

4.2 Dopant 원자와 energy 준위

✓ 外因性 반도체(extrinsic semiconductor)

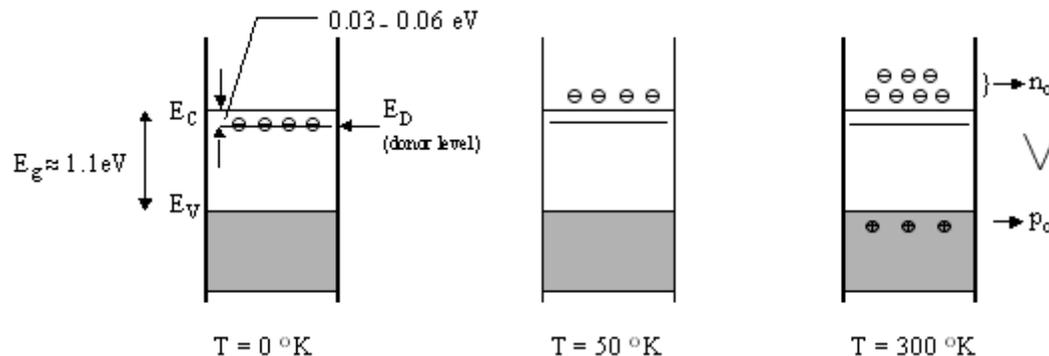
intrinsic semiconductor에 소량의 불순물(impurity 또는 dopant)을 첨가한 반도체로서 첨가된 불순물의 종류에 따라 n-type과 p-type의 두 종류로 나뉜다.

✓ doping, dopant

- ① doping : intrinsic semiconductor에 불순물을 첨가하는 것
- ② dopant : 반도체에 의도적으로 첨가되는 불순물

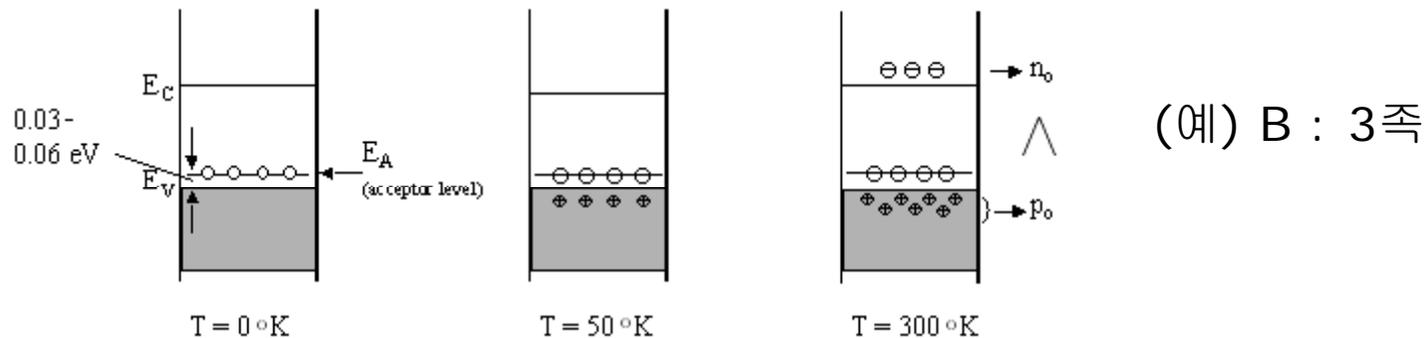
✓ impurity의 종류와 특성

- ① donor : intrinsic semiconductor에 electron을 공급함으로써 평형상태에서 $n_0 > p_0$ 가 되게 하는 불순물, N_D [cm^{-3}]



(예) P, As : 5족

- ② acceptor : intrinsic semiconductor에 hole을 공급함으로써 평형상태에서 $n_0 < p_0$ 가 되게 하는 불순물, N_A [cm^{-3}]



