

04

열평형 상태 반도체 내의 이동전하 : 전자와 정공의 농도

Semiconductors under Thermal Equilibrium

이 장의 구성과 학습 내용

전자와 정공 농도 : 의미와 표시 방법 _ 4.1

순수 반도체와 고유 캐리어 농도 _ 4.2

불순물 주입에 의한 전기적 특성 조절 _ 4.3

불순물의 이온화와 캐리어 농도 _ 4.4

불순물 주입 반도체의 전자와 정공 농도 _ 4.5

반도체의 불순물 농도와 페르미 준위 _ 4.6

페르미 준위의 공간적 분포 $E_F(x)$ _ 4.7

연습문제

학습목표

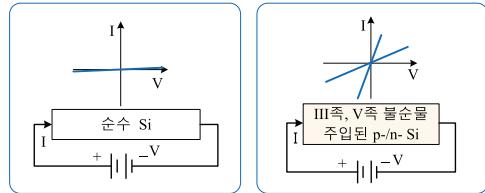
- 반도체의 열평형 상태 전자와 정공 농도 표시법을 알아본다.
- 순수 반도체의 고유 캐리어 농도에 대해 학습한다.
- 불순물을 통한 전자와 정공 농도 조절에 대해 학습한다.
- 열평형 상태의 페르미 준위 분포와 전자/정공의 단체행동 법칙에 대해 이해한다.

반도체의 전기적 특성

: 반도체 내에서 캐리어(전자와 정공)의 이동에 의해 결정

$$J = \sum Q' N v \\ = \sum Q' Flux$$

- 캐리어의 종류와 농도: $Q'?$ $N_o?$
- 전자와 정공 농도: $N(n & p)$?
- 혼용에너지 상태밀도함수: $g(E)$
- 분포함수: $f(E)$

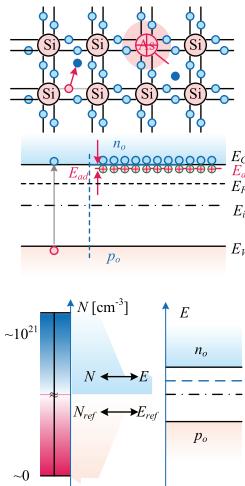


■ 캐리어 농도

$$N_o = \begin{cases} n_o = \int_{E_C}^{C_B} g_C(E) f_{FD}(E) dE \\ p_o = \int_{V_B}^{E_V} g_V(E) (1 - f_{FD}(E)) dE \end{cases}$$

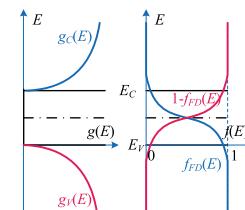
$$g(E) = \begin{cases} g_C(E) = \frac{m_n^{3/2} \sqrt{2}}{\pi^2 \hbar^3} \sqrt{E - E_C} & (E \geq E_C) \\ g_V(E) = \frac{m_p^{3/2} \sqrt{2}}{\pi^2 \hbar^3} \sqrt{E_V - E} & (E \leq E_V) \end{cases}$$

$$f(E) = \begin{cases} f_{FD}(E) = \frac{1}{1 + \exp((E - E_F)/kT)} \\ 1 - f_{FD}(E) = \frac{1}{1 + \exp(-(E - E_F)/kT)} \end{cases}$$



■ 캐리어 농도 표시 방법: 반도체 내의 캐리어 농도를 간략하게 표시

$$\frac{N(E)}{N_{ref}(E_{ref})} = \exp\left(\pm \frac{E - E_{ref}}{kT}\right), \quad E - E_{ref} = \pm kT \ln\left(\frac{N(E)}{N_{ref}(E_{ref})}\right)$$



■ 순수 반도체

- 반도체의 고유 특성과 전자 및 정공 농도: E_g & T

■ 반도체 특성의 조절: 도핑

- 제조공정을 통한 불순물 주입에 의한 조절(종류와 농도)
- 바이어스 인가에 의한 조절(전압, 빛, 압력, 온도 등)

열평형 상태 반도체 내의 이동 전하: 전자와 정공 농도

■ 반도체 내의 전자와 정공 농도

- 전자와 정공 농도를 표시하는 방법: $N_{ref} \leftrightarrow E_{ref}$
- 페르미 준위 E_F 의 의미와 활용

■ 전도 대역과 가전자 대역의 유효 상태 농도: N_C & N_V [cm⁻³]

■ 순수 반도체와 순수 / 고유 캐리어 농도

- 순수 반도체란?
- 고유 / 순수 캐리어 농도의 에너지 밴드갭과 온도에 따른 변화

■ 불순물 주입에 의한 반도체 특성의 조절과 캐리어 농도

- 도핑, 불순물의 종류
- 불순물 주입 반도체란?
- 불순물의 이온화 과정
- 불순물 농도와 열평형 상태 캐리어 농도

■ 전자와 정공의 단체행동 법칙: $p_o n_o = n_i^2$

■ 열평형 상태의 페르미 준위 분포: $E_F(x) = \text{일정}$

$$n_o = \int_{E_C}^{C_B} g_C(E) f_{FD}(E) dE \\ = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \\ = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$$

$$p_o = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \\ = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)$$

$$p_o = \int_{V_B}^{E_i} g_V(E) (1 - f_{FD}(E)) dE$$

이 장의 구성과 학습 내용

반도체 재료 및 소자의 전기적 특성은 반도체 내의 이동전하인 전도 대역 전자와 가전자 대역 정공에 의해 결정된다. 전류밀도 J [A/cm²]는 재료, 제조공정, 소자 구조 및 인가된 바이어스에 의해 결정되며,

$$J = \sum Q' N v \quad v = \mu \mathcal{E}$$

또는 $J = \sum Q' Flux \quad Flux (= N \times v) = D \left(-\frac{dN(x)}{dx} \right)$

로 나타낼 수 있다. 특히 반도체 내에 존재하는 이동전하의 종류 Q' [C], 평균 이동속도 v [cm/s], 농도 N [cm⁻³]에 의해 결정되며, 이들을 지배하는 특성변수를 각각 [표 4-1]과 같이 요약 할 수 있다.

[표 4-1] 반도체 내에 존재하는 이동전하의 종류 Q' , 이동속도 v , 농도 N

에너지 대역	이동전하	J [A/cm ²]	Q' [C]	$N = N_o + \delta N$ [cm ⁻³]	v [cm/s]	$g(E)$ [eV ⁻¹ cm ⁻³]	$f(E)$
전도 대역($E \geq E_C$)	전자	J_n	$-q$	$n = n_o + \delta n$	v_n	$g_c(E)$	$f_{FD}(E)$
가전자 대역($E \leq E_V$)	정공	J_p	$+q$	$p = p_o + \delta p$	v_p	$g_v(E)$	$1 - f_{FD}(E)$
상태밀도함수	전도 대역($E \geq E_C$)		$g_c(E) = \frac{m_n^{*3/2} \sqrt{2}}{\pi^2 \hbar^3} \sqrt{E - E_C}$ [cm ⁻³ eV ⁻¹]				
	가전자 대역($E \leq E_V$)		$g_v(E) = \frac{m_p^{*3/2} \sqrt{2}}{\pi^2 \hbar^3} \sqrt{E_V - E}$ [cm ⁻³ eV ⁻¹]				
분포함수	전자 분포함수 ($E \geq E_C$) : $(E_C - E_F) > 3kT$		$f_{FD}(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \cong e^{-(E - E_F)/kT} = f_{MB}(E)$				
	정공의 분포함수 ($E \leq E_V$) : $(E_F - E_V) > 3kT$		$1 - f_{FD}(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \cong e^{(E - E_F)/kT} = 1 - f_{MB}(E)$				
캐리어 농도	전자 농도($E \geq E_C$)		$n_o = \int_{E_c}^{CB} g_c(E) f(E) dE$				
	정공 농도($E \leq E_V$)		$p_o = \int_{VB}^{E_v} g_v(E) (1 - f(E)) dE$				
전류	전자에 의한 전류		$\bar{J} _{CB} \equiv \bar{J}_n = -qn\bar{v}_n$		$\bar{J} = \bar{J} _{VB} + \bar{J} _{CB} = \bar{J}_p + \bar{J}_n$		
	정공에 의한 전류		$\bar{J} _{VB} \equiv \bar{J}_p = qp\bar{v}_p$				

에너지 대역	이동전하	J [A/cm ²]	Q' [C]	$N=N_o+\delta N$ [cm ⁻³]	v [cm/s]	$g(E)$ [eV ⁻¹ cm ⁻³]	$f(E)$
캐리어 농도와 에너지 준위의 관계	캐리어 농도 $N = N_{ref} \exp\left(\pm \frac{\Delta E}{kT}\right)$			$n_o = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$ $p_o = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)$			
	에너지 준위			$\Delta E \equiv E - E_{ref} = \pm kT \ln\left(\frac{N}{N_{ref}}\right)$			

4장에서는

외부에서 인위적 에너지가 인가되지 않은 열평형 상태의 반도체의

- 전도 대역 전자와 가전자 대역 정공 농도를 구하는 방법
- 페르미 준위 E_F 의 위치를 사용한 전도 대역 전자와 가전자 대역 정공 농도 표시 방법
- 순수 반도체의 전자 및 정공 농도 n_i 와 고유 페르미 준위 E_i (또는 E_{Fi})
- 반도체의 전기적 특성 조절을 위해 사용하는 도핑(불순물 주입) 방법
 - 억셉터(N_A)와 도너(N_D)
- 도핑한 반도체에서 불순물 원자의 이온화와 전자, 정공의 생성
- 도핑한 반도체의 전자 및 정공 농도와 불순물 주입 반도체 : p형 및 n형 반도체
- 전자와 정공의 단체행동 법칙 : $n_o p_o = n_i^2 = N_C N_V \exp(-E_g/kT)$
- 도핑한 반도체에서 불순물 농도와 전자, 정공의 농도
- 열평형 상태에서 페르미 준위의 공간적 분포 : $E_F(x) = \text{일정}$

에 대해 학습하며, 1장의 반도체 구조, 2장의 양자역학을 기초로 주기 구조 반도체에 대해 적용한 3장의 에너지 대역도를 바탕으로 한다.

