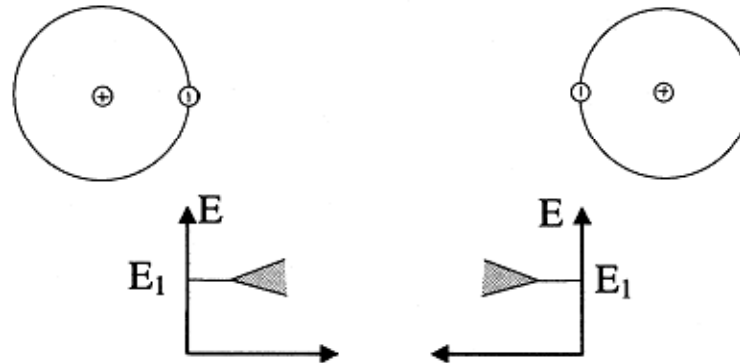


## 3.1 허용 에너지 밴드와 금지대

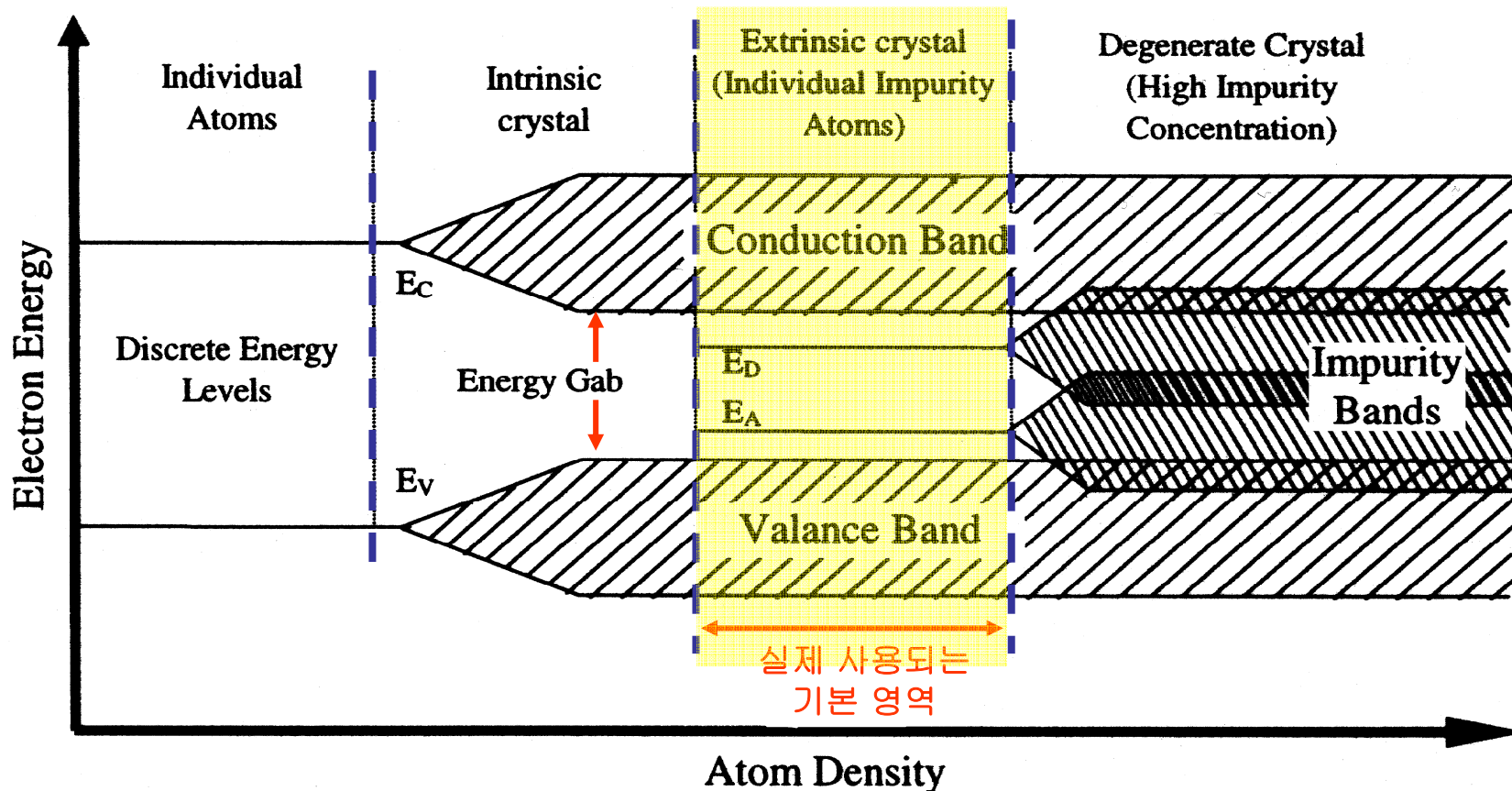
### 3.1.1 에너지 밴드(energy band)의 형성

✓ Potential Well Problem의 결과와 배타원리의 결합



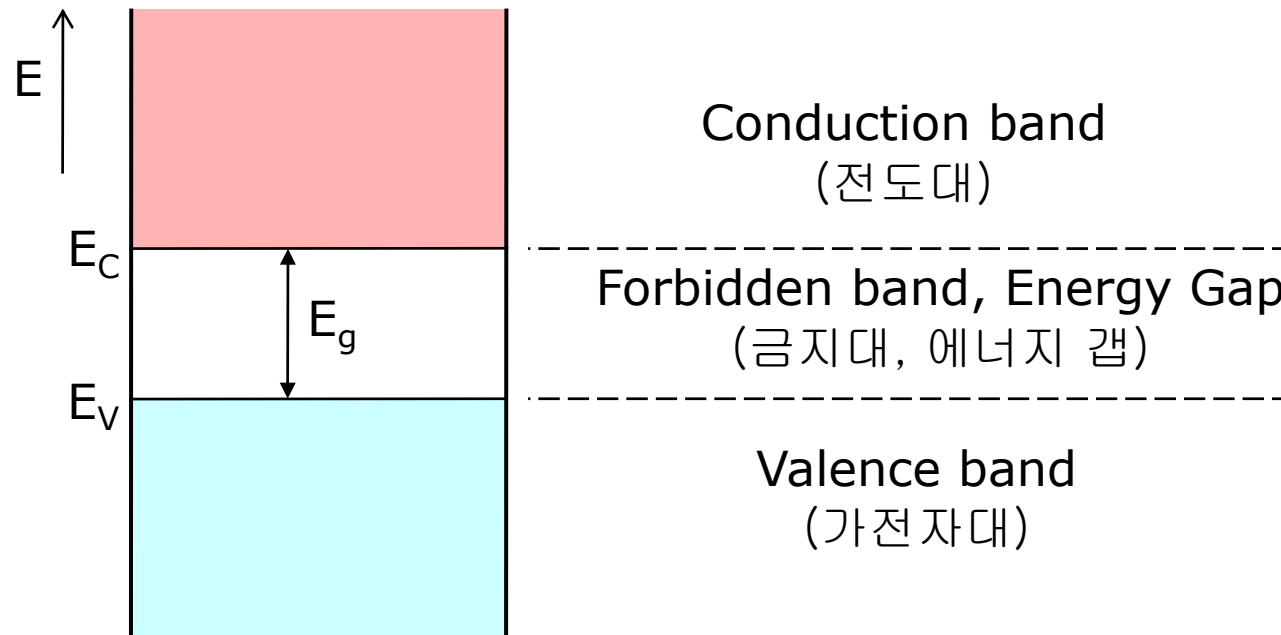
- 원자간의 거리( $r$ )가 클 때에는 각각의 원자는 서로 영향을 주지 않으므로 각 원자 속의 전자는 같은 **energy**( $E_1$ )을 가질 수 있다.
  - 2개의 원자는 물리적으로 각기 독립적인 시스템에 속해 있음
- 원자간의 거리( $r$ )가 작아지면 원자들은 서로 영향을 받게 되고 따라서 물리적으로 하나의 시스템이 된다.
- 이제 **Pauli**의 배타원리가 작용하게 되고 따라서 각각의 원자 속에 있는 전자들의 **energy**는 서로 다른 값( $E_1 \pm \Delta E$ )을 가지게 된다.
- 따라서 전자가 고체 내에서 전자가 가질 수 있는 **energy** 값은 **discrete**한 단일 **level**( $E_1$ )이 아닌 유한한 폭을 가지며 **continuous**한 **band**( $E_1 - \Delta E \sim E_1 + \Delta E$ )가 된다.