- ✓ extrinsic semiconductor의 경우 : $n_0 > p_0$ 또는 $n_0 < p_0$ 이므로 항상 $n_0 \neq p_0$
- ✓ impurity 종류에 따른 반도체 type의 분류

impurity 명칭	반도체 type	carrier 명칭
donor (n-type 불순물)	n-type	electron : majority hole : minority
acceptor (p-type 불순물)	p-type	electron : minority hole : majority

4.3 외인성 반도체

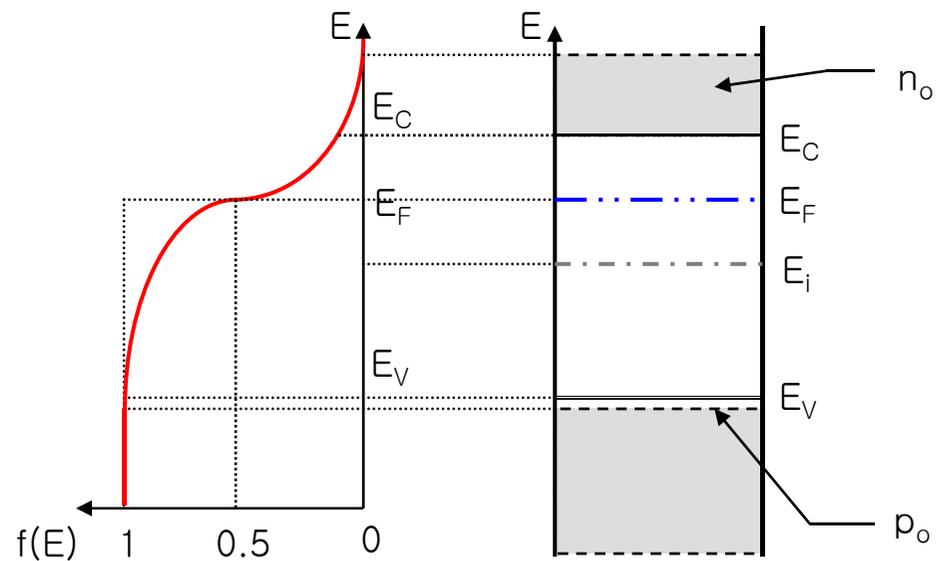
4.3.1 전자와 정공의 평형상태 분포

(1) 반도체 type에 따른 Fermi level의 위치

① n-type의 경우

$n_0 > p_0$ 이므로 $f(E)$ 의 그래프는 E_C 위에 걸쳐있는 부분이 E_V 아래에 걸쳐있는 부분보다 커야 한다. 따라서 $f(E)$ 는 intrinsic 경우보다 위로 올라가야 한다.

