **tipo n**, los **electrones** son los **portadores mayoritarios**.

En los semiconductores **tipo p**, los **huecos** son los **portadores mayoritarios**.

La ley de acción de masas se cumple para semiconductores extrínsecos, en equilibrio térmico

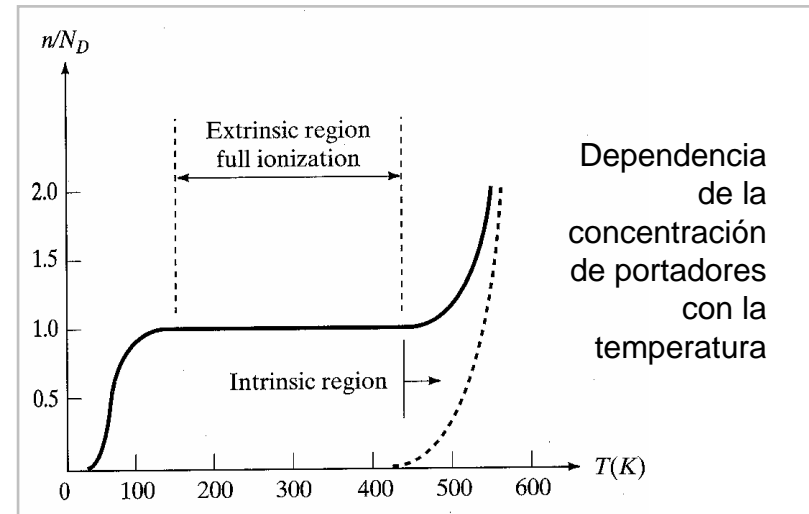
$$N_C, N_V = \text{ctes.} \rightarrow n_0 \cdot p_0 = n_i^2 \quad [15]$$

Para cumplir la neutralidad de la carga:

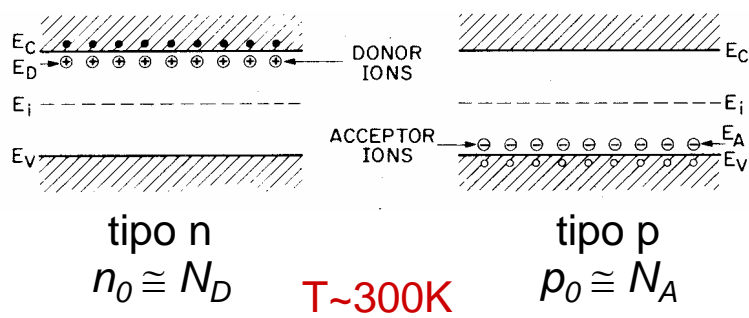
$$q(n_0 + N_A^-) = q(p_0 + N_D^+) \quad [16]$$

De ambas:

$$n_0 = \frac{N_D - N_A}{2} + \left[\left(\frac{N_D - N_A}{2} \right)^2 + n_i^2 \right]^{1/2} \quad [17]$$



Condición de ionización completa



Para un semiconductor tipo n, $N_D \gg N_A$, y $N_D \gg n_i$:

$$n_0 \cong N_D \quad y \quad p_0 \cong \frac{n_i^2}{N_D} \quad [18]$$

Para un semiconductor tipo p, $N_A \gg N_D$, y $N_A \gg n_i$:

$$p_0 \cong N_A \quad y \quad n_0 \cong \frac{n_i^2}{N_A} \quad [19]$$

Nivel de Fermi en semiconductores extrínsecos

Nivel de Fermi

y

densidad de portadores

De las ecuaciones [7] y [8]:

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) = n_0 \quad [20]$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) = p_0 \quad [21]$$

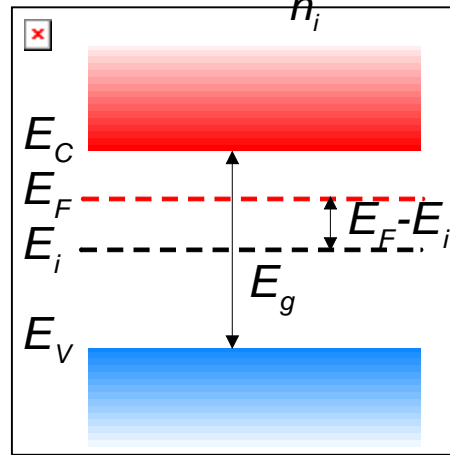
cambiando: $n, p \leftrightarrow n_i$
 $E_F \leftrightarrow E_i$

desde otro punto de vista ...