✓ Energy Band의 완성



< from H. F. Wolf, *Silicon Semiconductor Data*, vol. 9, Pergamon Press >

✓ 에너지 대역도(Energy Band Diagram)



$E$  : 전자의 potential energy [eV]

$E_C$  : lowest edge of conduction band

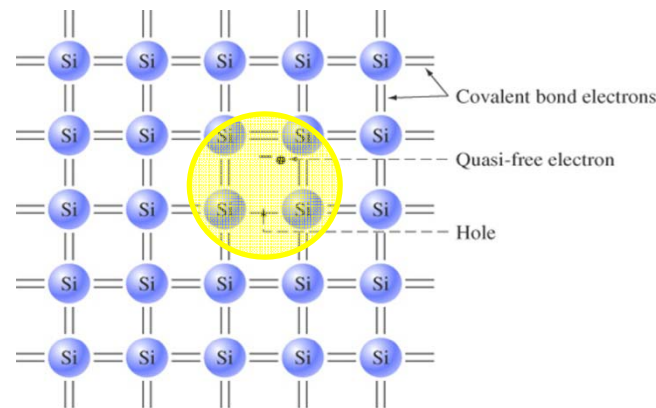
$E_V$  : highest edge of valence band

$E_g$  : energy gap (Si : 1.12eV, 300°K)

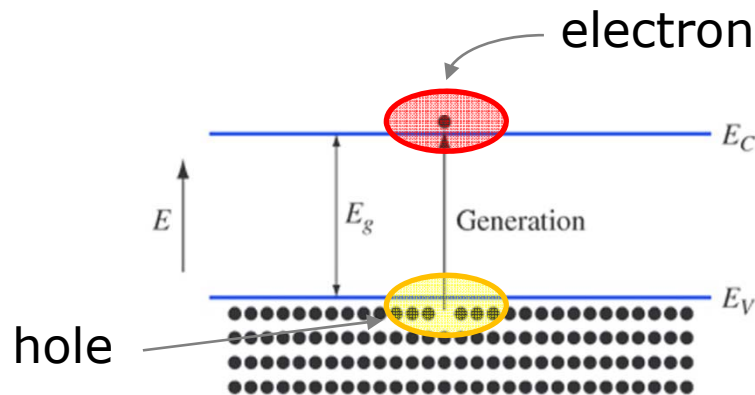
## 3.2 고체의 전기 전도(傳導, conduction)

### 3.2.1 에너지 밴드와 결합 모델

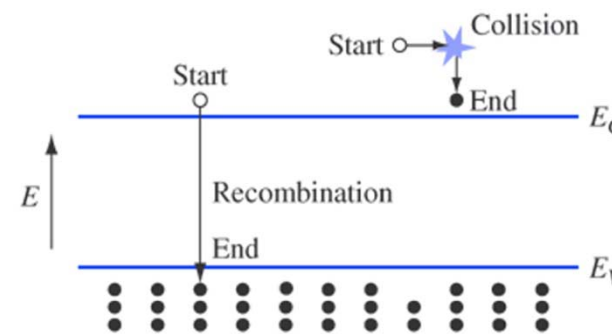
✓electron-hole pair(EHP)



✓electron-hole pair(EHP)의 생성(generation)과 재결합(recombination)



<EHP 생성(generation)>



<EHP 재결합(recombination)>

# 3 장 고체양자이론의 입문

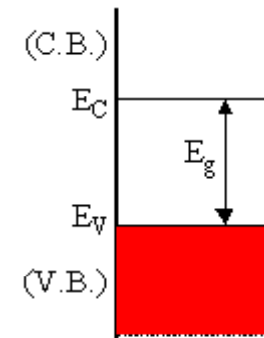
✓ 열에 의한 electron-hole pair(EHP)의 생성

(1)  $T = 0[^\circ K]$  일 때

모든 electron은 원래의 궤도에 존재하므로 energy bang diagram에서 볼 때 모두 V.B.에 위치하게 된다.