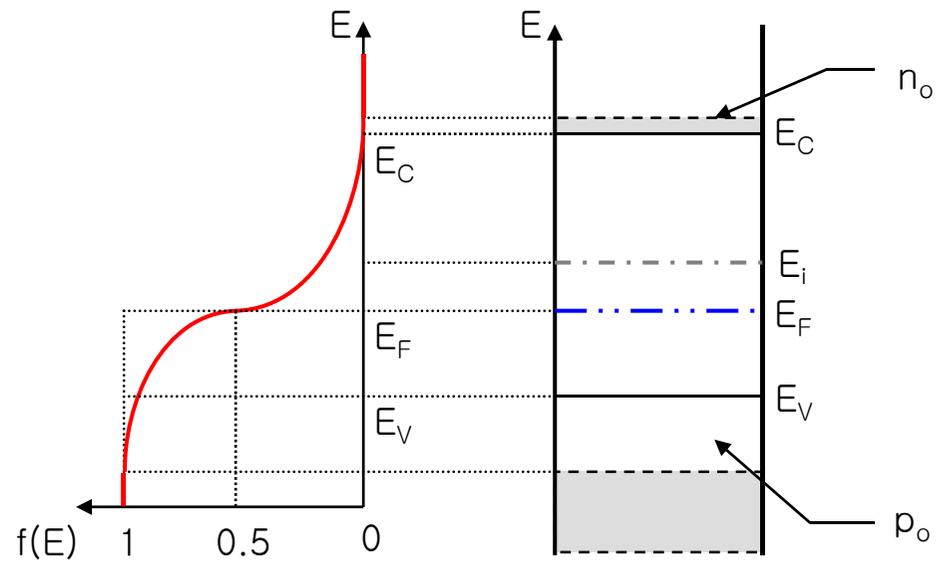
$$E_i < E_F < E_C$$



② p-type의 경우

$n_0 < p_0$ 이므로 $f(E)$ 의 그래프는 E_C 위에 걸쳐있는 부분이 E_V 아래에 걸쳐있는 부분보다 작아야 한다. 따라서 $f(E)$ 는 intrinsic 경우보다 아래로 내려가야 한다.

