

* 평형상태(平衡狀態, equilibrium state)

- 어떤 물리적 시스템이 외부로부터 電界(electric field), 磁界(magnetic field), 또는 온도 등과 같은 물리적 교란을 받지 않는 상태
- 특히, 열에 의한 교란이 없는 평형상태를 열평형상태(熱평형상태, thermal equilibrium state)라고 함

* 평형상태의 반도체

- 평형상태의 반도체란 열평형상태에 있는 반도체를 의미
- 반도체 내에서 carrier의 증가를 가져오는 현상(즉, thermal generation 등)과 carrier의 감소를 가져오는 현상(즉, recombination 등)이 같은 비율로 발생하여 종합적으로 볼 때, carrier(electron과 hole)의 개수가 일정하게 유지되고 있는 상태

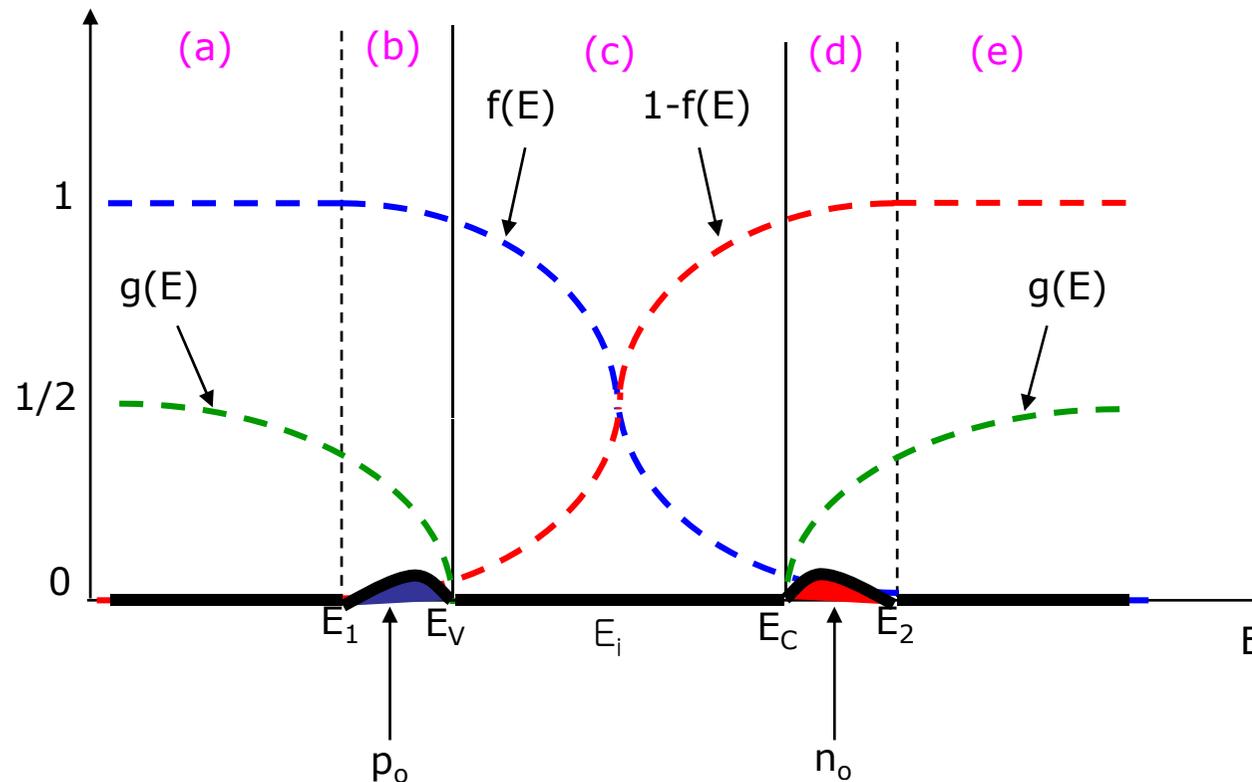
4.1 반도체의 전하 캐리어

4.1.1 평형상태의 전자와 정공 분포

band	energy 구간	f(E) 또는 1-f(E)	g(E)	f(E)g(E) 또는 [1-f(E)]g(E)	위치	carrier
C.B.	$E_2 < E$	0	$\neq 0$	0	(e)	
	$E_C < E < E_2$	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	(d)	electron
F.B.	$E_V < E < E_C$	$\neq 0$	0	0	(c)	
V.B.	$E_1 < E < E_V$	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	(b)	hole
	$E < E_1$	0	$\neq 0$	0	(a)	

➤ 그래프적 표현

$f(E) g(E)$ 또는 $[1 - f(E)] g(E)$



➤ 수식적 표현

C.B.에서
$$n_o = \int_{E_c}^{\infty} f(E) g(E) dE$$

V.B.에서
$$p_o = \int_{-\infty}^{E_v} [1 - f(E)] g(E) dE$$

4.1.2 n_0 와 p_0 방정식

(1) n_0 : conduction band 내의 electron concentration(농도)

$$n_0 = \int_{E_C}^{\infty} f(E) g(E) dE$$

- N_C (effective density of states of electron in C.B.)

