

Física básica para entender los dispositivos

Dispostivos Semiconductores

Maestría en Ciencias de la Ingeniería

Universidad de Buenos Aires, Falcultad de Ingeniería

Docentes a cargo: **M. G. González y S. H. Carbonetto**



1 Bandas de energía en Silicio

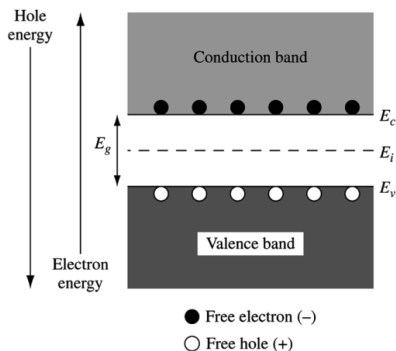
- Banda prohibida
- Densidad de estados
- Nivel de Fermi
- Concentración de portadores

2 Semiconductor extrínseco

- Donores y aceptores
- Nivel de Fermi en silicio extrínseco
- Silicio dopado degeneradamente

Banda Prohibida

Una de las aplicaciones más importantes de la mecánica cuántica en este rubro es el modelo del comportamiento de los electrones en un sólido en el que las energías “admitidas” están **agrupadas en bandas**.



BC: Banda de Conducción; BV: Banda de Valencia.

Propiedades interesantes de materiales usados en CI

Physical properties of Si and SiO₂ at room temperature (300 K)

Property	Si	SiO ₂
Atomic/molecular weight	28.09	60.08
Atoms or molecules/cm ³	5.0×10^{22}	2.3×10^{22}
Density (g/cm ³)	2.33	2.27
Crystal structure	Diamond	Amorphous
Lattice constant (Å)	5.43	—
Energy gap (eV)	1.12	8–9
Dielectric constant	11.7	3.9
Intrinsic carrier concentration (cm ⁻³)	1.0×10^{10}	—
Carrier mobility (cm ² /V-s)	Electron: 1,430 Hole: 480	—
Effective density of states (cm ⁻³)	Conduction band, N_c : 2.9×10^{19} Valence band, N_v : 3.1×10^{19}	—
Breakdown field (V/cm)	3×10^5	$>10^7$
Melting point (°C)	1,415	1600–1700
Thermal conductivity (W/cm-°C)	1.5	0.014
Specific heat (J/g-°C)	0.7	1.0
Thermal diffusivity (cm ² /s)	0.9	0.006
Thermal expansion coefficient (°C ⁻¹)	2.5×10^{-6}	0.5×10^{-6}

Densidad de estados

Para el caso de un **pozo infinito** de energía potencial, el número de estados cuánticos por unidad de volumen entre la energía E y $E + dE$:

$$g(E) dE = \frac{8\pi\sqrt{2}}{h^3} m^{3/2} \sqrt{E} dE \quad (1)$$

¿Cómo aprovechar la ec. 1 que refiere solo a partículas libres sujetas a choques instantáneos?

Teniendo en cuenta:

- el concepto de **masa efectiva**;
- la E vs p al comienzo de la BC puede ajustarse a una parábola;
- no hay estados permitidos en la banda prohibida;
- la oblea de silicio (Si) es cortada en la dirección $\langle 100 \rangle$;

$$g_c(E) dE = \frac{8\pi\sqrt{2}g_n}{h^3} \sqrt{m_{nt}^*{}^2 m_{nl}^*} \sqrt{E - E_c} dE \quad (2)$$

Lo mismo se puede hacer para los huecos en la BV:

$$g_v(E) dE = \frac{8\pi\sqrt{2}g_p}{h^3} \sqrt{m_{pt}^*{}^2 m_{pl}^*} \sqrt{E_v - E} dE \quad (3)$$

Para simplificar es usual considerar $m_t = m_l$ y $g_n = g_p = 1$, quedando las siguientes ecuaciones:

$$g_c(E) dE = \frac{8\pi\sqrt{2}}{h^3} m_n^{*3/2} \sqrt{E - E_c} dE \quad (4)$$

$$g_v(E) dE = \frac{8\pi\sqrt{2}}{h^3} m_p^{*3/2} \sqrt{E_v - E} dE \quad (5)$$

Nivel de Fermi

En metales (M) y semiconductores (SC), la probabilidad de ocupación de un estado de energía en la BC está determinado por la función de **distribución de Fermi-Dirac**:

$$f_D(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - E_f)/kT]} \quad (6)$$

En silicio, a $T = 300$ K, $E_f \approx E_g/2$.

Esto implica que en la BC, $E - E_f \gg kT \approx E_g/40$. Por lo tanto, la ec. 6 puede **aproximarse a la distribución de Boltzmann**:

$$f_D(E) \approx \exp[-(E - E_f)/kT] \quad \text{para } E > E_c \quad (7)$$

Lo mismo se puede hacer para los huecos en la BV:

$$f_D(E) \approx 1 - \exp[-(E_f - E)/kT] \quad \text{para } E < E_v \quad (8)$$

El nivel de Fermi juega un rol esencial en la caracterización del **estado de equilibrio de un sistema**:

Cuando dos sistemas están en equilibrio termodinámico (ETD), sus E_f deben ser iguales.