$$E_V < E_F < E_i$$



(2) Extrinsic 반도체의 carrier 농도

① electron 농도 : $n_0 = N_C \exp\left[-\frac{(E_C - E_F)}{kT}\right]$

② hole 농도 : $p_0 = N_V \exp\left[-\frac{(E_F - E_V)}{kT}\right]$

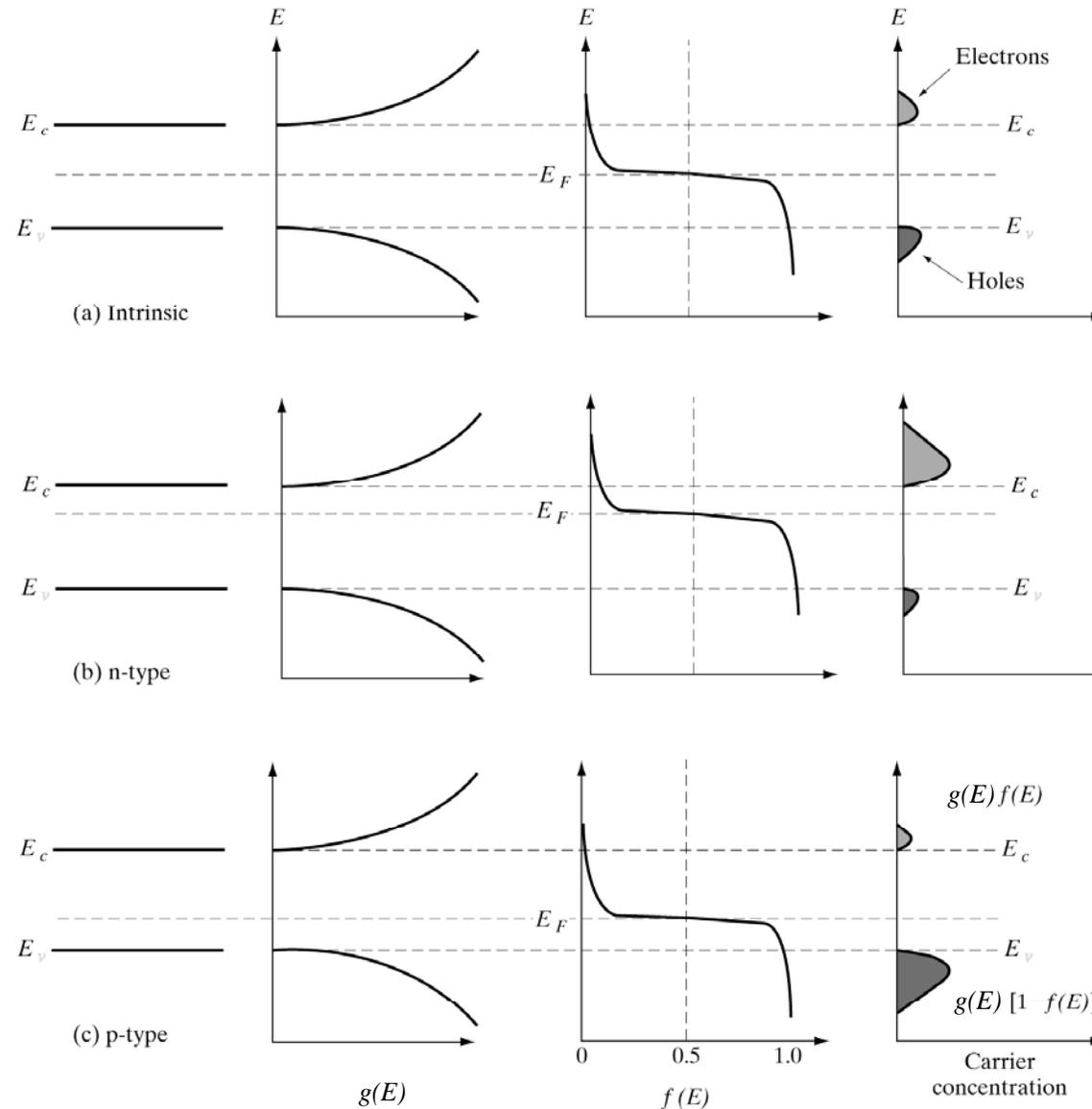
4.3.2 $n_0 p_0$ 곱 : Mass-Action Law

$$\begin{aligned} n_0 p_0 &= N_C \exp\left(\frac{E_F - E_C}{kT}\right) N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right) \\ &= N_C N_V \exp\left(\frac{E_V - E_C}{kT}\right) = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_C - E_V}{kT}\right) \\ &= N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \\ &\equiv n_i^2 \end{aligned}$$

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

4 장 평형상태의 반도체

✓ 반도체 type에 따른 energy band diagram, $g(E)$, $f(E)$, carrier 농도 종합



4.5 전하 중성(Charge Neutrality)

4.5.1 보상(補償, compensation) 반도체

intrinsic semiconductor에 N_A 와 N_D 를 동시에 doping한 경우,
많이 들어간 impurity가 그 반도체의 성질을 결정

불순물 농도	type
$N_D > N_A$	n-type
$N_D = N_A$	intrinsic
$N_D < N_A$	p-type

4.5.2 열평형상태의 전자 및 정공 농도

(1) Space Charge Neutrality(空間 電荷 中性의 성질)

일반적으로, 반도체 재료 내에서

- p_0 : 평형상태의 hole 농도(+charge)
- n_0 : 평형상태의 electron 농도(-charge)
- N_A^- : 평형상태의 ionized acceptor 농도(-charge)
- N_D^+ : 평형상태의 ionized donor 농도(+charge)

일 때, 항상

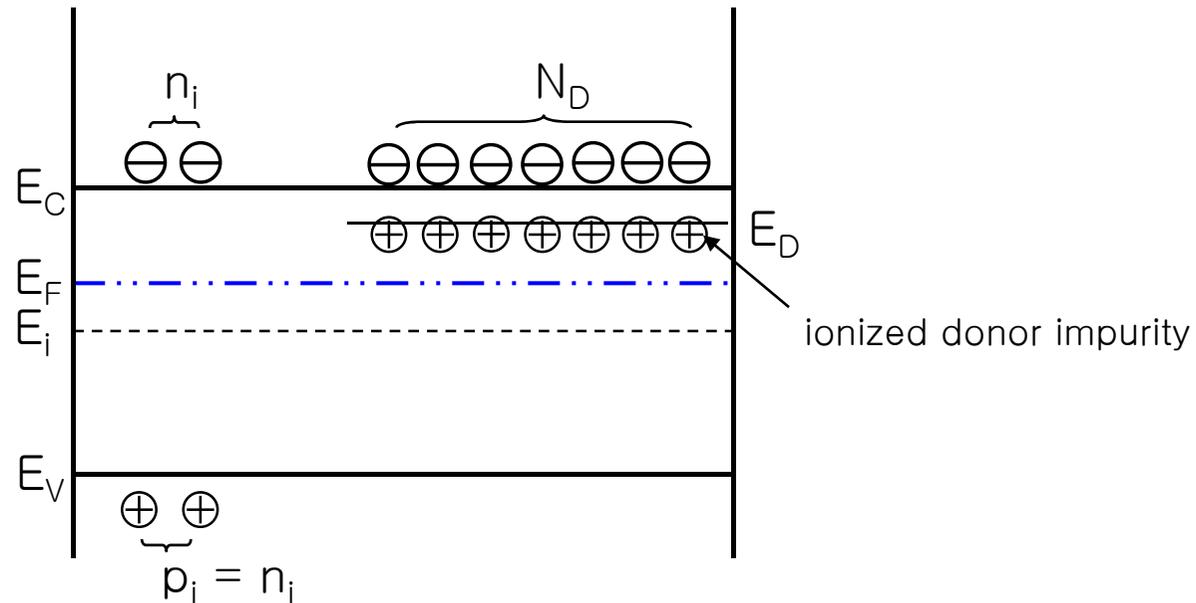
$$p_0 + N_D^+ = n_0 + N_A^- \quad : \text{전체적으로 中性}$$