즉, V.B.는 전자로 꽉 차게 되므로 hole이 없고

C.B.에는 전자가 하나도 없어서 비어있게 된다.

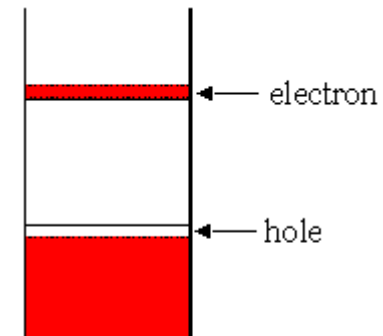


$T = 0^\circ K$

(2)  $T = 300[^\circ K]$  일 때

궤도 상의 전자는 주위 온도로부터 energy를 받아 원래 궤도를 이탈하여 준자유 전자(carrier로서의 'electron')이 되고 이는 C.B.에 위치하게 된다.

그리고 전자가 빠져나간 빈 자리는 'hole'이 남겨지게 된다.



$T = 300^\circ K$

# 상온(상온, room temperature,  $27[^\circ C]$ , 또는  $300[^\circ K]$  )에서

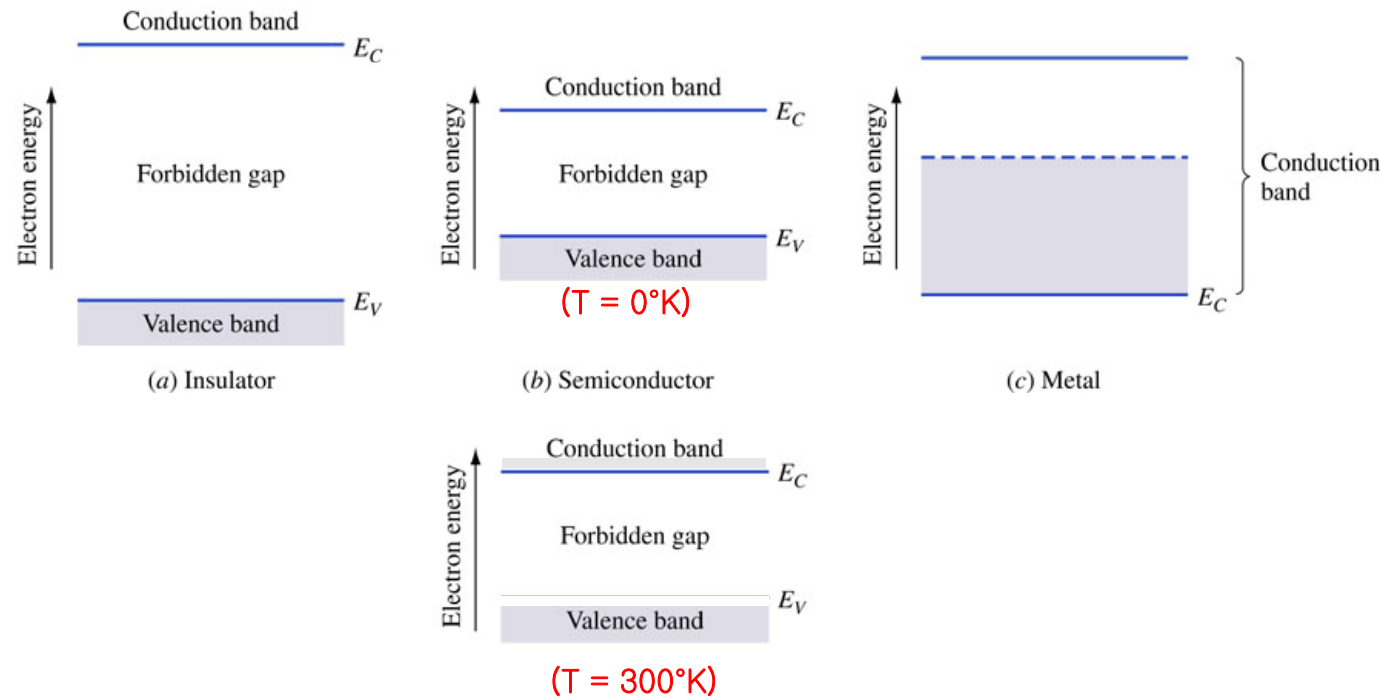
Si atom의 농도 :  $\sim 10^{23}$  개/ $cm^3$