4.1 전자와 정공 농도 : 의미와 표시 방법

반도체의 전기적 특성은 전도 대역 전자와 가전자 대역 정공에 의해 결정되며, 전류밀도 J 는

- $J = \sum Q' Nv = \sum Q' Flux [A/cm^2]$
- $v = \mu\mathcal{E} [\text{cm/s}]$ 전자와 정공의 이동속도(carrier velocity)
- $Flux \equiv Nv [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 전자와 정공의 유동밀도(Flux density)

로 나타낼 수 있다. 전도 대역과 가전자 대역에서 전자에 허용된 에너지 준위의 분포를 나타내는 에너지 상태밀도함수 $g(E)$, 허용된 전도 대역 에너지 준위에 전자가 존재할 확률을 나타내는 전자의 분포함수 $f(E)$, 가전자 대역에 정공이 존재할 확률을 나타내는 정공의 분포함수 $f_h(E) = 1 - f(E)$ 는 각각

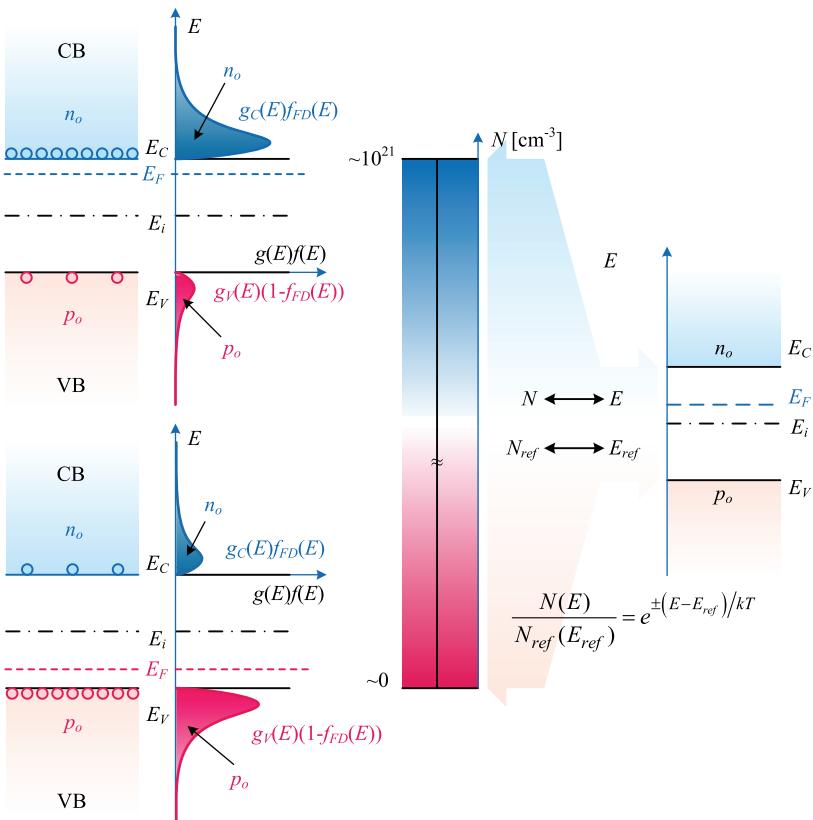
$$g(E) [\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1}] = \begin{cases} g_C(E) = \frac{m_n^{*3/2}\sqrt{2}}{\pi^2\hbar^3} \sqrt{E - E_c} = \frac{m_n^{*3/2}\sqrt{2}}{\pi^2\hbar^3} \sqrt{E_{kn}} & \text{전도 대역 } (E \geq E_C) \\ 0 & \text{금지 대역 } (E_V < E < E_C) \\ g_V(E) = \frac{m_p^{*3/2}\sqrt{2}}{\pi^2\hbar^3} \sqrt{E_V - E} = \frac{m_p^{*3/2}\sqrt{2}}{\pi^2\hbar^3} \sqrt{E_{kp}} & \text{가전자 대역 } (E \leq E_V) \end{cases}$$

$$f(E) = \begin{cases} f_{FD}(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \cong e^{-(E - E_F)/kT} = f_{MB}(E) & \text{전도 대역 전자 } (E \geq E_C, (E_C - E_F) > 3kT) \\ 1 - f_{FD}(E) = \frac{1}{1 + e^{-(E - E_F)/kT}} \cong e^{(E - E_F)/kT} = 1 - f_{MB}(E) & \text{가전자 대역 정공 } (E \leq E_V, (E_F - E_V) > 3kT) \end{cases}$$

에 의해 지배된다. 따라서 열평형 상태의 전자와 정공의 농도(n_o, p_o)는 각각 다음 식으로부터 얻을 수 있음을 확인하였다.

$$N_o = \begin{cases} n_o \equiv \int_{E_c}^{CB} g_c(E)f(E)dE & \text{전도 대역 전자 } (E \geq E_C) \\ p_o \equiv \int_{VB}^{E_V} g_v(E)(1-f(E))dE & \text{가전자 대역 정공 } (E \leq E_V) \end{cases}$$

4장에서 배울 캐리어 농도와 에너지 대역도의 관계를 [그림 4-1]에 요약하였다.



[그림 4-1] 에너지 대역도와 전자/ 정공의 농도 표시 방법

열평형 상태의 전자와 정공 농도는 페르미 준위 E_F 의 위치를 이용하여 나타내는 것이 편리하고 유용하다. 즉, 반도체의 특성을 결정하는 전자와 정공 농도($0 \sim 10^{20} [\text{cm}^{-3}]$)를 숫자로 직접 표시하거나 다루지 않고, 에너지 대역도를 사용하여 나타내는 것이 효율적이다. 지금부터 $E_V \sim E_C$ 사이의 특정한 위치에 E_F 를 표시함으로써 열평형 상태에 있는 반도체 내의 전자와 정공의 농도를 나타내는 방법을 설명하겠다.

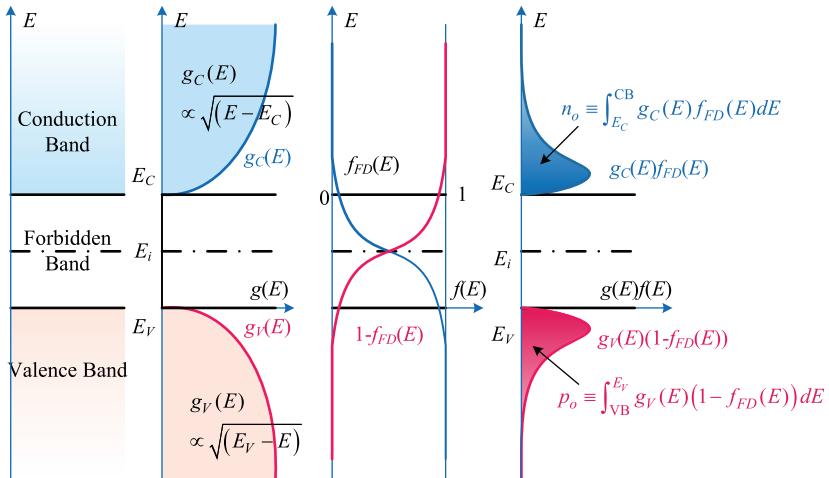
4.1.1 열평형 상태의 전자와 정공의 분포

열평형 상태의 단위체적당 전도 대역 전자 농도 $n_o [\text{cm}^{-3}]$ 과 가전자 대역 정공 농도 $p_o [\text{cm}^{-3}]$ 은 각각

$$n_o \equiv \int_{E_c}^{CB} g_c(E)f(E)dE [\text{cm}^{-3}]$$

$$p_o \equiv \int_{VB}^{E_v} g_v(E)(1-f(E))dE [\text{cm}^{-3}]$$

로부터 얻을 수 있으며, 각 에너지 대역의 상태밀도함수와 분포함수를 적용하면 [그림 4-2]와 같다.



[그림 4-2] 에너지 상태밀도함수, 분포함수 및 전도 대역 전자와 가전자 대역 정공 농도 분포

전도 대역 전자 농도

전도 대역의 허용에너지 상태밀도함수에 비해 채워진 전자의 농도가 낮은 경우, 볼츠만(Boltzmann) 가정을 사용할 수 있다. 즉, 열평형 상태의 전도 대역 전자 농도 n_o 는

$$n_o = \int_{E_C}^{CB} g_C(E) f_{FD}(E) dE = \frac{4\pi(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \int_{E_C}^{CB} \sqrt{E - E_C} \exp\left(-\frac{E - E_C}{kT}\right) dE$$

$$= \frac{4\pi(2m_n^* kT)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \int_{E_C}^{CB} \eta^{1/2} e^{-\eta} d\eta, \quad \eta \equiv (E - E_C)/kT$$

를 이용하여 구할 수 있다. 따라서 페르미 적분(Fermi integral) 관계식

$$\int_{E_C}^{CB} \eta^{1/2} e^{-\eta} d\eta = \sqrt{\pi}/2$$

을 이용하면 전도 대역 전자 농도는

$$n_o = \int_{E_C}^{\infty} g_C(E) f_{FD}(E) dE = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$$

$$\equiv N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$$

가 된다. 여기서 N_C 는

$$N_C \equiv \frac{4\pi(2m_n^*kT)^{3/2}}{\hbar^3} \int_{E_C}^{\infty} \eta^{1/2} e^{-\eta} d\eta = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* k T}{\hbar^2} \right)^{3/2} = n_o \Big|_{E_F = E_C} [\text{cm}^{-3}]$$

로 정의된 전도 대역 유효 상태 농도(effective density of states in the conduction band)다. N_C 는 E_F 가 E_C 와 동일한 에너지 준위에 있을 때 전도 대역에 있는 전자 농도($N_C \equiv n_o (E_F = E_C)$)에 해당한다. 또 N_C 는 전도 대역 허용 상태밀도함수 $g_C(E)$ 에 의해 지배되므로 전자 농도를 나타내는 용도 외에도 전도 대역에 얼마나 많은 허용에너지 준위가 존재하는지를 나타내는 특성 지표로도 사용된다.