Por ejemplo, para una región continua compuesta por metales y semiconductores en contacto, el E_f en ETD es espacialmente constante a lo largo de toda la región.

Concentración de portadores

Las densidades de e^- en la BC y de h^+ en la BV en ETD:

$$n_o = \int_{E_c}^{+\infty} g_c(E) f_D(E) dE \quad (9)$$

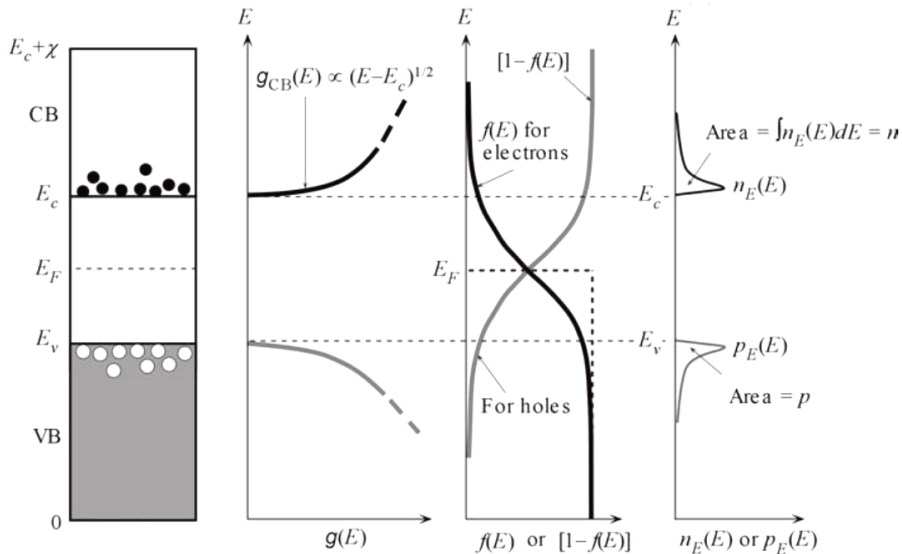
$$p_o = \int_{-\infty}^{E_v} g_v(E) [1 - f_D(E)] dE \quad (10)$$

Usando las ecuaciones 4, 5, 7,8,

$$n_o = 2 \left(\frac{2\pi kT m_n^*}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{E_c - E_f}{kT} \right] = N_c \exp \left[-\frac{E_c - E_f}{kT} \right] \quad (11)$$

$$p_o = 2 \left(\frac{2\pi kT m_p^*}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{E_f - E_v}{kT} \right] = N_v \exp \left[-\frac{E_f - E_v}{kT} \right] \quad (12)$$

$g(E)$, $f_D(E)$, $n(E)$ y $p(E)$



Parámetros intrínsecos

En una oblea de **silicio intrínseco** (puro) en ETD, $n_o = p_o = n_i$, entonces, a partir de las ecs. 11 y 12, se puede obtener una expresión del E_f :

$$E_{f_i} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_v}{N_c} \right) \quad (13)$$

Reemplazando la ec. 13 en la ec. 11, se puede determinar la **concentración intrínseca**:

$$n_i = \sqrt{N_v N_c} \exp \left[-\frac{E_c - E_v}{2kT} \right] = \sqrt{N_v N_c} \exp \left[-\frac{E_g}{2kT} \right] \quad (14)$$

Se puede apreciar que n_i depende solo de T y de los parámetros que definen al material SC.

Por otro lado, dado que $N_c \approx N_v$, se puede considerar $E_{f_i} \approx E_g/2$.

Si $E_c \gg E_f$ y $E_v \ll E_f$, las concentraciones n_o y p_o se pueden escribir en función de de las variable intrínsecas E_{fi} y n_i :

$$n_o = n_i \exp \left[\frac{E_f - E_{fi}}{kT} \right] \quad (15)$$

$$p_o = n_i \exp \left[\frac{E_{fi} - E_f}{kT} \right] \quad (16)$$

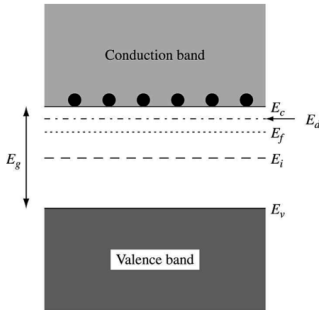
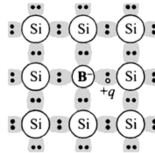
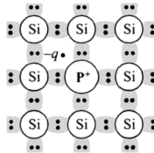
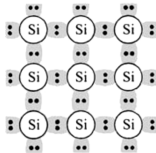
A partir de las ecs. 15 y 16 se obtiene:

