

# 제12장 고체상태

## 서론

결정 및 비정질의 형성

자유전자 기체모형 ; 전기전도도, 열전도도

고체의 띠 이론(band theory) ; 도체, 부도체, 반도체, p-n 접합

고온 초전도체

## 12.1 고체내의 결합

결정 ; 결정고체, 원자들의 규칙적인 배열을 통한 주기적인 구조

이온결합 ; NaCl

공유결합 ; 다이아몬드

금속결합 ; Cu, Na, Ag

### 이온성 고체(Ionic Solids)

이온 간의 Coulomb 상호작용

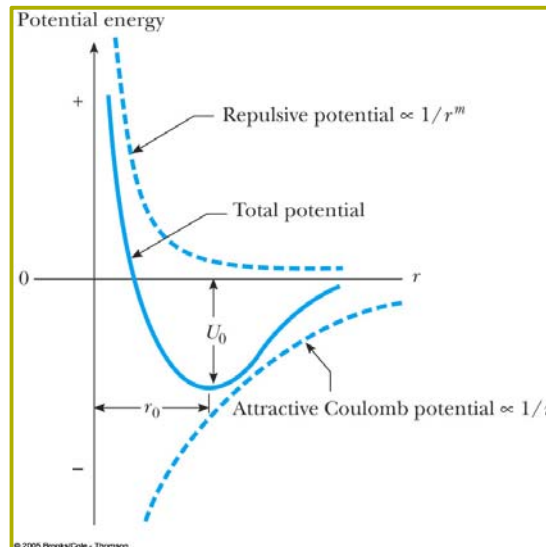
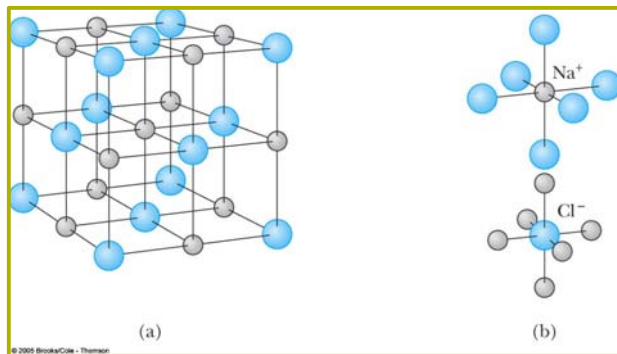
$$U_{\text{attractive}} = -\alpha k \frac{e^2}{r}$$

◆  $\alpha$  ; Madelung 상수

◆  $\alpha = 1.7476$  ; for NaCl

$$U_{\text{total}} = -\alpha k \frac{e^2}{r} + \frac{B}{r^m}$$

◆  $\frac{B}{r^m}$  ; 인접 이온들 내각의 닫힌 껍질에 있는 전자들 사이의 반발퍼텐셜. 정전기력과 배타원리에 의한 척력



### 이온 응집 에너지(ionic cohesive energy)

$$U_0 = -\alpha k \frac{e^2}{r_0} \left( 1 - \frac{1}{m} \right) ;$$

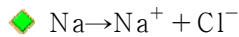
◆ 평형거리에서의 퍼텐셜. 퍼텐셜에너지의 최소값.

◆ 양이온과 음이온을 고체 상태에서부터 무한거리로 떼어 놓는데 필요한 에너지

◆ NaCl의 이온 응집에너지 ; 이온 쌍당 7.84eV, 혹은 760kJ/mol

예) NaCl 원자의 결합에너지

ionic cohesive energy = 7.84 eV



$\text{Na}^+ \rightarrow \text{Na}$  ; 5.14eV 의 에너지를 얻고

$\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}$  ; 3.61eV 의 에너지를 공급해야한다