위의 결과에서 보는 바와 같아 N_C 는 기본적으로 $E-k$ 관계도의 전도 대역 형태를 지배하는 전자의 유효질량 m_n^* 에 의해 결정($N_C \propto m_n^{*3/2}$)된다. 즉, 전도 대역 전자의 유효질량 m_n^* 은

$$m_n^* = \left. \frac{\hbar^2}{\partial^2 E(k)/\partial k^2} \right|_{E>E_C}$$

를 이용하여 $E-k$ 관계도로부터 구할 수 있다. 유효질량을 지배하는 $E-k$ 관계도는 기본적으로 원자의 배열 구조와 이로 인한 에너지 장벽에 의해 결정되므로, N_C 역시 반도체 재료가 가지는 고유한 특성 중 하나다. 상온($T=300\text{ K}$)에서 Si과 GaAs 반도체의 전도 대역 유효 상태 농도는 각각 $N_C(\text{Si})=2.8 \cdot 10^{19} [\text{cm}^{-3}]$, $N_C(\text{GaAs})=4.7 \cdot 10^{17} [\text{cm}^{-3}]$ 이며, 온도가 올라갈수록 증가($N_C \propto T^{3/2}$)한다.

가전자 대역 정공 농도

가전자 대역의 허용에너지 상태밀도함수에 비해 비어있는 상태인 정공의 농도가 낮은 경우, 볼츠만 가정을 사용할 수 있다. 즉, 열평형 상태의 가전자 대역 정공 농도 p_o 는

$$\begin{aligned} p_o &= \int_{VB}^{E_V} g_V(E)[1-f_{FD}(E)]dE = \frac{4\pi(2m_p^*)^{3/2}}{\hbar^3} \exp\left(-\frac{E_F-E_V}{kT}\right) \int_{VB}^{E_V} \sqrt{E_V-E} \exp\left(-\frac{E_V-E}{kT}\right) dE \\ &= \frac{4\pi(2m_p^*kT)^{3/2}}{\hbar^3} \exp\left(-\frac{E_F-E_V}{kT}\right) \int_{VB}^{E_V} \zeta^{1/2} e^{-\zeta} d\zeta, \quad \zeta \equiv \frac{E_V-E}{kT} \end{aligned}$$

로부터 구할 수 있다. 따라서 열평형 상태의 정공 농도는

$$\begin{aligned} p_o &= \int_{VB}^{E_V} g_V(E)[1-f_{FD}(E)]dE = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* k T}{\hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_F-E_V}{kT}\right) \\ &\equiv N_V \exp\left(-\frac{E_F-E_V}{kT}\right) \end{aligned}$$

로 간략하게 나타낼 수 있다. 여기서 N_V 는

$$N_V \equiv 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{\hbar^2} \right)^{3/2} = p_o|_{E_F=E_V} [\text{cm}^{-3}]$$

로 정의된 가전자 대역 유효 상태 농도(effective density of states in the valence band)다. N_V 는 E_F 가 E_V 와 동일한 에너지 준위에 있을 때 가전자 대역에 있는 정공 농도($N_V \equiv p_o (E_F = E_V)$)에 해당한다. N_C 가 전자 농도 표시 외에 전도 대역 허용에너지 준위에 대한 지표로 사용되는 것과 같이, N_V 도 정공의 농도 표시 외에 가전자 대역에 얼마나 많은 허용에너지 준위가 존재하는지를 나타내는 지표로 사용한다.

N_V 는 기본적으로 $E-k$ 관계도에서 가전자 대역의 형태를 지배하는 전자의 유효질량 m_p^* 에 의해 결정($N_V \propto m_p^{*3/2}$)된다. 즉, 가전자 대역 정공의 유효질량 m_p^* 은 $E-k$ 관계도로부터

$$m_p^* = \left. \frac{\hbar^2}{\partial^2 E(k)/\partial k^2} \right|_{E < E_V}$$

를 이용하여 구할 수 있다. 원자의 배열 구조와 이로 인한 에너지 장벽에 의해 결정되는 $E-k$ 관계도에 의해 지배되므로, N_V 도 N_C 와 동일하게 반도체 재료가 가지는 고유한 특성 지표다. 상온($T=300\text{ K}$)에서 Si과 GaAs의 가전자 대역 유효 상태 농도는 각각 $N_V(\text{Si}) = 1.0 \cdot 10^{19} [\text{cm}^{-3}]$, $N_V(\text{GaAs}) = 7.0 \cdot 10^{18} [\text{cm}^{-3}]$ 이며, 온도가 증가할수록 N_V 도 증가($N_V \propto T^{3/2}$)한다.

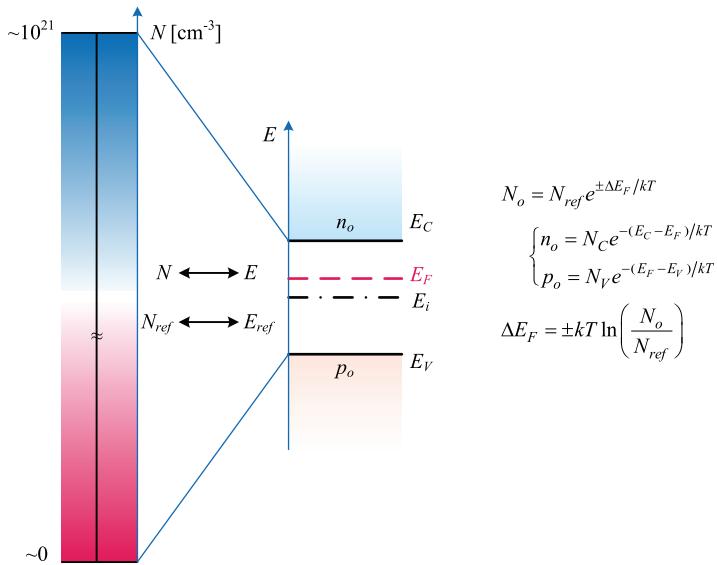
4.1.2 페르미 준위 E_F

앞으로 열평형 상태의 전도 대역 전자 농도와 가전자 대역의 정공 농도는 각각

$$n_o \equiv N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) [\text{cm}^{-3}]$$

$$p_o \equiv N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) [\text{cm}^{-3}]$$

으로 표시한다. 전자친화도와 에너지 밴드갭은 특정 반도체의 고유한 특성변수이므로 E_C 와 E_V 도 고정된 에너지 준위다. 따라서 고정된 에너지 준위인 E_C 와 E_V 를 기준으로 하여 E_F 의 위치를 가변함으로써 반도체 내의 전자와 정공 농도를 표시하는 방법이 더 효율적이다. [그림 4-3]에 이 개념을 요약하였다. 전도 대역 전자 농도를 표시할 때는 전자 농도가 높을수록 전도 대역 E_C 에 가깝게 페르미 준위 E_F 를 표시하고, 가전자 대역의 정공 농도를 표시할 때는 정공 농도가 높을수록 가전자 대역 E_V 에 가깝게 E_F 를 표시한다.



[그림 4-3] 열평형 상태의 전자 농도 및 정공 농도와 페르미 준위

특히 주목할 것은 페르미 준위의 변화는 작아도 전자 및 정공의 농도는 크게 변한다는 것이다. 다시 말해 전자 및 정공 농도에 큰 차이가 있더라도 E_F 의 변화는 그리 크지 않다. 즉, 넓은 범위의 전자와 정공 농도를 E_F 의 작은 변화로 표시할 수 있다는 의미다.

캐리어(carrier) 농도와 에너지 준위는 [표 4-2]로 요약하였으며, 반도체 특성을 이해하는 데 매우 효율적으로 사용할 수 있다. 예를 들어, 반도체 1의 페르미 준위 E_{F1} 과 반도체 2의 페르미 준위 E_{F2} 가 $\Delta E_F = E_{F2} - E_{F1} = 3kT$ 인 경우, 반도체 2의 전자 농도 n_{o2} 는 반도체 1의 전자 농도 n_{o1} 의 20배($n_{o2} = n_{o1} \exp(\Delta E_F / kT) = n_{o1} e^3 = 20 n_{o1}$)이고, 정공 농도는 $p_{o2} = p_{o1}/20$ 에 해당한다 (참고 $e^3 \approx 20$).

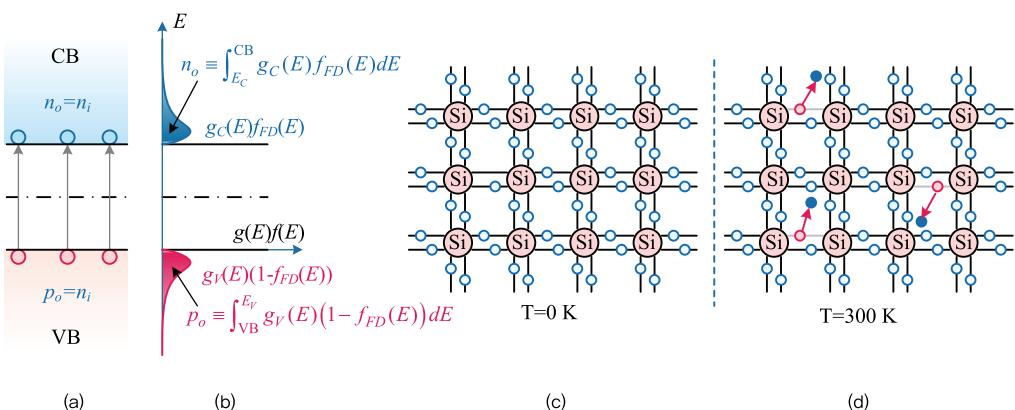
[표 4-2] 열평형 상태의 전자 및 정공 농도와 페르미 준위

캐리어 농도	N_{ref}	n_o	N_C	p_o	N_V
에너지 준위	E_{ref}	E_F	E_C	E_F	E_V
농도 표시	$N_o = N_{ref} e^{\pm \Delta E_F / kT}$	$n_o = N_C e^{-(E_C - E_F) / kT}$			$p_o = N_V e^{-(E_F - E_V) / kT}$
에너지 표시	$\Delta E_F = \pm kT \ln \left(\frac{N_o}{N_{ref}} \right)$	$E_C - E_F = kT \ln \left(\frac{N_C}{n_o} \right)$			$E_F - E_V = kT \ln \left(\frac{N_V}{p_o} \right)$
$N_o = N_{ref} e^{\pm \Delta E_F / kT}$	←	$\begin{cases} n_o = N_C e^{-(E_C - E_F) / kT} \\ p_o = N_V e^{-(E_F - E_V) / kT} \end{cases}$	→	$\Delta E_F = \pm kT \ln \left(\frac{N_o}{N_{ref}} \right)$	

4.2 순수 반도체와 고유 캐리어 농도

순수 반도체(진성 반도체, intrinsic semiconductor)는 순수하게 본래의 원자들로만 주기적 원자 배열을 이루고 있는 반도체다. 순수 반도체에서도 주변의 열에너지에 의해 가전자 대역으로부터 전도 대역으로 전자가 여기되고, 이로 인해 가전자 대역에 정공도 생성(thermal generation)된다. 이 과정을 [그림 4-4]에 나타내었다.