<http://jas2.eng.buffalo.edu/applets/education/semicon/fermi/levelAndDOS/index.html>

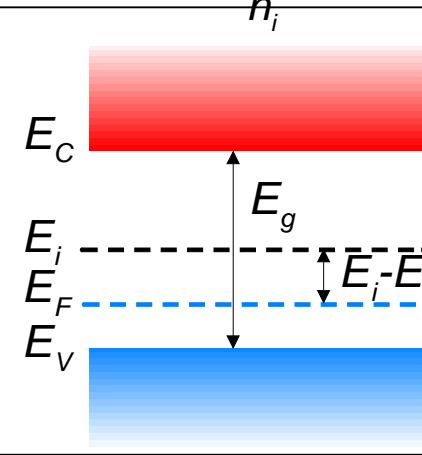
semiconductor tipo n [22]

$$E_F - E_i = kT \ln \frac{n_0}{n_i} \cong kT \ln \frac{N_D}{n_i}$$

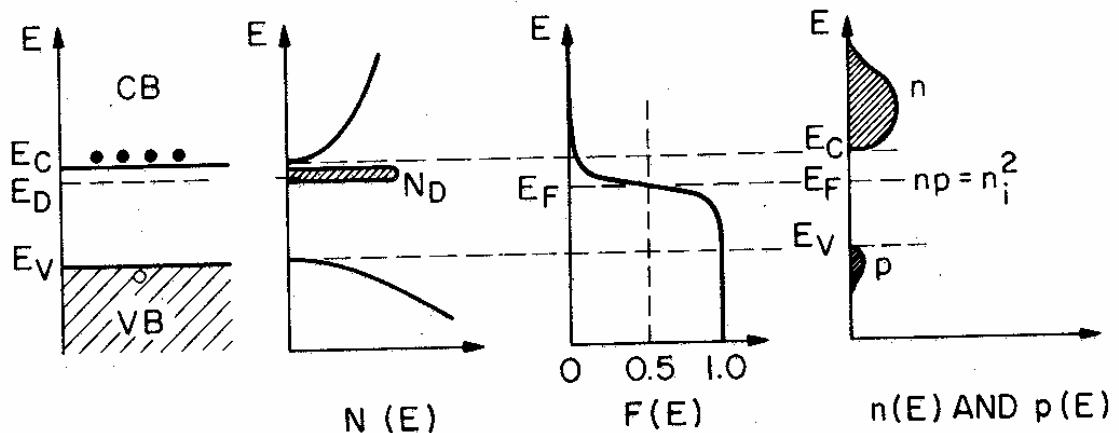


semiconductor tipo p [23]

$$E_i - E_F = kT \ln \frac{p_0}{n_i} \cong kT \ln \frac{N_A}{n_i}$$



<http://jas2.eng.buffalo.edu/applets/education/semicon/fermi/bandAndLevel/fermi.html>



Ejemplo

Sea una muestra de silicio a 300K.

a) Calcule la densidad de portadores intrínsecos.

b) Calcule la densidad de electrones y huecos si se dopa con fósforo en una concentración de 10^{17} cm^{-3} .

c) Calcule la posición de los niveles de Fermi intrínseco y extrínseco.

a) Utilizando la ecuación [9]:

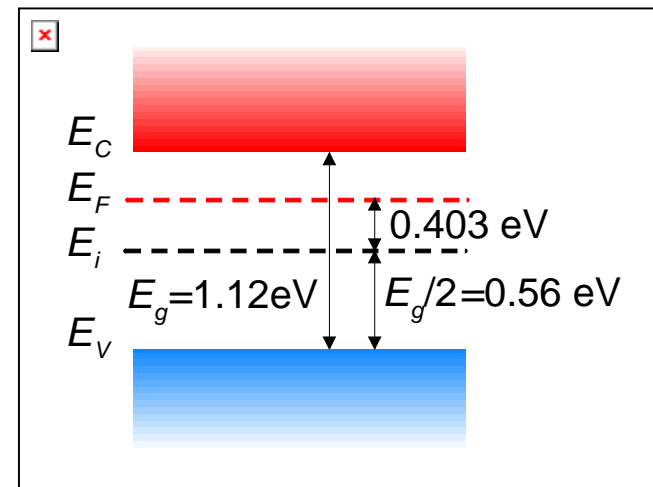
$$n_i^2 = N_C N_V e^{-\frac{E_g}{kT}} = 3.22 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \times 1.83 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \times e^{-\frac{1.12 \text{ eV}}{86.2 \cdot 10^{-6} \mu\text{eV} \cdot \text{K}^{-1} \times 300 \text{ K}}} \rightarrow n_i \cong 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