따라서 원자의 결합에너지(atomic cohesive energy)는

$$7.84\text{eV} - 5.14\text{eV} + 3.61\text{eV} = 6.31\text{eV}$$

🍎 원자의 결합에너지(atomic cohesive energy) ; 고체 상태에서부터 중성의 원자로 분리시키는 데 필요한 에너지

**Table 12.1 Properties of Some Ionic Crystals**

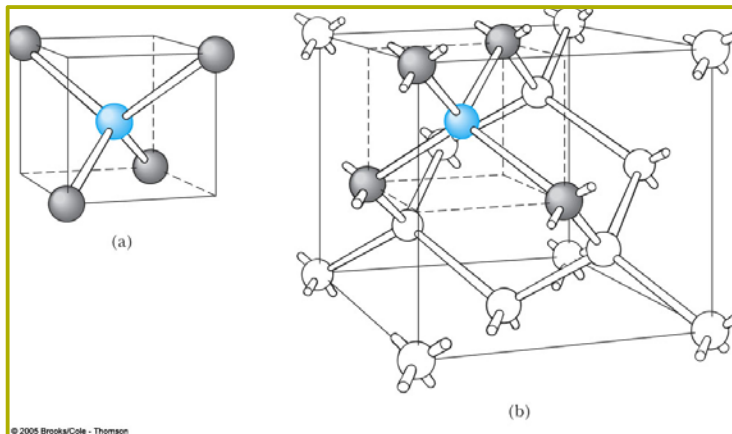
| Crystal | Equilibrium Separation (Å) | Atomic Cohesive Energy (eV per atom pair) | Melting Point (K) |
|---------|----------------------------|-------------------------------------------|-------------------|
| LiF     | 2.01                       | 8.32                                      | 1143              |
| NaCl    | 2.82                       | 6.31                                      | 1074              |
| RbF     | 2.82                       | 7.10                                      | 1068              |
| KCl     | 3.15                       | 6.48                                      | 1043              |
| CsI     | 3.95                       | 5.36                                      | 621               |

© 2005 Brooks/Cole - Thomson

### 🍆 ion 결정의 성질

1. 비교적 안정된 딱딱한 결정을 이룬다.
2. 빈약한 전기적 도체(자유전자가 없다)
3. 기체를 만드는데 고온이 필요(높은 녹는점과 끓는점)
4. 가시광선에서 투명하나 자외선은 강하게 흡수 ; 강하게 구속된 껍질
5. 적외선 영역에서 강한 흡수 ; 이온들 간의 진동에 의한 공명흡수
6. 물과 같은 극성액체에 용해

### 🟩 공유결합 결정(Covalent Crystals)



© 2005 Brooks/Cole - Thomson

다이아몬드, Si, Ge ; 다이아몬드 구조, 공유결정

#### ◆ 다이아몬드

공유결합 ; 고체의 결합에너지가 가장 크다.

◆ 탄소원자 전자배치 ;  $1s^2 2s^2 2p^2 \rightarrow p$  궤도에 4개의 전자가 부족하다.

◆  $\rightarrow$  4개의 다른 탄소원자와 전자를 공유  $\rightarrow$  4면체 구조

◆  $\rightarrow$  가장 단단한 고체.

◆  $\rightarrow$  결합에너지 ; 7.3eV  $\rightarrow$  높은 융점. 4000K

◆ 부도체이며 가시광선에 투명하다

| Table 12.2 Properties of Some Covalent Crystals |                                   |                   |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Crystal                                         | Atomic Cohesive Energy (eV/atom)* | Melting Point (K) |
| C (diamond)                                     | 7.37                              | ~4000             |
| SiC                                             | 6.15                              | 2870              |
| Si                                              | 4.63                              | 1687              |
| Ge                                              | 3.85                              | 1211              |

### 금속성 고체(Metallic Solids)

1. 양이온과 전자기체 사이의 인력 → 자유전자 기체가 양이온을 둘러싸고 있는 격자

2. 이온결합이나 공유결합에 비해 약한 결합

결합에너지 ; 1 ~ 3 eV

가시광선은 금속의 자유전자와 강하게 상호작용

금속의 표면에서 흡수되었다가 재 방출, 가시광선에 불투명, 금속표면의 반짝임

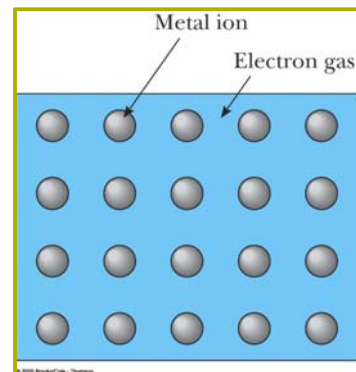
3. 높은 전기전도도

원자당 1개 혹은 2개의 자유전자

4. 결합에 방향성이 없어서(nondirectional nature) 모체 금속에 용해될수 있다.