C.B.의 edge 근처에서 $g(E)$ 함수의 효과를 electron에 관해서 등가적으로 표현한 양으로 C.B. 내에서 electron의 '유효상태밀도'라고 한다.

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (\text{Si, } 300^\circ\text{K, } N_C \approx 2.86 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3})$$

- N_C 를 이용한 n_0 의 계산

$$n_0 = \int_{E_C}^{\infty} f(E) g(E) dE = f(E_C) N_C$$

$$\therefore n_0 = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_C}{kT}\right) \quad [\text{cm}^{-3}]$$

(2) p_0 : valence band 내의 hole concentration

$$p_0 = \int_{-\infty}^{E_V} [1 - f(E)] g(E) dE$$

- N_V (effective density of states of hole in V.B.)

V.B.의 edge 근처에서 $g(E)$ 함수의 효과를 hole에 관해서 등가적으로 표현한 양으로 V.B. 내에서 hole의 '유효상태밀도'라고 한다.

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (\text{Si, } 300^\circ\text{K, } N_V \approx 1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3})$$

- N_V 를 이용한 p_0 의 계산

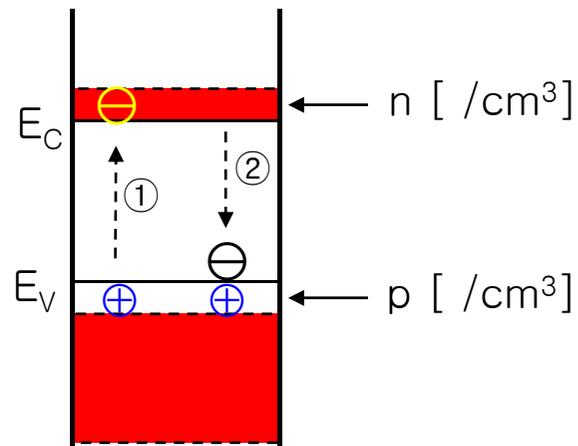
$$p_0 = \int_{-\infty}^{E_V} [1 - f(E)] g(E) dE = [1 - f(E_V)] N_V$$

$$\therefore p_0 = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right) \quad [\text{cm}^{-3}]$$

4.1.3 진성 캐리어(intrinsic carrier) 농도

➤ intrinsic conduction(진성 반도체)

불순물(impurity)이나 결정격자의 결함이 전혀 없이 완전한 결정을 이루고 있는 반도체 재료



$T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$

① EHP의 생성(generation) : $g_i(T)$

② EHP의 소멸(recombination) : $r_i(T)$

평형상태에서 $g_i = r_i$ 이므로 n, p 는 일정

➤ n_i : intrinsic carrier concentration(진성 캐리어 농도)

EHP는 항상 쌍으로 생성되고 쌍으로 재결합하므로 n 과 p 는 항상 같음

$$n_0 = p_0 = n_i$$

- intrinsic Fermi level(진성 페르미 준위) : intrinsic 반도체의 Fermi level

$$E_F \equiv E_{Fi}, \text{ 또는 } E_i$$

- intrinsic carrier concentration의 계산

intrinsic semiconductor에서 항상 $E_F = E_i$ 이므로

$$n_0 = N_C \exp\left(\frac{E_i - E_C}{kT}\right) = n_i \quad p_0 = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_i}{kT}\right) = n_i$$

$$n_0 p_0 = N_C \exp\left(\frac{E_i - E_C}{kT}\right) N_V \exp\left(\frac{E_V - E_i}{kT}\right)$$

$$= N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

$$\equiv n_i^2$$

$$\therefore n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

Si, 300°K일 때, $n_i \cong 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

<표 4.2(p.110), 그림 4.2(p.111) 참조>

4.1.4 진성 Fermi level 위치

intrinsic semiconductor의 경우, 항상 $n_0 = p_0 = n_i$ 이므로

$$n_0 = N_C \exp\left[-\frac{(E_C - E_i)}{kT}\right] = n_i, \quad p_0 = N_V \exp\left[-\frac{(E_i - E_V)}{kT}\right] = n_i$$