EHP의 농도 :  $\sim 10^{10}$  개/ $cm^3$

# 3 장 고체양자이론의 입문

## 3.2.5 금속, 절연체, 반도체

✓ 절연체, 반도체 및 금속의 에너지 밴드 구조



✓ energy band 구조와 도전 특성 간의 관계

분류	$E_g$ 의 크기	특 성
절연체	매우 크다	Energy band 간에 전자의 이동이 매우 어렵다.
반도체	중간	열, 빛, 혹은 기타의 물리적 자극으로 전자가 V.B.에서 C.B.로 이동이 쉽다.
도체(금속)	0 (F.G. 없음)	전자의 이동이 자유롭다.

## 3.4 상태밀도함수(Density of State Function)

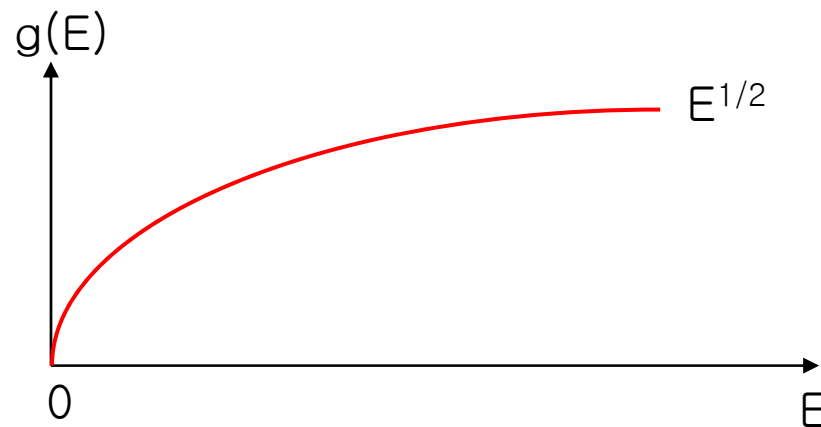
### 3.4.1 수학적 유도

#### (1) 상태밀도함수의 정의

- 주어진 energy,  $E$ , 에서 electron이 가질 수 있는 energy state의 밀도를 나타내는 함수로서 그 단위는 [상태수/eV cm<sup>3</sup>]
- 즉, 단위 체적 내에서 energy 구간 1eV 당 전자가 가질 수 있는 energy 상태의 밀도를 나타내는 함수

#### (2) 상태밀도함수 : $g(E)$

- 정확한 함수 형태는 매우 복잡하며 대략  $E^{1/2}$  에 비례하는 것으로 알려져 있음.
- $g(E)$ 의 그래프



\*  $g(E) dE$  : energy 구간,  $dE$ , 사이에 있는 energy 상태의 밀도 [states/cm<sup>3</sup>]