합금(alloy) 고용체(solid solution)

높은 강도, 낮은 밀도, 연성, 저항, 부식 등의 특성을 가지도록 다양하게 디자인된다.



| Table 12.3 Properties of Some Metallic Crystals |                                   |                   |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Crystal                                         | Atomic Cohesive Energy (eV/atom)* | Melting Point (K) |
| Fe                                              | 4.28                              | 2082              |
| Cu                                              | 3.49                              | 1631              |
| Au                                              | 3.81                              | 1338              |
| Ag                                              | 2.95                              | 1235              |
| Pb                                              | 2.04                              | 874               |
| Zn                                              | 1.35                              | 693               |

### 분자결정(Molecular Crystals)

1. 포화유기분자(saturated organic molecules), 불활성기체

2. 반데발스 힘 ; 전기쌍극자 인력

#### 수소결합(hydrogen bond)

수소를 포함하는 단순한 몇몇 분자들의 영구쌍극자모멘트(permanent dipole moment)에 의한 강한 Van de Waals 결합

얼음 ; ~ 0.52 eV/molecule or ~ 12kcal/mol

#### 쌍극자-쌍극자 요동(dipole-dipole fluctuation)

약한 반데발스 힘, 영구 쌍극자 모멘트를 가지지 않는 분자들 사이

불활성 기체, 끓는 점이 낮은 유기성 고체

고체메탄 ; ~ 0.10 eV/molecule, 91K 융점, 고체Ar ; ~ 0.078 eV/분자, 84K의 융점

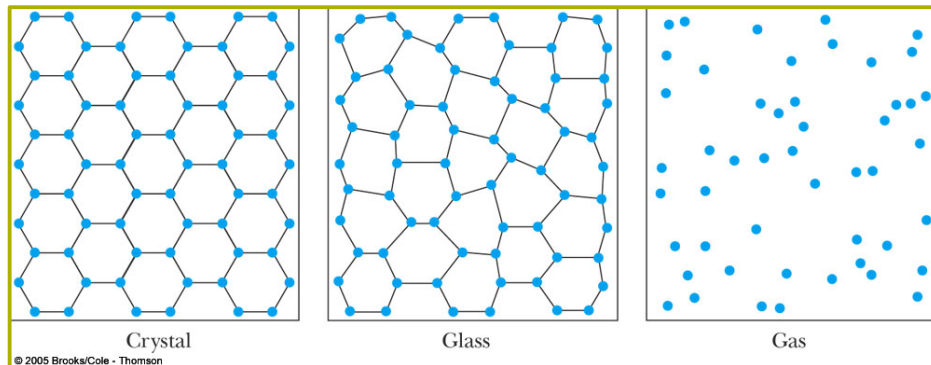
## ■ 비정질 고체(Amorphous Solids)

### ▲ 결정의 결함과 비정질 고체

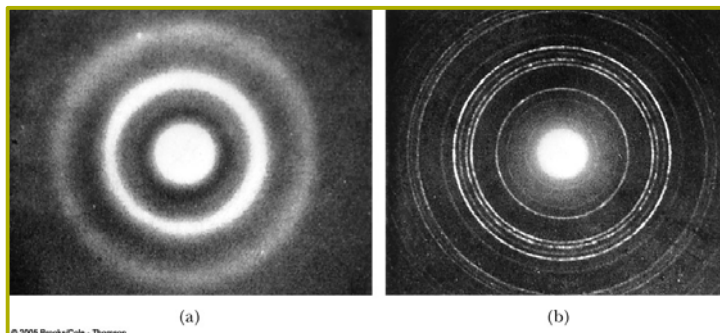
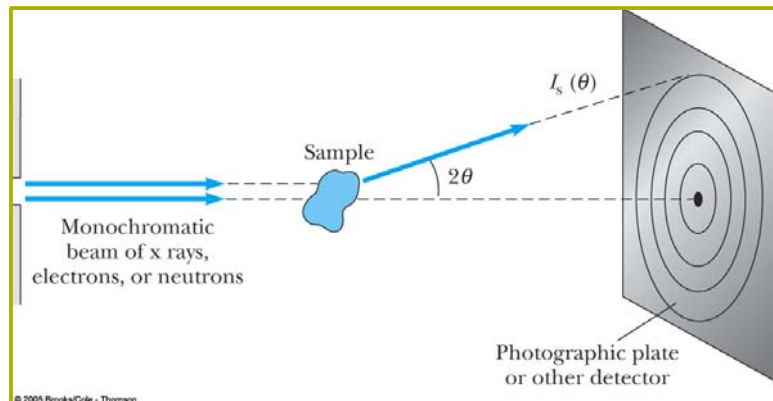
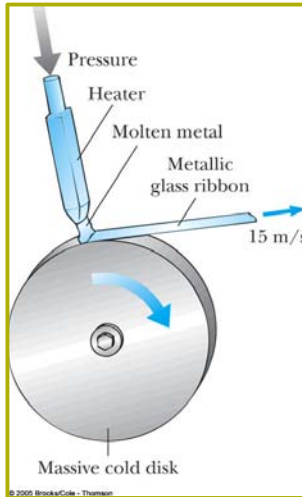
- 변위(dislocation) ; 원자간 거리의 불규칙성
- 불순물
- 물질의 강도, 전도도, 여러 물리적 특성에 심각한 영향을 미친다.