$T=0\text{ K}$ 에서는 열에너지가 존재하지 않아 순수 반도체의 원자들간 결합이 완전하게 유지되므로, 전자와 정공이 생성되지 않는다. [그림 4-4(a)]의 에너지 대역도와 [그림 4-4(d)]의 원자 결합 모델에 나타낸 바와 같이 온도가 상승하여 $T>0\text{ K}$ 이 되면 열에너지를 얻은 가전자 대역의 전자가 전도 대역으로 천이하여 전자와 정공이 같은 농도로 생성된다. 이를 열에너지($E_{th}=kT$, thermal energy)에 의해 생성된 전자-정공 커플(thermally generated electron-hole pair)라고 한다. 열에너지에 의해 생성되는 전자-정공 커플의 농도는 [그림 4-4(b)]에 나타낸 바와 같이 전도 대역과 가전자 대역의 허용에너지 상태밀도함수와 분포함수, 열에너지를 결정하는 온도, 반도체의 고유한 특성인 에너지 밴드갭에 의해 결정된다.



[그림 4-4] 순수 반도체에서 열에너지에 의한 전자와 정공의 생성 과정

- (a) 에너지 대역도에서 전자와 정공의 생성 과정
- (b) 상태밀도함수와 분포함수를 이용한 전자와 정공의 농도 생성 개념
- (c) $T=0\text{ K}$ 에서 순수 반도체의 원자 결합 모델
- (d) $T=300\text{ K}$ 에서 순수 반도체의 원자 결합 모델과 전자와 정공의 생성 과정

즉, 열평형 상태의 순수 반도체에서 열에너지에 의해 생성된 전자와 정공의 고유 농도를 고유 캐리어(intrinsic carrier) 농도라고 하고 $n_i (\equiv n_{o,int} = p_{o,int})$ 로 표시한다. 고유 캐리어 농도는,

- 반도체의 에너지 밴드갭(E_g)
- 온도(T)
- 가전자 대역을 채우고 있는 전자의 수를 결정하는 유효질량(m_p^*)
또는 가전자 대역 유효 상태 농도(N_V)
- 전도 대역의 빈자리 수를 결정하는 유효질량(m_n^*) 또는 전도 대역 유효 상태 농도(N_C)

에 의해 결정된다. 이들은 모두 반도체의 고유한 특성변수들이다. 따라서 불순물이 주입되지 않은 순수 반도체 내의 전자와 정공 농도 n_i 도 반도체의 중요한 고유 특성변수 중 하나다.

순수 반도체에 존재하는 전자와 정공 농도($n_i = p_i$)를 나타내는 페르미 준위를 E_i (또는 E_{Fi})로 표시하면, 고유 캐리어 농도(진성 캐리어 농도, intrinsic carrier concentration)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_o|_{intrinsic} \equiv n_i = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{Fi}}{kT}\right) [\text{cm}^{-3}]$$

$$p_o|_{intrinsic} \equiv p_i = N_V \exp\left(-\frac{E_{Fi} - E_V}{kT}\right) = n_i [\text{cm}^{-3}]$$

4.2.1 고유 캐리어 농도 n_i

순수 반도체에 존재하는 전자와 정공 농도 n_i 는 반도체의 고유한 특성변수며, 반드시 결레(electron-hole pair)로 생성된다. 따라서 $n_{o,int} = p_{o,int} = n_i$ 임을 이용하면

$$(n_o p_o)_{intrinsic} = n_i^2 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_C - E_V}{kT}\right) = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

$$N_C \equiv 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} = n_o|_{E_F=E_C} [\text{cm}^{-3}]$$

$$N_V \equiv 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} = p_o|_{E_F=E_V} [\text{cm}^{-3}]$$

로 나타낼 수 있으며, 앞서 설명한 대로 다음에 의해 결정된다.

- 반도체 재료의 고유 특성변수인 밴드갭(E_g)
- 반도체 재료의 고유 특성에 의해 결정되는 전도 대역과 가전자 대역의 유효 상태 농도(N_C, N_V)
- 전자의 천이에 이용되는 열에너지를 결정하는 온도(T)

따라서 온도와 반도체의 고유 특성에 의해 지배되는 순수 반도체의 고유 캐리어 농도 n_i 는

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) = 2 \left(\frac{2\pi kT}{h^2}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{m_n^* m_p^*}{2kT}\right)^{3/4} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) [\text{cm}^{-3}]$$

을 얻는다. 상온에서 Si($E_g = 1.11$ [eV]), Ge($E_g = 0.67$ [eV]), GaAs($E_g = 1.42$ [eV])의 고유 캐리어 농도는 각각 $n_i(\text{Si}) = 1.5 \cdot 10^{10}$ [cm^{-3}], $n_i(\text{Ge}) = 2.4 \cdot 10^{13}$ [cm^{-3}], $n_i(\text{GaAs}) = 1.8 \cdot 10^6$ [cm^{-3}]로서, 에너지 밴드갭이 클수록 현저히 낮은 고유 캐리어 농도를 가짐을 확인할 수 있다.

온도와 반도체의 에너지 밴드갭에 따른 고유 캐리어 농도 변화를 [그림 4-5]에 요약하였다. 고유 캐리어는 열에너지에 의해 전자-정공 결합으로 생성되므로 그림에 나타낸 바와 같이 온도에 따른 변화가 매우 크다. 즉, 동일한 온도에서 밴드갭이 가장 작은 Ge 반도체의 고유 캐리어 농도가 가장 높으며, 밴드갭이 가장 큰 GaAs 반도체가 가장 낮다. 또한 고유 캐리어 농도는 온도에 지수함수적으로 변하므로 온도의 역수에 대한 $\log(n_i)$ 의 변화는

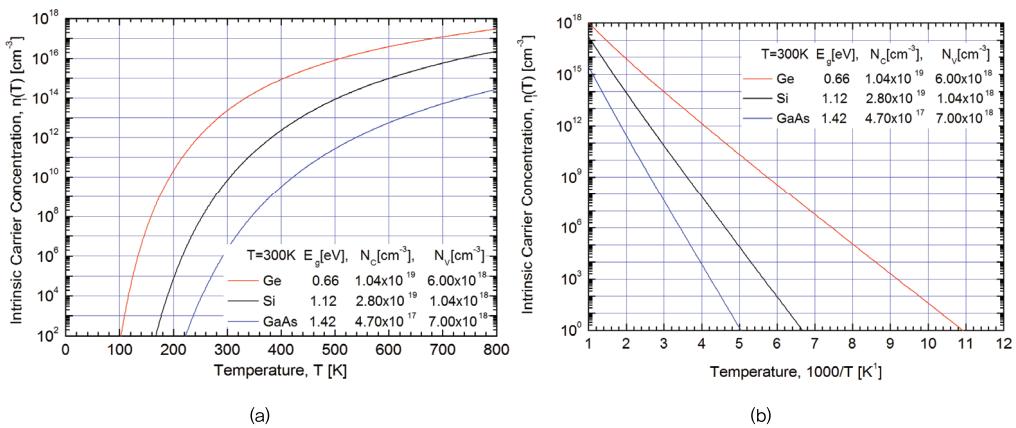
$$\log\left(\frac{n_i}{\sqrt{N_C N_V}}\right) = -\left(\frac{E_g}{2k}\right)(\log e)\frac{1}{T}$$

또는 $\log(n_i) = \frac{1}{2}\log(N_C N_V) - \left(\frac{E_g}{2k}\right)(\log e)\frac{1}{T}$

가 된다. 즉, N_C 와 N_V 가 온도에 따라 변하지만 온도의 지수함수 의존도가 훨씬 주도적이므로

$$\log(n_i) \propto \frac{1}{T}$$

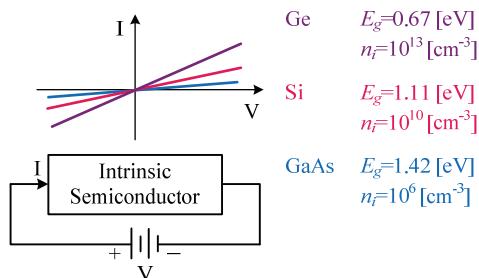
로 나타낼 수 있다. 로그를 취한 고유 캐리어 농도는 $(1/T)$ 에 선형적으로 비례하는 직선을 이루며, 밴드갭이 작을수록 완만한 기울기를 갖는다. 고유 캐리어 농도는 반도체의 불필요한 누설 전류와 잡음 특성을 지배하는 중요한 특성변수로서, 특히 밴드갭 변화에 민감하다. 따라서 저잡음 응용을 위한 반도체 소자는 밴드갭이 큰 재료를 활용하는 것이 유리하다.



[그림 4-5] 고유 캐리어 농도의 온도에 따른 변화($T = 300$ K에서 $E_g|_{\text{Si}} = 1.12$ [eV], $E_g|_{\text{Ge}} = 0.66$ [eV], $E_g|_{\text{GaAs}} = 1.42$ [eV])

- (a) 온도(T)에 따른 고유 캐리어 농도의 변화
- (b) 온도의 역수($1000/T$)에 따른 고유 캐리어 농도의 변화

인가된 전압에 따른 순수 반도체의 전류 변화는 고유 캐리어에 의해 한정된 농도의 전자와 정공의 이동에 의해 지배된다. 열에너지에 의해 생성된 고유 캐리어만 존재하는 순수한 Si, Ge, GaAs 반도체의 전류–전압 특성을 [그림 4-6]에 비교하여 나타내었다.