## 3.4.2 반도체로의 확대

i)  $E > E_c$  일 때

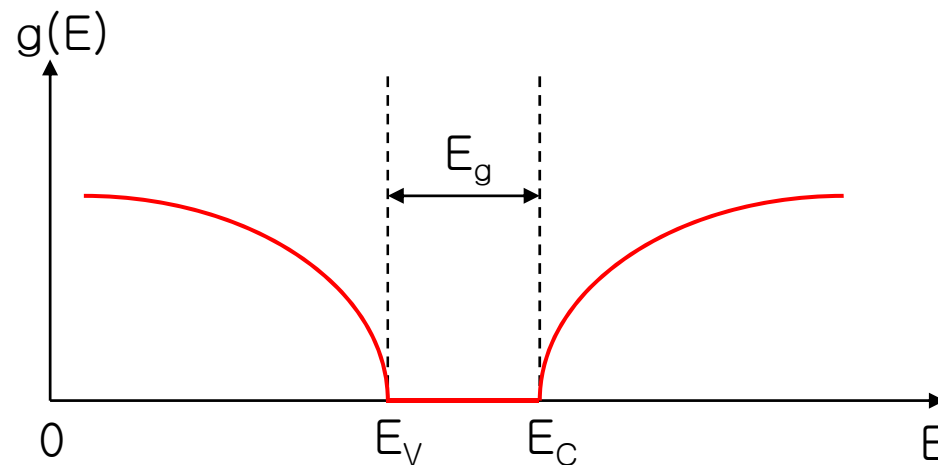
C.B. 내이므로 전자가 가질 수 있는 energy 상태가 존재하므로  $g(E) \propto E^{1/2}$

ii)  $E_v \leq E \leq E_c$  일 때

금지대 내 이므로 전자가 가질 수 있는 energy 상태는 0이므로  $g(E) = 0$

iii)  $E < E_v$  일 때

V.B. 내이므로 전자가 가질 수 있는 energy 상태가 존재하므로  $g(E) \propto E^{1/2}$



\* V.B.에서는 electron 대신 hole에 관한 의미



## 3.5 통계역학(統計力學, Statistical Mechanics)

### 3.5.1 통계 법칙

종 류	구별성	점유의 제한성
Maxwell-Boltzmann	구별 가능	각 energy 상태에 허용되는 입자 수에 제한 없음
Bose-Einstein	구별 불가능	각 energy 상태에 허용되는 입자 수에 제한 없음
Fermi-Dirac	구별 불가능 파동 특성 배타원리	$E$ 와 $E+\Delta E$ 사이에 허용된 energy level의 개수에 제한을 받음  $E$ 와 $E+\Delta E$ 사이에 허용된 energy level에 들어갈 수 있는 입자의 개수에 제한을 받음

\* electron, hole : Fermi-Dirac Statistics

## 3.5.2 Fermi-Dirac 확률함수

### ✓ Fermi-Dirac Probability Distribution Function

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - E_F) / kT]}$$

단,  $E$  : energy [eV]

$E_F$  : Fermi level [eV]

$k$  : Boltzmann 상수 ( $\approx 8.62 \times 10^{-5}$  [eV/°K])

$T$  : Temperature [°K]