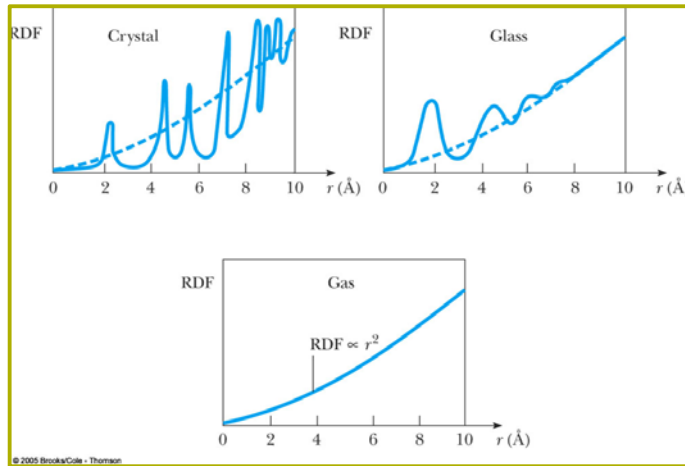
### ▲ 열처리

- annealing ; 용융상태에서 천천히 식혀서 분자들이 최소의 potential energy를 갖게 하는 열처리 → 더 이상적인 결정상으로 변화
- quenching ; 용융상태에서  $10^{-3}$ s 만에 상온으로 냉각하는,  $10^6$  °C/s 정도의 급격한 냉각속도로 냉각하여 분자들이 액체상태의 구조로 응고시키는 열처리
- ◆ 예) melt spinning



### ▲ 구조의 결정 실험 ; X-선 회절법(XRD), 중성자 회절법





지름분포함수(RDF ; radial distribution function)

▲ 게르마늄 결정과 비정질의 RDF

- 🍎 X-선 회절 스펙트럼을 Fourier 변환하여 구한다.
- 🍎 결정의 RDF ; 14번 진동 후에도 선명한 변화를 보인다.
- 🍎 비정질의 RDF ; 4번 정도의 진동 후 밑바닥에 합쳐진다.

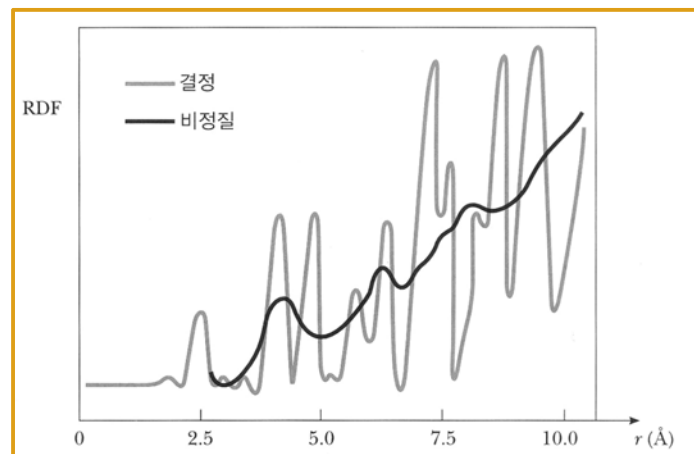


그림 12.10 x-선 산란으로부터 계산된 게르마늄의 결정과 비정질에 대한 RDF  
(R. J. Temkin, W. Paul, and G. A. Comell, Adv. Phys., 22:581,1973)

▲ 비정질의 특성

- 🍎 광학적으로 투명, 높은 강도, 낮은 밀도

| Type               | Material                                          | Use                                                      |
|--------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Oxide glass        | $(\text{SiO}_2)_{0.8}(\text{Na}_2\text{O})_{0.2}$ | Transparent window glass                                 |
| Oxide glass        | $(\text{SiO}_2)_{0.9}(\text{GeO}_2)_{0.1}$        | Ultratransparent optical fibers                          |
| Organic polymer    | Polystyrene                                       | Strong, low-density plastics                             |
| Chalcogenide glass | Se, $\text{As}_2\text{Se}_3$                      | Photoconductive films used for xerography                |
| Amorphous silicon  | $\text{Si}_{0.9}\text{H}_{0.1}$                   | Solar cells                                              |
| Metallic glass     | $\text{Fe}_{0.8}\text{B}_{0.2}$                   | Ferromagnetic low-loss ribbons used as transformer cores |

## 12.2 금속에 대한 고전적 자유전자 모형

### ▲ 자유전자 이론 ; Drude, Thomson

- 고정된 이온 중심(ion core)사이를 자유롭게 움직이는 전도전자의 기체로 설명
- 금속의 높은 전기 전도도 및 열적 전도도
- Ohm의 법칙의 정확한 함수 형태의 예견
- 비데만-프란츠 관계 ; 금속의 전기전도도와 열전도도 사이의 간단한 실험적 관계
- 고전적인 평균자유행로와 rms 속력은 실제와 맞지 않아 전기 전도도와 열전도도가 정확한 실험적 값을 예측하지 못한다. → Fermi 속력과 양자역학적 이론으로 이해할 수 있다.