[그림 4-6] 순수한 Si, Ge, GaAs 반도체의 전기적 특성
순수 반도체의 전류는 인가한 전압에 비례해 전류가 증가하지만 밴드갭이 큰 재료일수록 고유 캐리어 농도가 낮아서 동일한 전압에서 작은 전류가 흐른다.

예제 4-1

순수한 Si의 고유 캐리어 농도

상온($T = 300 \text{ K}$)에서 순수 Si 반도체의 고유 캐리어 농도는 $n_i \approx 1 \times 10^{10} \text{ [cm}^{-3}\text{]}$ 이다. 최근 회로 응용 소자로 사용되는 반도체 소자의 크기는 가로 \times 세로 \times 높이 = 1 [μm] \times 1 [μm] \times 1 [μm]보다 훨씬 작은 것이 일반적이다. $V = 1 \text{ [\mu m}^3\text{]}$ 의 순수 Si 반도체에 존재하는 고유 캐리어 농도를 구하고, 최소한 1개의 고유 캐리어 농도가 존재하기 위해서 필요한 체적 V_{\min} 을 구하라.

풀이

순수한 Si 반도체에서 상온의 열에너지에 의해 생성되는 고유 캐리어 농도는

$$n_i \approx 1 \times 10^{10} \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

이므로, $V = 1 \text{ [\mu m}^3\text{]}$ 의 체적 내에 존재하는 고유 캐리어 농도 $N_i|_{1\mu\text{m}^3}$ 은

$$N_i|_{1\mu\text{m}^3} = \frac{1 \times 10^{10}}{1 \text{ [\mu m}^3\text{]}} \times 1 \text{ [\mu m}^3\text{]} = 10^{-2} \text{ [\mu m}^3\text{]}$$

을 얻는다. 즉, 1 [μm^3]의 체적 내에는 0.01개가 존재하므로 열생성된 고유 캐리어가 최소한 1개 존재하기 위해서 반도체는 $V_{\min} = 100 \text{ [\mu m}^3\text{]}$ 의 체적을 가져야 한다.

4.2.2 고유 페르미 준위 $E_i(E_{Fi})$

순수 반도체에는 열에너지에 의해 생성된 전자와 정공이 같은 수의 쌍으로 존재하며, 이는 반도체의 고유한 특성에 의해 결정된다. 따라서 순수 반도체에 존재하는 고유 캐리어 농도를 나타내는 페르미 준위 $E_i(\equiv E_F|_{intrinsic})$ 의 위치도 반도체의 고유한 특성에 해당한다. 순수 반도체의 고유 캐리어 농도는 반도체 재료의 고유 특성에 의해 결정되므로, 이를 나타내는 고유 페르미 준위 (intrinsic Fermi level) 또한 에너지 대역도 내의 특정한 위치에 고정적으로 존재함을 뜻한다. 즉, 고유 캐리어 농도는 반드시 전자-정공의 쌍으로 생성되므로

$$E_F|_{intrinsic} = E_i \quad \text{또는} \quad E_{Fi}$$

$$n_o|_{intrinsic} \equiv n_i = p_i \equiv p_o|_{intrinsic}$$

가 된다. 따라서 에너지 대역도에서 고유 페르미 준위의 위치는

$$n_i = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{Fi}}{kT}\right) = N_V \exp\left(-\frac{E_{Fi} - E_V}{kT}\right) = p_i = n_i \quad [\text{cm}^{-3}]$$

를 이용하여 다시 정리하면

$$E_{Fi} = \frac{1}{2}(E_C + E_V) + \frac{1}{2}kT \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) = \frac{1}{2}(E_C + E_V) + \Delta E_{Fi} \quad [\text{eV}]$$

를 얻는다. 즉, E_i 는 E_C 와 E_V 의 중앙($(E_C+E_V)/2$)으로부터 ΔE_{Fi} 만큼 벗어나 존재한다. ΔE_{Fi} 는

$$\Delta E_{Fi} = \frac{1}{2}kT \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) = 0.75kT \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right) \quad [\text{eV}]$$

로서, 반도체의 고유 특성인 전도 대역과 가전자 대역의 유효질량 차이에 의해 결정된다. [표 4-3]에서 확인할 수 있는 바와 같이 전도 대역과 가전자 대역의 유효질량의 차이는 크지 않으므로 이로 인한 ΔE_{Fi} 는 에너지 밴드갭 E_g 에 비하면 무시할 만한 크기다. 따라서 고유 페르미 준위는

$$E_{Fi} \approx \frac{1}{2}(E_C + E_V) = E_V + \frac{E_g}{2} = E_C - \frac{E_g}{2}$$

로 가정할 수 있으므로, E_{Fi} 는 E_C 와 E_V 의 중앙에 고정된 위치에 존재하는 것으로 가정하고 사용해도 그 오차를 무시할 수 있다.

[표 4-3] 상온($T = 300$ K) 순수 반도체에서 고유 캐리어 농도와 고유 페르미 준위의 위치

$E_{Fi} = \frac{1}{2}(E_C + E_V) + \Delta E_F \cong \frac{1}{2}(E_C + E_V)$, $\Delta E_{Fi} = \frac{1}{2}kT \ln(N_V/N_C) = \frac{3}{4}kT \ln(m_p^*/m_n^*)$						
반도체	E_g [eV]	N_C [cm^{-3}]	N_V [cm^{-3}]	ΔE_{Fi} [eV]	$\Delta E_{Fi}/E_g$ [%]	n_i [cm^{-3}]
Si	1.12	2.3×10^{19}	1.0×10^{19}	-0.066	-6.00	1.05×10^{10}
Ge	0.67	1.0×10^{19}	6.0×10^{18}	-0.007	-0.99	2.4×10^{13}
GaAs	1.43	4.7×10^{17}	7.0×10^{18}	+0.035	+2.44	1.8×10^6

E_i 를 이용하여 캐리어 농도를 나타내는 방법

열평형 상태에서 전자와 정공 농도는 반도체의 고유한 특성변수로서, 에너지 밴드에서 고정된 에너지 준위인 E_C 와 E_V 에 대한 E_F 의 상대적 위치를 이용하여 표시하였다. 그런데 전자 농도를 표시할 때는 E_C 와 N_C 를 이용하고 정공 농도를 표시할 때는 E_V 와 N_V 를 이용하는 등, 캐리어의 종류에 따라 다른 기준 에너지(E_{ref} , reference energy)와 기준 캐리어 농도(N_{ref} , reference carrier concentration)를 사용해야 하는 불편함이 있다.

이를 해결하는 방법 중 하나가 E_i 와 n_i 를 이용하는 방법으로, 전자와 정공 농도를 나타낼 때 동일한 기준 에너지와 동일한 기준 캐리어 농도를 사용하여 간략하고 효과적으로 농도를 표현할 수 있다. 즉, 순수 반도체의 페르미 준위 E_i 가 E_C 와 E_V 의 한가운데 고정되어 있고, n_i 도 고유한 값으로 고정된 값임을 이용하면

$$n_o = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT} = (N_C e^{-(E_C - E_i)/kT}) e^{(E_F - E_i)/kT} = n_i e^{(E_F - E_i)/kT}$$

$$p_o = N_V e^{-(E_F - E_V)/kT} = (N_V e^{-(E_i - E_V)/kT}) e^{-(E_F - E_i)/kT} = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$$

와 같이 전자와 정공 농도를 모두 E_i 와 n_i 를 이용하여 표현할 수 있다. 이에 대해 [표 4-4]에 요약하였다. 페르미 준위 E_F 가 밴드의 중앙인 E_i 의 위쪽으로 갈수록 전자 농도는 증가하고 정공 농도는 감소한다. 반대로 E_F 가 E_i 로부터 아래쪽으로 멀어질수록 정공 농도는 증가하고 전자 농도는 감소한다.

[표 4-4] 고유 페르미 준위 E_i 와 고유 캐리어 농도 n_i 를 이용한 전자 및 정공 농도 표시

N_{ref}	n_o	N_C	p_o	N_V	n_i	p_o & n_o
E_{ref}	E_F	E_C	E_F	E_V	E_i	E_F
$N_o = N_{ref} e^{\pm \Delta E/kT}$	$n_o = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT}$		$p_o = N_V e^{-(E_F - E_V)/kT}$		$n_o = n_i e^{(E_F - E_i)/kT}$ $p_o = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$	
$\Delta E = \pm kT \ln(N_o/N_{ref})$	$E_C - E_F = kT \ln(N_C/n_o)$		$E_F - E_V = kT \ln(N_V/p_o)$		$E_F - E_i = kT \ln(n_o/n_i)$ $E_i - E_F = kT \ln(p_o/n_i)$	

페르미 준위와 열평형 상태의 캐리어 농도

열평형 상태에서 전자와 정공의 농도를 에너지 대역도에 표시하는 것은 반도체의 특성을 이해하는 데 매우 중요하다. 다음 예제를 통해 응용의 편리함을 확인하고자 한다.

- 열평형 상태의 전도 대역 전자 농도 n_o 가 고유 캐리어 농도의 400배($n_o = 400n_i$)인 경우 페르미 준위와 고유 페르미 준위의 차이를 구하라.
- 열평형 상태의 전도 대역 전자 농도 n_o 가 전도 대역 유효 상태 농도의 1/20배($n_o = N_C/20$)인 경우 에너지 대역도에 페르미 준위의 위치를 표시하라.
- 열평형 상태의 가전자 대역 정공 농도 p_o 가 고유 캐리어 농도의 20배($p_o = 20n_i$)인 경우 에너지 대역도에 페르미 준위의 위치를 표시하라.
- 열평형 상태의 가전자 대역 정공 농도 p_o 가 고유 캐리어 농도의 20배($p_o = 20n_i$)인 경우 전도 대역 전자 농도를 구하라.