- . 온도  $T$  [°K]에서  $E$  [eV]를 갖는 energy level이 전자에 의해서 채워질 확률

- . 항상  $0 \leq f(E) \leq 1$

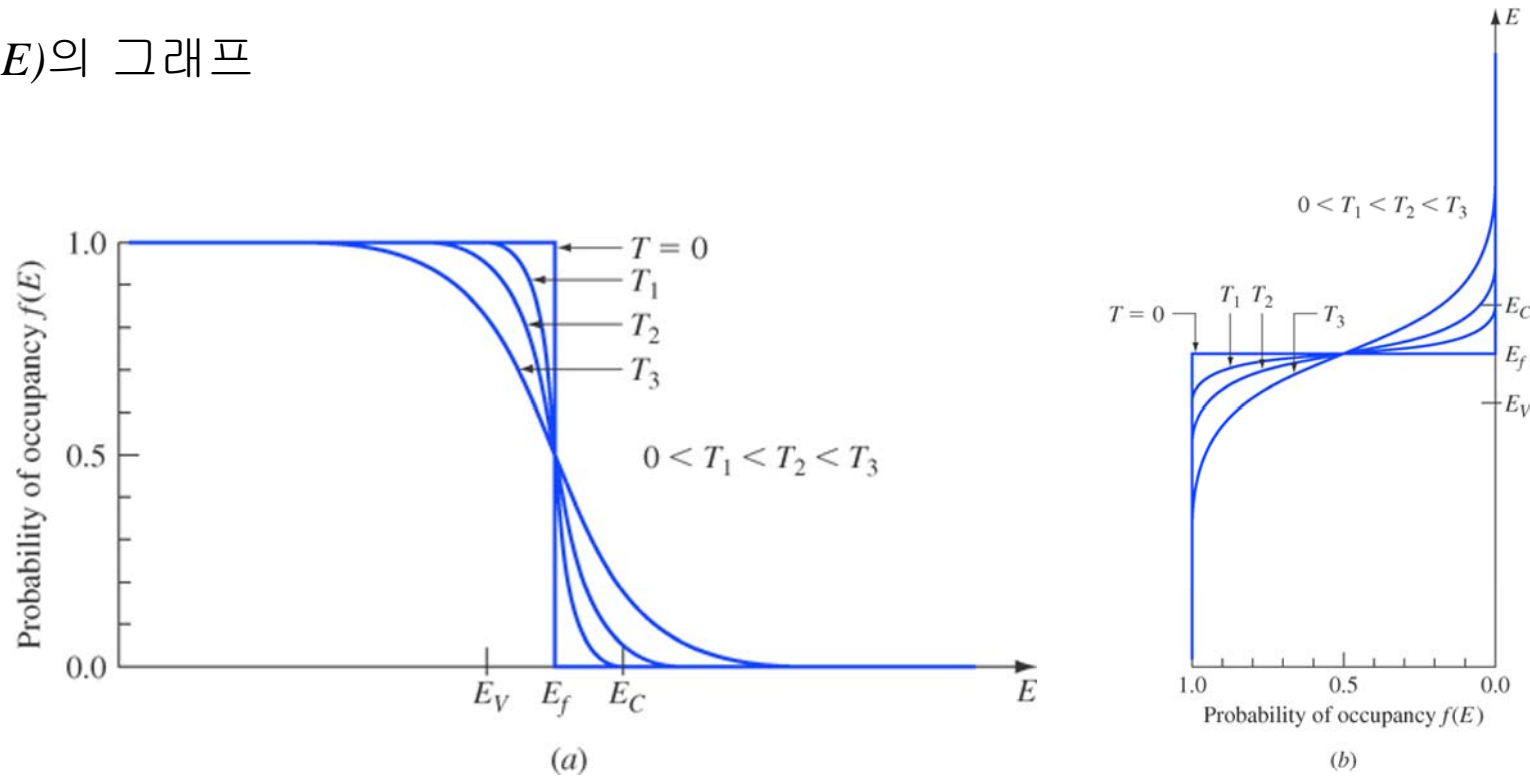
### ✓ Fermi level : $E_F$

- . 그 level이 전자에 의해서 채워질 확률이 항상  $1/2$ 인 energy level

$$f(E_F) = \frac{1}{1 + \exp[(E_F - E_F) / kT]} = \frac{1}{1+1} = \frac{1}{2}$$

# 3 장 고체양자이론의 입문

✓  $f(E)$ 의 그래프



✓ Maxwell-Boltzmann 근사

$$e^{(E-E_F)/kT} \gg 1 \text{ 일 때, } f(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - E_F)/kT]} \approx e^{-(E-E_F)/kT}$$

✓ Hole과  $f(E)$ 에 대한 검토

- .  $f(E)$  : energy level, E가 전자에 의해서 채워질 확률
- .  $1-f(E)$  : energy level E가 전자에 의해서 채워지지 않을 확률  
 ⇒ hole에 의해 채워질 확률

$$\begin{aligned}
 1 - f(E) &= 1 - \frac{1}{1 + \exp[(E - E_F) / kT]} \\
 &= \frac{\{1 + \exp[(E - E_F) / kT]\} - 1}{1 + \exp[(E - E_F) / kT]} \\
 &= \frac{\exp[(E - E_F) / kT]}{1 + \exp[(E - E_F) / kT]}
 \end{aligned}$$

- .  $f(E)$ 의 graph