에서

$$N_C \exp\left[-\frac{(E_C - E_i)}{kT}\right] = N_V \exp\left[-\frac{(E_i - E_V)}{kT}\right]$$

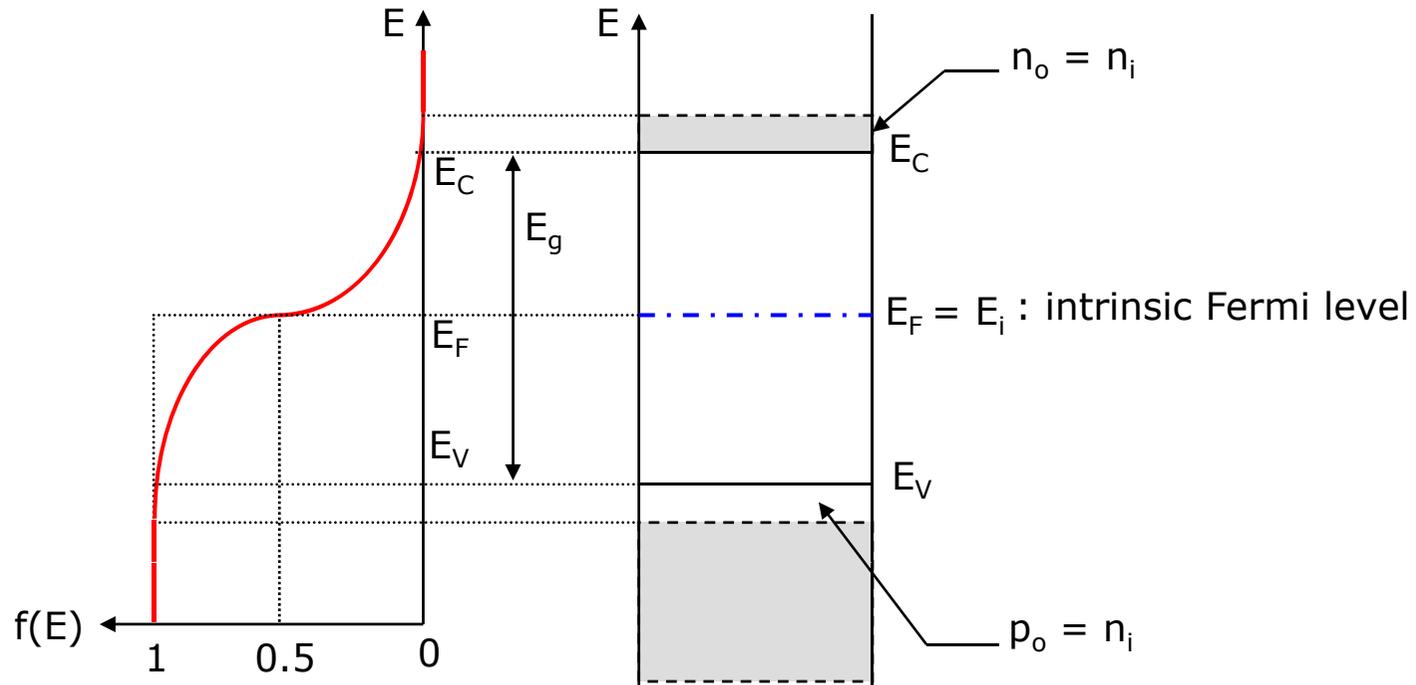
따라서

$$\begin{aligned} E_i &= \frac{1}{2}(E_C + E_V) + \frac{1}{2}kT \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) \\ &= \frac{1}{2}(E_C + E_V) + \frac{3}{4}kT \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right) \end{aligned}$$

표 4.1(p.108)를 이용하면

$$E_i \cong \frac{1}{2}(E_C + E_V) \Rightarrow \text{거의 } \mathbf{energy\ gap} \text{의 중앙에 위치}$$

4 장 평형상태의 반도체



✓ **carrier** 농도 표기 방식에 관한 정리

(1) n, p

n (electron concentration) : 반도체의 단위 cm^3 당 전자의 개수

p (hole concentration) : 반도체의 단위 cm^3 당 hole의 개수

를 나타내는 일반적인 표시이며, 그 단위는

[개/ cm^3], [$/\text{cm}^3$], [개 cm^{-3}], [cm^{-3}]

등으로 표기

(2) n_i (intrinsic carrier concentration)

intrinsic 반도체의 단위 cm^3 당 carrier(electron 또는 hole)의 개수

<예> Si, 300°K 일 때, $n_i \cong 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

(3) n_0, p_0 (equilibrium electron 또는 hole concentration)

평형(equilibrium)상태일 때 반도체의 단위 cm^3 당 electron 또는 hole의 개수