**Table 12.5 Thermal Conductivity,  $K$ , and Electrical Conductivity,  $\sigma$ , of Selected Substances at Room Temperature**

| Substance | $K$ in $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ | $\sigma$ in $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ |
|-----------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Silver    | 427                                                 | $62 \times 10^6$                           |
| Copper    | 390                                                 | $59 \times 10^6$                           |
| Gold      | 314                                                 | $41 \times 10^6$                           |
| Aluminum  | 210                                                 | $35 \times 10^6$                           |
| Iron      | 63                                                  | $10 \times 10^6$                           |
| Steel     | 50                                                  | $1.4 \times 10^6$                          |
| Nichrome  | 14                                                  | $0.9 \times 10^6$                          |
| Quartz    | 13                                                  |                                            |
| NaCl      | 7.0                                                 | $<10^{-4}$                                 |

© 2005 Brooks/Cole - Thomson

### ■ Ohm의 법칙

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad ; \quad \text{Ohm의 법칙}$$

$$\vec{J} (\text{A/m}^2) \quad ; \quad \text{전류밀도 vector}$$

$$\vec{E} (\text{V/m}) \quad ; \quad \text{전장 vector}$$

$$\sigma (\Omega^{-1} \text{m}^{-1}) \quad ; \quad \text{전기 전도도}$$

- 전기전도도는 전장의 크기에는 상관없이 온도에만 관계한다.
- 가해진 전기장, 즉 전압과는 무관한 하나의 상수  $\sigma$ (전기전도도)가 Ohm성 고체의 전기전도도를 완전히 결정한다.

### ■ Ohm성 고체

Ohm의 법칙을 만족하는 고체

전압과 전류의 관계에서 엄격히 Ohm의 법칙이 성립하는 고체는 없다.

### ▲ 진공중의 전자기체

진공중에 전자기체가 아주 희박하게 있는 경우.

예) 형광등, 네온사인(진공방전관)

$$eEx = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v^2 = \frac{2eE}{m_e}x = \frac{2Ve}{m_e d}x$$

$$J = nev = ne \left( \frac{2eE}{m_e}x \right)^{1/2}$$

Ohm의 법칙 형태로 전도도를 정의하면

$$J(x) = \sigma(x, E)E$$

$$\sigma(x, E) = ne^{3/2} \left( \frac{2x}{m_e E} \right)^{1/2}$$

- ◆ → 전기전도도가 위치와 전장에 따라 변한다.
- ◆ → Ohm의 법칙이 적용되지 않는다.
- ◆ → 형광등과 백열등의 효율의 차이.

### ohm의 법칙

자유전자 기체는 격자이온과 충돌

$$v_{rms} \sim 10^5 \text{m/s} ; \text{Room Temp.}(300\text{K})$$

$$\frac{1}{2} m_e \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

$$v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \left( \frac{3kT}{m_e} \right)^{1/2} \quad (12.5)$$

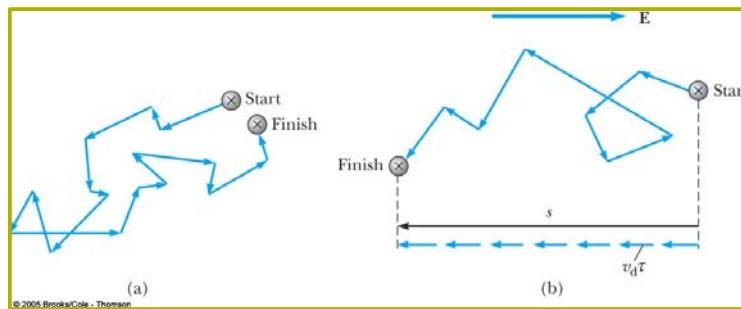
평균자유행로와 평균자유시간 ; mean free path(L) and mean free time( $\tau$ )

$$L = v_{rms} \tau \quad (12.6)$$

열운동에 의한 평균속도는 '0'이다. → 전류에 영향을 주지 못한다.