b) El P dopa el Si tipo n. A 300 K, habrá ionización completa \rightarrow se da: $N_D \gg n_i$ ($10^{17} \gg 10^{10}$).

$$n_0 \cong N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad ; \quad p_0 \cong \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(10^{10} \text{ cm}^{-3})^2}{10^{17} \text{ cm}^{-3}} = 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

c) El nivel de Fermi intrínseco se localizará en el centro de la banda prohibida. El extrínseco:

$$\begin{aligned} E_F - E_i &= kT \ln \frac{n_0}{n_i} \cong kT \ln \frac{N_D}{n_i} \\ &= 86.2 \mu\text{eV} \cdot \text{K}^{-1} \times 300 \text{ K} \times \ln \frac{10^{17}}{10^{10}} \\ &= 0.025 \text{ eV} \times \ln \frac{10^{17}}{10^{10}} = 0.403 \text{ eV} \end{aligned}$$



Hoja de datos 2.1

En fermiones:

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1}$$

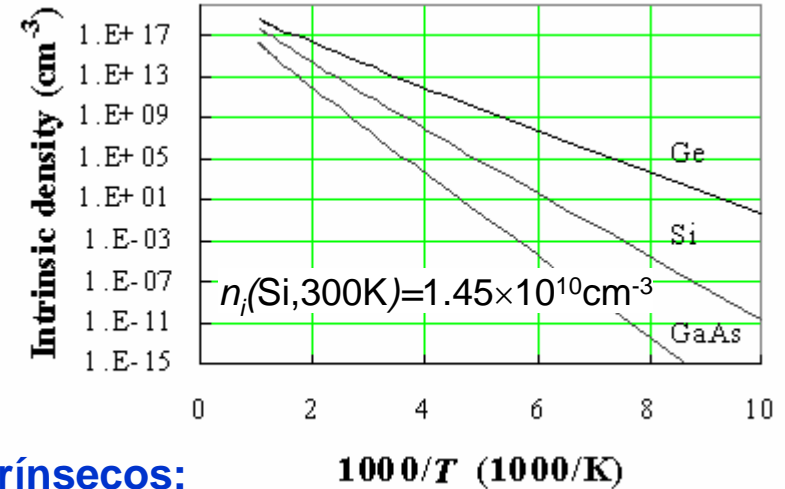
En semiconductores intrínsecos:

$$E_i = E_V + \frac{E_g}{2} - \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_n^*}{m_p^*} \right)$$

$$n \cdot p = n_i^2$$

Densidades efectivas de estado

semiconductor	N_C (cm ⁻³)	N_V (cm ⁻³)	E_g (eV)
Si	3.22×10^{19}	1.83×10^{19}	1.12
Ge	1.03×10^{19}	5.35×10^{18}	0.66
GaAs	4.21×10^{17}	9.52×10^{18}	1.42



En semiconductores extrínsecos:

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

semiconductor **tipo n**

$$E_F - E_i = kT \ln \frac{n_0}{n_i} \cong kT \ln \frac{N_D}{n_i}$$

$$n_0 \cong N_D \quad \text{y} \quad p_0 \cong \frac{n_i^2}{N_D}$$

semiconductor **tipo p**

$$E_i - E_F = kT \ln \frac{p_0}{n_i} \cong kT \ln \frac{N_A}{n_i}$$

$$p_0 \cong N_A \quad \text{y} \quad n_0 \cong \frac{n_i^2}{N_A}$$

Tema 3: Técnicas de dopado

Bibliografía diversa

Varias técnicas:

- Durante el crecimiento
- Difusión
- Implantación iónica

Estudiaremos:

- Aplicaciones
- Sistemas/métodos/tecnologías
- Teoría
- Ejemplos