Ley de acción de masas

$$n_i^2 = n_o p_o \quad (17)$$

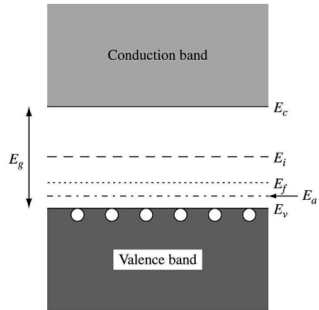
que es independiente de la concentración de impurezas en el SC

Silicio tipo N y tipo P



● Free electron (-)

(a) n-type



○ Free hole (+)

(b) p-type

Para un material **tipo N** se debe seguir cumpliendo la **neutralidad de carga** en toda la oblea:

$$n_o = N_d^+ + p_o \quad (18)$$

$$N_d^+ = N_d [1 - f_D(E_d)] = N_d \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \exp [(E_d - E_f) / kT]} \right) \quad (19)$$

El $1/2$ surge por la degeneración de espín. Reemplazando 11, 12 y 19 en 18 y considerando:

- $N_d^+ = N_d \quad (E_f < E_d)$
- $N_d^+ \gg p_o \quad (p_o = n_i^2 / N_d \quad \text{con } N_d = 10^{13} - 10^{17} \text{ cm}^{-3})$
- $(N_d / N_c) \exp [(E_c - E_f) / kT] \ll 1$

Se llega a la siguiente expresión:

$$E_c - E_f = kT \ln (N_c / N_d) \quad (20)$$

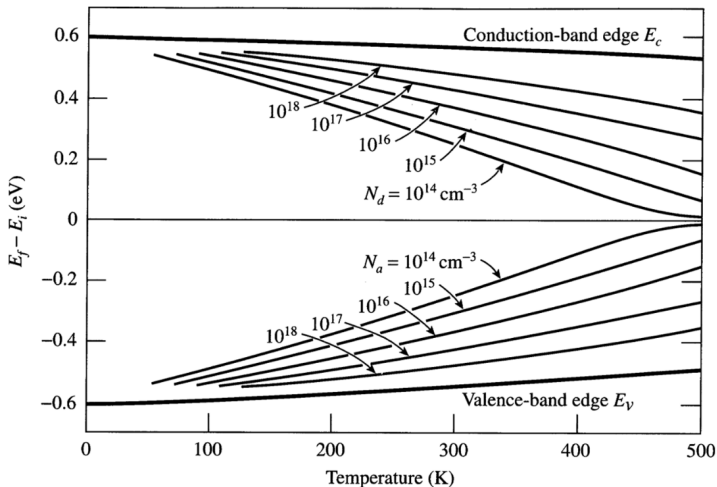
El mismo procedimiento se puede hacer para el **tipo P**:

$$E_f - E_v = kT \ln (N_v / N_a) \quad (21)$$

Las ecs. 20 y 21 se pueden dejar en función de los parámetros intrínsecos usando las ecs. 13 y 14

$$E_f - E_{f_i} = kT \ln (N_d/n_i) \quad (22)$$

$$E_{f_i} - E_f = kT \ln (N_a/n_i) \quad (23)$$



Para obtener el valor de las concentraciones n_o y p_o para un SC extrínseco, se usa la **condición de neutralidad eléctrica**:

$$p_o - n_o + N_d^+ - N_a^- = 0$$

La ecuación anterior se hace más sencilla si se supone que $N_d^+ = N_d$, $N_a^- = N_a$.

Para el caso **tipo N** ($N_d > N_a$) y usando la ec. 17:

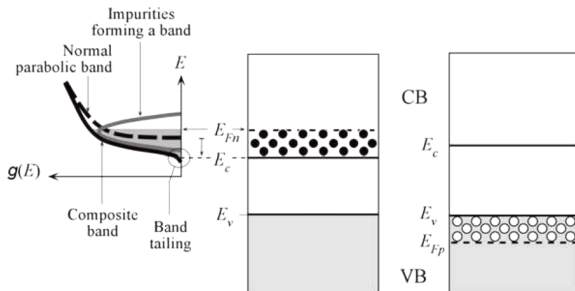
$$n_o = \frac{1}{2} (N_d - N_a) + \sqrt{\frac{1}{4} (N_d - N_a)^2 + n_i^2}$$
$$p_o = \frac{n_i^2}{n_o}$$

Por otro lado, para el caso **tipo P** ($N_a > N_d$):

$$p_o = -\frac{1}{2} (N_d - N_a) + \sqrt{\frac{1}{4} (N_d - N_a)^2 + n_i^2}$$
$$n_o = \frac{n_i^2}{p_o}$$

Silicio dopado degeneradamente

- Cuando $N_{d,a} \geq N_{c,v}$ tal que $E_f \geq E_c$ o $E_f \leq E_v$ se dice que el silicio está **degenerado**.
- Para estos casos, **la aproximación de Boltzmann no es válida** y obtener una expresión analítica para la concentraciones de portadores se vuelve difícil.
- **La banda prohibida se angosta** dado que el nivel de impurezas se ensancha y forma una banda hasta el punto de unirse con la BC o BV, según el caso.



- En muchos casos, se puede suponer $E_f \approx E_c$ (para n^+) o $E_f \approx E_v$ (para p^+)