(2) extrinsic semiconductor의 carrier 농도에 관한 간편한 계산법

① n-type의 경우(donor 농도 : N_D)

상온에서 $N_D \rightarrow N_D^+ + e^-$ (N_D 개의 electron)

즉, N_D 개의 donor로부터 N_D 개의 전자가 나옴



따라서

$$n_0 = n_i + N_D \cong N_D$$

또, Mass-Action Law에서

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

② p-type의 경우(acceptor 농도 : N_A)

상온에서 $N_A \rightarrow N_A^- + h^+$ (N_A 개의 hole)

즉, N_A 개의 acceptor로부터 N_A 개의 정공이 나옴

따라서

$$p_0 = n_i + N_A \cong N_A$$

또, Mass-Action Law에서

$$n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

③ 2가지 불순물이 모두 doping된 경우 (N_D, N_A)

불순물 농도	type	electron 농도	hole 농도
$N_D > N_A$	n-type	$n_0 = N_D - N_A$	$p_0 = n_i^2 / (N_D - N_A)$
$N_D = N_A$	intrinsic	$n_0 = n_i$	$p_0 = n_i$
$N_D < N_A$	p-type	$n_0 = n_i^2 / (N_A - N_D)$	$p_0 = N_A - N_D$

(3) carrier 농도의 온도 의존성

① n_i 의 온도 의존성(intrinsic의 경우)

$$\begin{aligned}n_i &= \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \\&= \left[2\left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2} 2\left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \right]^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \\&= 2\left(\frac{2\pi kT}{h^2}\right)^{3/2} (m_n^* m_p^*)^{3/4} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)\end{aligned}$$

따라서

$$n_i(T) \propto T^{3/2} e^{-1/T} \propto e^{-1/T}$$

즉, n_i 는 온도(T)에 따라 exponentially 변함

② n_0 의 온도 의존성(extrinsic의 경우)

$$n_0(T) = n_i(T) + N_D(T)$$

i) 상온에서

$$n_i(T) \ll N_D(T) = N_D$$

따라서 $n_0(T) = N_D$: 일정 \rightarrow 불순물이 반도체의 성질을 결정(extrinsic)

ii) $T \gg$ 상온

$$n_i \text{가 급격히 증가하여 } n_i(T) \gg N_D(T)$$

따라서 $n_0(T) = n_i(T)$: intrinsic 성질로 돌아감

iii) $T \ll$ 상온

$$N_D^+ + e^- \rightarrow N_D$$

즉, de-ionization(freeze-out) 현상이 발생하여 불순물 효과가 없어짐 \rightarrow intrinsic

4 장 평형상태의 반도체

< $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 으로 doping된 extrinsic(n-type) 반도체의 electron 농도와 온도와의 관계 >