평균유동속도(mean drift velocity) ;  $v_d$

$$J = nev_d$$



$$s = \frac{a}{2} (t_1^2 + t_2^2 + \dots + t_b^2) \quad (12.7)$$

◆  $a = \frac{eE}{m_e}$  ; 전기장에 의한 전자의 가속도

$$s = \frac{a}{2} (b)(\overline{t^2}) \quad (12.8)$$

$\overline{t^2} = 2\tau^2$  이므로 ( $\tau$ ; 충돌사이의 평균시간; 문제 9)

$$s = ab\tau^2$$

$$s = \frac{eE}{m_e} b\tau^2 \quad (12.9)$$

$s = bv_d\tau$ 와 비교하면

$$v_d = \frac{eE\tau}{m_e} \quad (12.10)$$

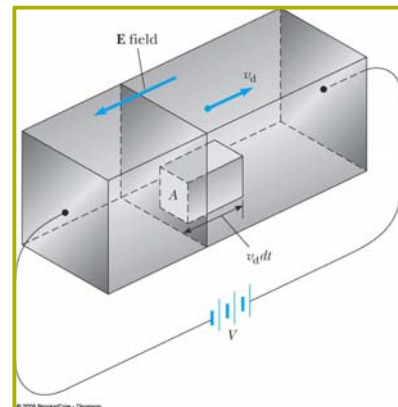


그림 12.12 전류밀도  $J$ 와 유동속도  $v_d$  사이에서의 연결. 시간  $dt$  동안  $A$ 를 통해서 지나가는 전하는 평행육면체 안에 담겨 있는 전하  $neAv_d dt$ 이다.

전류밀도  $J$ 는

$$J = \frac{neAv_d dt}{A dt} = nev_d$$

$$J = nev_d = \frac{ne^2\tau}{m_e} E \quad (12.12)$$

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m_e} \quad (12.13)$$

혹은  $\tau = L/v_{rms}$  이므로

$$\sigma = \frac{ne^2L}{m_e v_{rms}} \quad (12.14)$$

$$\sigma = \frac{ne^2L}{(3kTm_e)^{1/2}} \quad (12.15)$$

$$\rho = \frac{(3kTm_e)^{1/2}}{ne^2L} \quad ; \quad \text{비저항} \quad (12.16)$$

**Table 12.6 Electrical Conductivity of Metals at 300 K**

| Substance | Measured $\sigma$ in $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ |
|-----------|-----------------------------------------------------|
| Copper    | $59 \times 10^6$                                    |
| Aluminum  | $35 \times 10^6$                                    |
| Sodium    | $22 \times 10^6$                                    |
| Iron      | $10 \times 10^6$                                    |
| Mercury   | $1.0 \times 10^6$                                   |

**TABLE 28-1**

**RESISTIVITIES OF SOME MATERIALS AT ROOM TEMPERATURE (20°C)**

| MATERIAL                             | RESISTIVITY,<br>$\rho$<br>( $\Omega \cdot \text{m}$ ) | TEMPERATURE<br>COEFFICIENT OF<br>RESISTIVITY,<br>$\alpha$ ( $\text{K}^{-1}$ ) |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Typical Metals</i>                |                                                       |                                                                               |
| Silver                               | $1.62 \times 10^{-8}$                                 | $4.1 \times 10^{-3}$                                                          |
| Copper                               | $1.69 \times 10^{-8}$                                 | $4.3 \times 10^{-3}$                                                          |
| Aluminum                             | $2.75 \times 10^{-8}$                                 | $4.4 \times 10^{-3}$                                                          |
| Tungsten                             | $5.25 \times 10^{-8}$                                 | $4.5 \times 10^{-3}$                                                          |
| Iron                                 | $9.68 \times 10^{-8}$                                 | $6.5 \times 10^{-3}$                                                          |
| Platinum                             | $10.6 \times 10^{-8}$                                 | $3.9 \times 10^{-3}$                                                          |
| Manganin <sup>a</sup>                | $48.2 \times 10^{-8}$                                 | $0.002 \times 10^{-3}$                                                        |
| <i>Typical Semiconductors</i>        |                                                       |                                                                               |
| Silicon, pure                        | $2.5 \times 10^3$                                     | $-70 \times 10^{-3}$                                                          |
| Silicon, <i>n</i> -type <sup>b</sup> | $8.7 \times 10^{-4}$                                  |                                                                               |
| Silicon, <i>p</i> -type <sup>c</sup> | $2.8 \times 10^{-3}$                                  |                                                                               |
| <i>Typical Insulators</i>            |                                                       |                                                                               |
| Glass                                | $10^{10} - 10^{14}$                                   |                                                                               |
| Fused quartz                         | $\sim 10^{16}$                                        |                                                                               |

<sup>a</sup>An alloy specifically designed to have a small value of  $\alpha$ .