풀이

- 고유 페르미 준위 E_i 와 그에 대응하는 고유 캐리어 농도 n_i 를 이용하여 전자의 농도는 $n_o = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT} = n_i e^{(E_F - E_i)/kT}$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 전도 대역 전자 농도가 $n_o = n_i e^{(E_F - E_i)/kT} = 400n_i$ 이므로 $E_F - E_i = kT \ln(400) = 6kT$ 로서, 페르미 준위는 고유 페르미 준위로부터 열에너지의 6배($6kT$) 위에 존재한다.
- 전자 농도는 전도 대역 최소 에너지 E_C 와 그에 대응되는 전도 대역 유효 상태 농도 N_C 를 이용하면 $n_o = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT}$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 전자 농도가 $n_o = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT} = n_i/20$ 이므로 $E_C - E_F = kT \ln(20) = 3kT$ 로서, 페르미 준위는 E_C 로부터 열에너지의 3배($3kT$)에 해당하는 에너지 차이만큼 아래에 존재한다.
- 고유 페르미 준위 E_i 와 그에 대응하는 고유 캐리어 농도 n_i 를 이용하여 정공의 농도는 $p_o = N_V e^{-(E_F - E_V)/kT} = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 열평형 상태의 정공의 농도가 $p_o = n_i e^{(E_i - E_F)/kT} = 20n_i$ 이므로 $E_i - E_F = kT \ln(20) = 3kT$ 로서, 페르미 준위는 고유 페르미 준위로부터 열에너지의 3배($3kT$) 아래에 존재한다.
- 열평형 상태에서 전자와 정공의 농도는 단체행동 법칙($n_o p_o = n_i^2$)에 의해 지배된다. 따라서 열평형 상태의 전도 대역 전자 농도는 $n_o = n_i^2 / p_o = n_i/20$ 로서 고유 캐리어 농도의 1/20이 된다.

4.3 불순물 주입에 의한 전기적 특성 조절

반도체의 전류는 전하의 이동(전계 이동 또는 농도 불균일로 인한 확산)으로 형성된다. 전계에 의해 이동하는 전류밀도는 미시적인 옴의 법칙(microscopic Ohm's law)에 의해

$$J = \sigma \varepsilon [\text{A}/\text{cm}^2] \quad \text{전기전도도 } \sigma, \text{ 전계의 세기 } \varepsilon$$

으로 나타낼 수 있다. 반도체는 도체와 절연체의 전기전도도를 모두 가질 수 있는 재료로서, 원하는 대로 전기전도도를 정확하게 조절할 수 있다.

불순물 주입을 하지 않은 순수 반도체의 전기적 특성을 결정하는 전자와 정공 농도 n_i 는

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp(-E_g / 2kT) [\text{cm}^{-3}]$$

이다. 즉, 반도체의 원자 배열 구조에 의해 결정되는 재료의 고유한 특성(E_g, N_C, N_V)과 온도(T)에 의해 결정되므로, 반도체 재료를 바꾸지 않는 한 전기적 특성의 조절이 불가능하다. 특히 온도 변화에 매우 민감하므로 안정된 전기적 특성이 필요한 반도체 소자와 집적회로 및 시스템의 성능 확보가 불가능하다.

그러나 주기적 원자 배열을 갖는 반도체 구성 원자가 아닌 다른 불순물 원소(dopant atom)의 종류와 농도를 조절함으로써 전기전도도(electrical conductivity)의 정확한 조절이 가능하며, 외부에서 인가한 전압 등 바이어스(bias)에 대해 넓은 온도 범위에서 안정된 전기적 특성을 보장할 수 있다. 즉, 반도체의 전기적 특성을 나타내는 전류밀도는

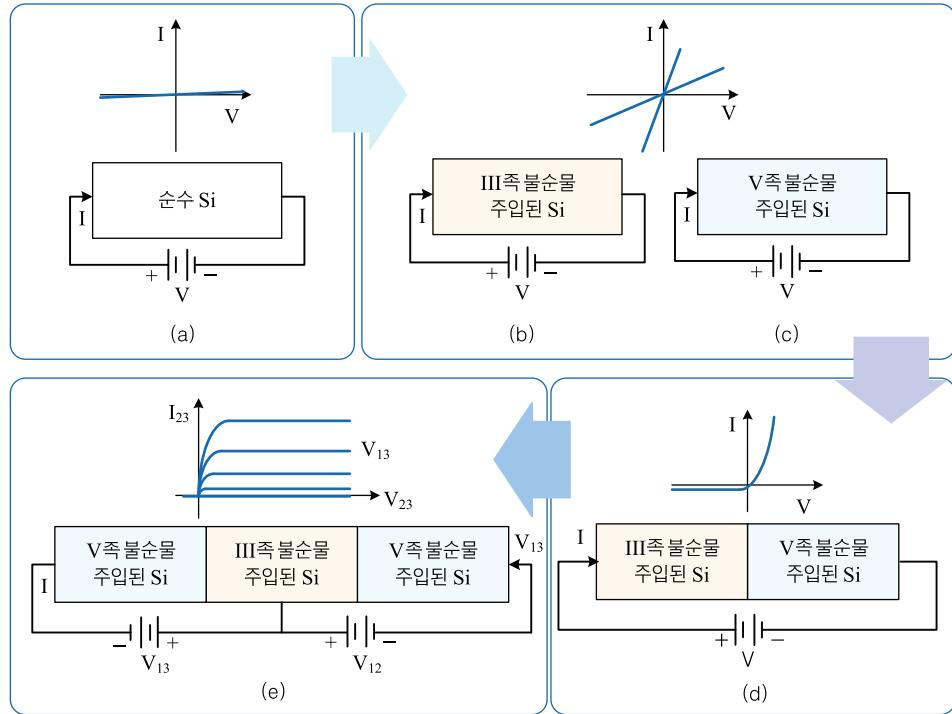
$$J = \sum Q' N v = \sum Q' (N + \delta N) v [\text{A}/\text{cm}^2]$$

로 나타낼 수 있으며, 따라서 전기적 특성은 다음과 같은 방법을 통해 조절이 가능하다.

- 반도체 재료의 선택에 의한 조절 Q', N_o, v
- 불순물 주입에 의한 조절 Q', N_o
- 접합을 이용한 조절 Q', N_o, v
- 인가한 바이어스(전기, 빛, 압력, 기타)에 의한 조절 $Q', \delta N_o, v$

또한 순수 반도체의 경우 전자와 정공 농도가 항상 동일하던 것과는 달리, 불순물의 종류에 따라 전도 대역의 전자 농도가 가전자 대역의 정공 농도보다 많은 n형 반도체와 가전자 대역의 정공

농도가 전도 대역의 전자 농도보다 많은 p형 반도체를 만들어 전류 형성에 주도적으로 작용하는 다수 캐리어(majority carrier)를 조절할 수도 있다. 여기에 서로 다른 불순물을 주입한 둘 또는 세 조각의 반도체를 접합함으로써 인가 전압(electrical bias)에 따른 전기전도도의 크기뿐 아니라 전류의 방향성 조절과 신호의 증폭도 가능하다. [그림 4-7]에 그 특성을 요약하였다.



[그림 4-7] 불순물 주입과 서로 다른 불순물 주입 반도체의 접합에 의한 전기적 특성 조절
 (a) 순수 반도체의 고유 캐리어에 의한 전류–전압 특성 (b) III족 불순물에 의한 전류–전압 특성 조절
 (c) V족 불순물에 의한 전류–전압 특성 조절 (d) 접합을 이용한 전류–전압 특성의 방향성 조절
 (e) 다중 접합을 이용한 3단자 반도체 소자와 신호의 증폭 특성

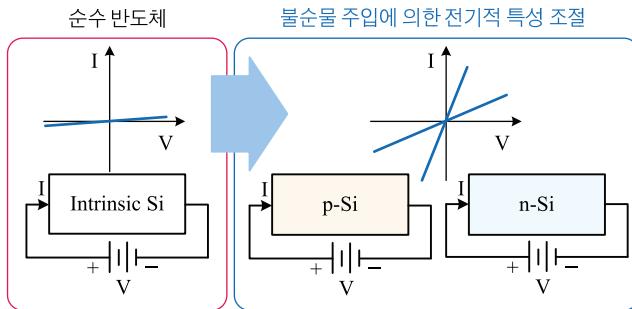
4.3.1 전기적 특성 조절을 위한 불순물 주입

반도체는 주기적으로 배열된 원자들의 농도(다이아몬드 구조인 Si의 원자밀도~ $6 \times 10^{22} [\text{cm}^{-3}]$)에 비해 아주 적은 농도($N_{imp} = 10^{15} \sim 10^{20} [\text{cm}^{-3}]$)의 불순물을 주입(doping)함으로써, 반도체 고유의 특성(E_g , $q\chi$, N_C , N_V)은 그대로 유지하면서도 전기전도도 등의 전기적 특성 조절이 가능한 것이 큰 장점이다. 여기서 다루는 불순물(dopant)은 반도체를 구성하는 고유의 원자 이외에 전기적 특성 조절을 위해 종류와 농도를 엄격하게 조절하여 의도적으로 주입한 불순물을 의미한다.

반도체의 전기적 특성은

- 주입하는 불순물의 종류(도너와 억셉터)
- 불순물의 농도(N_{imp} [cm⁻³]) 도너 농도(N_D), 억셉터 농도(N_A)

를 달리함으로써 [그림 4-8]에 비교하여 나타낸 바와 같이 전기적 특성을 원하는 대로 정확히 조절할 수 있고, 넓은 온도 범위에서 일정하게 그 특성을 유지할 수 있다. 불순물을 주입하지 않은 순수 반도체와 달리 전기적 특성 조절을 위해 불순물을 주입한 반도체를 불순물 주입 반도체(doped semiconductor) 또는 외인성 반도체(extrinsic semiconductor)라고 한다.



[그림 4-8] 반도체의 전기전도성 조절을 위해 불순물을 주입한 반도체의 전기적 특성

반도체의 전기적 특성을 조절하기 위해 주입된 불순물은 주기적으로 배열된 반도체 구성 원자의 일부를 대체하며, 불순물을 주입하는 제조공정을 통해 분포와 농도가 결정되면 반도체를 사용하는 동안에는 불순물의 농도와 분포에는 변화가 없다. 즉, 불순물 원자는 반도체 구성 원자가 주기적으로 배열되어 있던 위치를 대체한 뒤 그 위치가 변하지 않으며, 불순물의 농도는 반도체 구성 원자들의 농도에 비해 매우 작은 값임을 기억해 두어야 한다.

불순물 주입을 통한 전자와 정공의 생성

반도체의 전기적 특성 조절에 사용되는 반도체 구성 원소 이외의 원소를 불순물 원소 또는 간단히 불순물(dopant, impurity atom)이라고 한다. 불순물에는 두 종류가 있다.