<sup>b</sup>Pure silicon “doped” with phosphorus impurities to a charge carrier density of  $10^{23} \text{ m}^{-3}$ .

<sup>c</sup>Pure silicon “doped” with aluminum impurities to a charge carrier density of  $10^{23} \text{ m}^{-3}$ .

## 예제 12.1 금속의 전도도에 관한 고전적인 자유전자 모형

(a)  $A = 4\text{mm}^2$ ,  $i = 10\text{A}$  에서 300K에서의  $v_{rms}$ 와  $v_d$

(b)  $L = 2.6 \text{ \AA}$  일 때 평균자유시간은?

(c) 구리의 전도도를 계산하라.

(풀이)

$$(a) \quad v_{rms} = \left( \frac{3kT}{m_e} \right)^{1/2} = \left[ \frac{3(1.38 \times 10^{-23} \text{J/K})(300\text{K})}{9.11 \times 10^{-31} \text{kg}} \right]^{1/2}$$

$$= 1.17 \times 10^5 \text{m/s}$$

$$v_F \sim 1.5 \times 10^6 \text{m/s}$$

$$J = nev_d$$

$$n = \left( \frac{1 \text{ free electron}}{\text{atom}} \right) \left( \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ atoms}}{\text{mole}} \right) \times \left( \frac{1 \text{ mole}}{63.5 \text{ g}} \right) \left( \frac{8.96 \text{ g}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$= 8.49 \times 10^{22} \text{ electron/cm}^3$$

$$v_d = \frac{J}{ne} = \frac{(10\text{A}) / (4 \times 10^{-6} \text{m}^2)}{(8.49 \times 10^{28} \text{m}^{-3})(1.6 \times 10^{-19} \text{C})}$$

$$= 1.8 \times 10^{-4} \text{m/s} = 0.18 \text{mm/s}$$

$$\frac{v_d}{v_{rms}} = 1.5 \times 10^{-9}$$

$$(b) \quad \tau = \frac{L}{v_{rms}} = \frac{2.6 \times 10^{-10} \text{m}}{1.2 \times 10^5 \text{m/s}} = 2.2 \times 10^{-15} \text{s}$$

$$(c) \quad \sigma = \frac{ne^2L}{(3kTm_e)^{1/2}} = 5.3 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$$

◆ 측정값의 1/10 정도!!!!???

$t_1, t_2$  ; 계속되는 충돌사이의 (이동)시간

$$\overline{t^2} = (t_1^2 + t_2^2 + \dots + t_b^2) / b$$

$L = v_{rms}\tau$  ; 평균자유거리(mean free path)

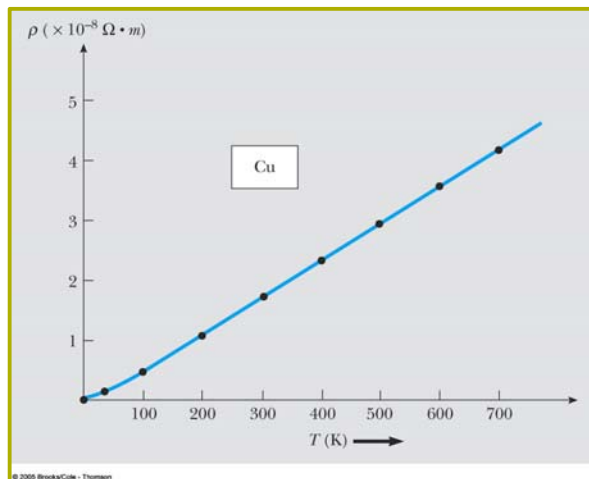
$\tau$  ; 평균자유시간(mean free time)

🍎 ♣ Ohm의 법칙

1. 고전적 자유전자모형

2. 전도도를 정확하게 예측하지 못한다.

◆  $\rho \propto T$  이나  $\rho \propto T^{1/2}$ 로 예측하여 실제와 어긋난다.