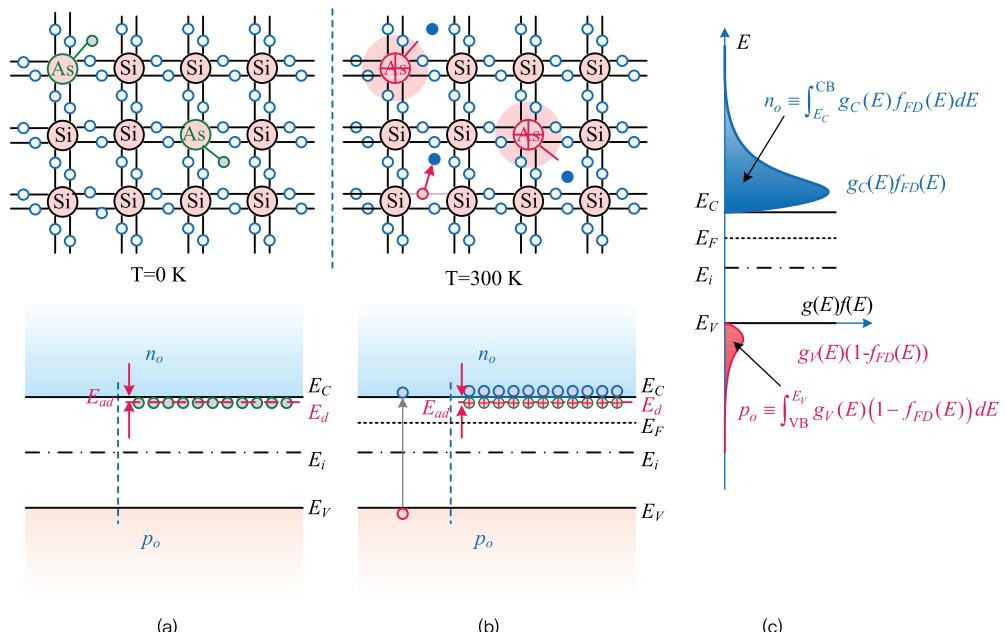
- 전도 대역에 전자를 생성하는 전자 생성 원소(도너, 전자 주개, 도너 원자)
- 가전자 대역에 정공을 생성하는 정공 생성 원소(억셉터, 전자 받개, 억셉터 원자)

■ 전자 생성 원소인 도너와 도너 준위 E_d

집적회로 구현에 가장 널리 사용되는 주기 구조 반도체인 Si(3주기 4족 원소)는 4개의 가전자(valence electrons)가 인접한 Si 원자 4개와 공유결합을 이루어 안정된 원자 배열 구조를 형성한다. 여기에 Si 원자 밀도보다 낮은 농도의 5족 원소(인(P), 비소(As) 등)를 주입하여 열처리

(annealing)하면, 이 원자가 공유결합하고 있는 Si 원자를 대체(substitutional impurity)하여 공유결합을 형성한다. 그러면 [그림 4-7(a)]에 나타낸 바와 같이 공유결합에 사용된 전자 4개를 제외하고 전자 1개가 남는다. 앞서 순수 반도체에서 설명한 바와 같이 공유결합에 사용된 전자가 그 결합을 끊고 전도 대역의 자유 전자가 되는 과정은 가전자 대역의 전자가 전도 대역으로 여기 되는 것과 같다. 또한 이를 위해서는 금지 대역폭인 E_g 의 큰 에너지가 필요하고, 이런 과정으로 생성된 전자와 정공을 고유 캐리어라고 한다고 설명하였다.

그런데 Si에 5족의 불순물이 주입된 경우 불순물 원자의 제일 바깥 궤도(최외각) 전자 5개 중 결합에 사용되지 않고 남은 전자 1개는 원자와의 결합이 약하여 쉽게 자유 전자가 될 수 있다. 이를 에너지 대역도에 표시하면 [그림 4-9]와 같다. 이와 같이 여분의 전자로 인해 쉽게 전도 대역에 전자를 생성하는 5족 불순물 원자를 전자 생성 원자 또는 도너 원자(donor atom)라고 하며, 여분의 전자가 결합을 끊고 전도 대역의 자유 전자가 되는 데 필요한 에너지를 도너의 활성화에너지 또는 이온화에너지(E_{ad} , Donor activation / ionization energy)라고 한다. 이러한 에너지 관계를 나타내기 위해 전도 대역에서 $E_{ad} (=E_C - E_d)$ 만큼 떨어진 에너지 준위에 E_d 로 표시하고, 이를 도너 준위(E_d , donor level)라고 한다.



[그림 4-9] 도너의 이온화에 의한 전도 대역 전자 생성 과정($E_C - E_d \equiv E_{ad}$: 도너의 이온화에너지)

- (a) 주입된 도너가 이온화되기 전의 원자결합 모델과 에너지 대역도
- (b) 주입된 도너가 이온화된 후의 원자결합 모델과 에너지 대역도
- (c) 도너가 주입되어 전도 대역 전자 농도가 증가한 n형 반도체의 전자와 정공 분포

도너 원자는 [그림 4-9(a)]에 나타낸 바와 같이 여분의 전자가 결합을 끊고 자유전자가 되기 전(이온화 또는 활성화되기 전)에는 전기적으로 중성이나, 이온화된 후에는 [그림 4-9(b)]에 나타낸

바와 같이 전도 대역에 자유전자가 생성되고 도너 원자는 양의 전하를 띠게 된다. 이를 도너 준위에 적용하면, 이온화되기 전과 같이 도너 준위 E_d 에 전자가 채워져 있어 전기적으로 중성인 상태다. 그리고 전자가 전도 대역으로 여기되어 이온화된 후에는 E_d 가 비어있는 상태로서, 이때 도너 원자는 양의 전하를 띠고 공간적으로 고정된 위치에 존재하게 된다.

도너가 주입된 반도체는 원자간 공유결합에 사용되지 않은 도너 원자에 있는 여분의 전자로 인해 낮은 온도의 열에너지로도 전도 대역에 전자가 쉽게 생성되나, 가전자 대역의 정공 생성에는 기여하지 않는다. 따라서 순수 반도체와 달리 전도 대역의 전자 농도가 가전자 대역의 정공 농도보다 훨씬 높은 반도체인 n형 반도체($n_o|_{dotor} > p_o|_{donor}$, $n_o p_o|_{donor} = n_i^2$)를 만드는 데 활용된다([그림 4-9(c)]). 이러한 과정은 이후 반도체의 전기적 특성을 이해하는 데 중요한 개념이므로 잘 이해해야 한다.

도너 원자의 이온화에너지 E_{ad} 는 반도체 및 억셉터 원자의 종류에 따라 다르나 주입한 원자가 전도 대역에 전자를 생성하기 위해서는 E_{ad} 가 작을수록 좋으며, 대체로 $E_{ad}=5\sim10$ [meV]인 원소를 도너 원자로 택한다. E_{ad} 가 작은 도너를 얇은 준위 도너(shallow donor)라고 부르며, n형 불순물로 사용하는 원자는 모두 얇은 준위 도너로 가정해도 좋다. 또한 도너로서 효과적인 원소는 이온화에너지가 작아서 낮은 온도에서도 전자의 생성이 쉬워야 하고, 제조공정이 끝난 뒤 주입된 도너 원자가 격자점으로부터 이동하지 않는 원소가 좋다.

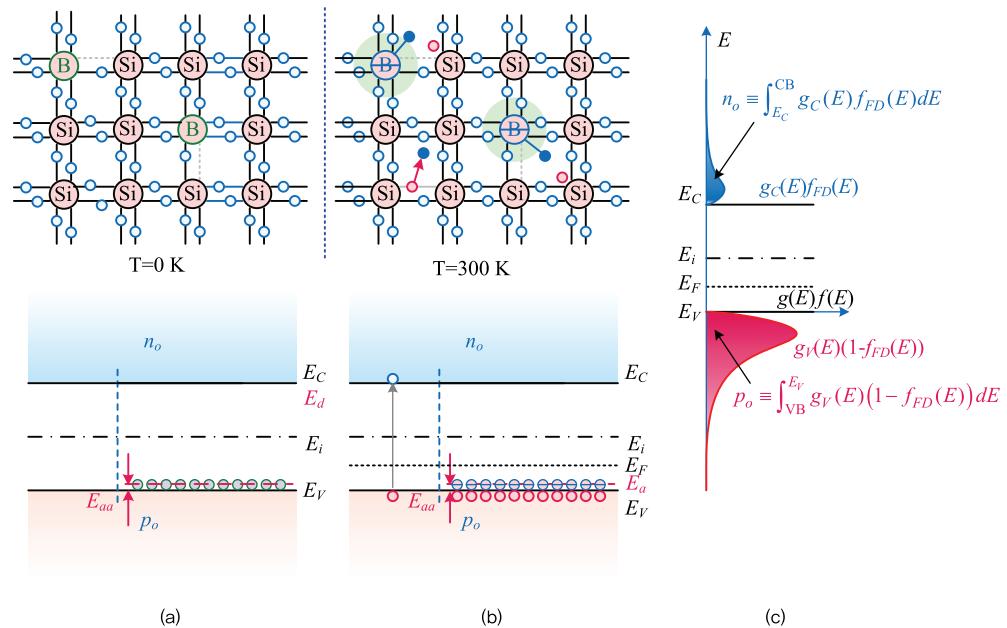
■ 정공 생성 원소인 억셉터와 억셉터 준위 E_a

Si 원자 밀도에 비해 작은 농도의 3족의 불순물 원소(붕소(B), 인듐(In) 등)을 주입하여 열처리하면, 이 원자가 공유결합하고 있는 주기 배열의 Si 원자를 대체하여 Si 원자와 공유결합을 형성하면서 원래의 주기성을 그대로 유지한다. 따라서 [그림 4-10(a)]에 나타낸 바와 같이 공유결합에 사용 가능한 전자 3개 외에 전자 1개가 추가로 필요한 상태다.

즉, Si에 3족의 불순물이 주입된 경우 불순물 원자의 최외각 전자 3개 외에 결합에 사용하여 안정된 결합 상태를 유지하기 위해 1개의 전자가 추가로 필요하다. 따라서 인접한 원자의 전자 중 결합에 사용하지 않은 가전자 대역의 전자를 이용하여 완전한 공유결합을 이룬다. 그런데 공유결합을 이루지 않은 가전자 대역의 전자는 원자와 결합이 약하며, 에너지 대역도에 표시하면 [그림 4-10]과 같다. 이와 같이 가전자 대역의 전자를 잃은 인접 원자의 빈자리(정공)는 이동이 자유로운 정공으로 작용한다. 가전자 대역에 쉽게 정공을 생성하는 3족 불순물 원자를 정공 생성 원자 또는 억셉터 원자(acceptor atom)라고 하며, 가전자 대역에서 전자가 결합을 끊고 정공을 생성하는 데 필요한 에너지를 억셉터의 활성화에너지 또는 이온화에너지(E_{aa} , acceptor activation, ionization energy)라고 한다. 이러한 에너지 관계를 나타내기 위해 가전자 대역에서 $E_{aa}(=E_a - E_V)$ 만큼 떨어진 에너지 준위에 E_a 로 표시하고 이를 억셉터 준위(E_a , acceptor level)라고 한다.

억셉터 원자는 인접한 원자로부터 가전자 대역 전자를 받기 전(이온화 또는 활성화되기 전 [그림

4-10(a)]에는 전기적으로 중성인 상태이고, 전자를 받아 정공이 생성되어 이온화된 뒤에는, [그림 4-10(b)]에 나타낸 것과 같이 음의 전하를 띠게 된다. 이를 억셉터 준위에 적용하면, 이온화 되기 전과 같이 억셉터 준위 E_a 에 전자가 비어 있으면 전기적으로 중성이고, 가전자 대역의 전자 를 받고 정공을 생성하여 이온화된 뒤에 E_a 는 전자에 의해 채워진 상태로서 음의 전하를 띠게 된다. 억셉터가 주입된 반도체의 경우 억셉터 원자의 부족한 전자로 인해 가전자 대역의 정공은 생성되나 전도 대역의 전자의 생성에는 기여하지 않는다. 따라서 순수 반도체와 달리 정공 농도가 전자 농도보다 높은 p형 반도체($p_o|_{\text{acceptor}} > n_o|_{\text{acceptor}}$, $n_o p_o|_{\text{acceptor}} = n_i^2$)를 만드는데 활용된다([그림 4-10(c)]).



[그림 4-10] 억셉터의 이온화에 의한 가전자 대역 정공 생성($E_a - E_V \equiv E_{aa}$: 억셉터의 이온화에너지)

- (a) 주입된 억셉터가 이온화되기 전의 원자 결합 모델과 에너지 대역도
- (b) 주입된 억셉터가 이온화된 후의 원자 결합 모델과 에너지 대역도
- (c) 억셉터가 주입되어 가전자 대역 정공 농도가 증가한 p형 반도체의 정공과 전자 분포

억셉터 원자의 이온화에너지는 반도체 및 억셉터 원자의 종류에 따라 다르나 주입한 원자가 가전자 대역에 정공을 생성하기 위해서는 E_{aa} 가 작을수록 좋으므로, 대체로 $E_{aa} = 5 \sim 10 \text{ [meV]}$ 인 원소를 억셉터 원자로 택한다. E_{aa} 가 작은 억셉터를 얇은 준위 억셉터(shallow acceptor)라고 부르며, p형 불순물로 사용하는 원자는 모두 얇은 준위 억셉터로 가정해도 좋다. [표 4-5]에 Si 반도체에 사용되는 불순물의 종류와 이온화에너지를 요약하여 나타내었다.

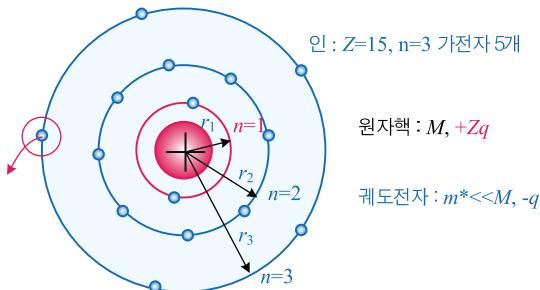
[표 4-5] Si에 주입된 불순물과 실험적으로 알려진 이온화 에너지

도핑에 사용되는 불순물	불순물 원소	E_{ad} 또는 E_{aa} [eV]	
		Si	Ge
도너 원자	도너 준위 E_d	P (3주기 5족)	0.045
이온화 전 : 중성 이온화 후 : $+q$	전자 존재 비어 있음	As (4주기 5족)	0.050
액셉터 원자	액셉터 준위 E_a	B (2주기 3족)	0.045
이온화 전 : 중성 이온화 후 : $-q$	비어 있음 전자 존재	Al (3주기 3족)	0.060
· 작은 이온화에너지를 가진 얇은 준위 도너와 액셉터		$E_{aa} \& E_{ad} \ll E_g / 2$	
· 큰 이온화에너지를 가진 깊은 준위 도너와 액셉터		$E_{aa} \& E_{ad} \gg kT$	

참고 4-1

불순물의 이온화에너지 이해를 위한 인(P)의 수소원자 모델

외인성 반도체로서 전기적 특성 조절을 위해 주입하는 불순물 원자의 이온화에너지는 수소원자 모델을 사용하여 그 개념을 이해할 수 있다. [그림 4-11]에 요약한 3주기 5족 원소인 인(P Z=15)을 Si(3주기 4족, Z=14)에 불순물로 주입한 경우 도너로서 개략적인 이온화에너지는 다음과 같은 과정을 통해 이해할 수 있다.



[그림 4-11] 수소원자 모델을 이용한 불순물 원자의 이온화에너지 개념

(1) 핵으로부터 n 번째 궤도에서 등속 원운동하는 전자의 운동방정식(반지를 r_n , 속도 v_n , 유전상수 ϵ)

- 구심력(F_{ne}) 원자핵(질량: M , $Q = +Zq$)과 궤도전자(m^* , $-q$)의 정전기적 인력(Coulombic force)

$$F_{ne} = -\frac{Qq}{4\pi\epsilon r_n^2} = -\frac{Zq^2}{4\pi\epsilon r_n^2} \text{ [N]}$$

- 궤도운동에 의한 원심력(F_{nc})

$$F_{nc} = \frac{m^* v_n^2}{r_n} \text{ [N]}$$

- 등속 원운동 $\rightarrow F_{n,net} = F_{ne} + F_{nc} = 0$

$$\vec{F}_{n,net} = \vec{F}_{ne} + \vec{F}_{nc} = 0 \text{ [N]}$$

$$-\frac{Zq^2}{4\pi\epsilon r_n^2} = -\frac{m^* v_n^2}{r_n}$$

(2) n 번째 궤도의 양자화된 에너지 준위와 양자화된 각운동량의 관계

$$p_{\theta n} = m^* v_n r_n = n\hbar \rightarrow (m^* v_n)^2 = \left(\frac{n\hbar}{r_n}\right)^2$$

(3) 전자의 양자화된 원운동 궤도 반지름(r_n), 속도(v_n)

$$\frac{Zq^2}{Kr_n^2} = \frac{1}{m^* r_n} \cdot \frac{n^2 \hbar^2}{r_n^2}$$

$$\begin{cases} r_n = \frac{K\hbar^2}{m^* Zq^2} \cdot n^2 = a_o \cdot n^2, & a_o = \frac{K\hbar^2}{m^* q^2} \cong 0.5279 A \\ v_n = \frac{n\hbar}{m^* r_n} = \frac{Zq^2}{K\hbar} \cdot \frac{1}{n}, & K \equiv 4\pi\epsilon \end{cases}$$

보어 반지름
 n 주양자수

(4) 수소원자 모델과 전자의 에너지

- 운동에너지 $E_{kn} = \frac{1}{2} m^* v_n^2 = \frac{m^* Z^2 q^4}{2K^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$ [eV]

- 정전기적 위치에너지 $E_{pn} = -\frac{Zq^2}{Kr_n} = -\frac{m^* Z^2 q^4}{K^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$ [eV]

- n 번째 궤도 양자화된 전자의 총 에너지

$$E_n = \frac{1}{2} m^* v_n^2 - \frac{Zq^2}{Kr_n} = \frac{m^* Z^2 q^4}{2K^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} - \frac{m^* Z^2 q^4}{K^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{m^* Z^2 q^4}{2K^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

$$= E_1 \cdot \left(\frac{Z}{K}\right)^2 \frac{1}{n^2}$$
 [eV]

$$E_1 \equiv -\frac{m^* Z^2 q^4}{2K^2 \hbar^2} = -13.6 \left(\frac{Z}{K}\right)^2$$
 [eV] 바다 상태 에너지 준위

(5) 궤도전자의 이온화에너지 E_{ad} (또는 E_{aa})

- n 번째 궤도로부터 m 번째 궤도로 여기되는 데 필요한 에너지

$$\Delta E_{mn} = \hbar\omega_{mn} = h\nu_{mn} = |E_m - E_n| = E_1 \left| \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right|$$
 [eV]

- 주기 n 인 원자의 최외각 전자가 자유전자($m=\infty$)가 되는 데 필요한 에너지(E_{ad} 또는 E_{aa})

$$E_{ad}(E_{aa}) = \Delta E_{n\infty} = |E_n - E_\infty| = \left| E_1 \left(\frac{1}{\infty^2} - \frac{1}{n^2} \right) \right|$$

$$= \frac{|E_1|}{n^2} = \frac{13.6}{n^2} \left(\frac{Z}{K}\right)^2$$
 [eV]

(6) 인의 이온화에너지 $E_{ad}|_P$

$Z=15$ 의 원자인 인은 도너로 이온화되는 제일 바깥 궤도의 전자를 제외한 14개의 전자에 의해 핵의 양의 전하가 정전기적으로 차폐(screen)된 형태다. 따라서 도너로서 이온화되는 전자에 대해서 핵은 $+q$ 의 전하를 띤 것으로 해석하여 이온화에너지를 예측할 수 있다. 즉, Si의 유전상수는 $\epsilon_{Si} \cong 11.7\epsilon_0$ 이므로, 인의 3 번째 궤도에 존재하는 전자가 이온화되는 데 필요한 에너지 $E_{ad}|_P$ 는