(문제 12.9)

$n(t)dt$  ;  $dt$  시간동안 충돌하는 전자 수

$$\begin{aligned}n(t) &= \left(\frac{N}{\tau}\right)e^{-t/\tau} \\ \bar{t} &= \left(\frac{1}{N}\right)\int_0^{\infty}\left(\frac{tN}{\tau}\right)e^{-t/\tau}dt = \left(\frac{1}{\tau}\right)\int_0^{\infty}te^{-t/\tau}dt \\ &= \left(\frac{1}{\tau}\right)\int_0^{\infty}[(-\tau te^{-t/\tau})' - (-\tau e^{-t/\tau})]dt \\ &= \left(\frac{1}{\tau}\right)\left[-\tau te^{-t/\tau}\Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty}-\tau e^{-t/\tau}dt\right] \\ &= 0 - \tau e^{-t/\tau}\Big|_0^{\infty} = \tau\end{aligned}$$

$$\overline{t^2} = \left(\frac{1}{N}\right)\int_0^{\infty}\left(\frac{t^2N}{\tau}\right)e^{-t/\tau}dt = 2\tau^2$$

## 열전도에 관한 고전적 자유전자 이론

### 열전도도(thermal conductivity) $K$

$$\frac{\Delta Q}{A \Delta t} = -K \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

- 자유전자기체의 제멋대로의 충돌과정을 통해 금속내의 열에너지 및 전하의 운반이 이루어진다.

### Wiedemann-Franz의 법칙

- $\frac{K}{\sigma}$ 는 보편상수로서 모든 금속에 대해 동일하고 단지 절대온도에만 의존한다.

- 전기전도 및 열전도 모두 자유전자기체의 운동에 기인한다는 결론에 도달할 수 있다.

### 열전도

- $T + \Delta T$ 에서  $T$ 의 영역으로 움직이는 전자기체에 의해 운반되는 열에너지 속(thermal energy flux ;  $\text{W/m}^2$ )

$$K = \frac{1}{3} c_v v_{rms} L \quad (12.19)$$

$$c_v = \left( \frac{3}{2} N_A k \right) \left( \frac{n}{N_A} \right) = \frac{3}{2} k n ; \text{단위부피당의 열용량}$$

- Maxwell-Boltzmann 통계

$$K = \frac{k n v_{rms} L}{2} \quad (12.20)$$

- $L$ 을 원자사이의 거리로 사용하면 실제의 열전도계수와 맞지 않는다.

$$\frac{K}{\sigma} = \frac{k n v_{rms} L / 2}{n e^2 L / m_e v_{rms}} = \frac{k (v_{rms})^2 m_e}{2 e^2}$$

$$\frac{K}{\sigma} = \frac{3 k^2}{2 e^2} T ; \text{비데만-프란츠 법칙} \quad (12.21)$$

- 그러나  $\frac{3 k^2}{2 e^2} = 1.1 \times 10^{-8} \text{W} \Omega / \text{K}^2$ 는 실제 값(로렌츠 수)과 맞지 않는다.

- 그러나 모든 금속의  $\frac{K}{\sigma T}$  (Lorentz number)는 일정한 값을 가진다는 사실은 자유전자기체가 금속내의 전기 및 열전도를 준다는 확실한 증거이다.

※  $K = \frac{1}{3} c_v v_{rms} L$ 의 증명

$n v_{rms} A \Delta t \bar{E}(x_1 + \Delta x)$  :  $A$ 을  $\Delta t$ 동안 위에서 아래로 전달되는 열에너지

$n v_{rms} A \Delta t \bar{E}(x_1 - \Delta x)$  :  $A$ 을  $\Delta t$ 동안 아래에서 위로 전달되는 열에너지

알짜 열에너지의 전달은

$$\Delta Q = 2 n v_{rms} A \Delta t \frac{d \bar{E}}{d x} \Delta x = 2 n v_{rms} A \Delta t \Delta x \frac{d \bar{E}}{d T} \frac{d T}{d x}$$

$$c_v = \frac{d(n \bar{E})}{d T} \text{ 이므로 } \frac{\Delta Q}{A \Delta t} = 2 c_v v_{rms} \Delta x \frac{d T}{d x}$$

$L = \Delta x$  : 평균 자유행로, 모든 입자는 모두 경계면을 통과하지 않으므로 1/6을 곱하면

**Table 12.7 Experimental Lorentz Numbers  $K/\sigma T$  in Units of  $10^{-8} \text{W} \cdot \Omega / \text{K}^2$ \***

| Metal | 273 K | 373 K |
|-------|-------|-------|
| Ag    | 2.31  | 2.37  |
| Au    | 2.35  | 2.40  |
| Cd    | 2.42  | 2.43  |
| Cu    | 2.23  | 2.33  |
| Ir    | 2.49  | 2.49  |
| Mo    | 2.61  | 2.79  |
| Pb    | 2.47  | 2.56  |
| Pt    | 2.51  | 2.60  |
| Sn    | 2.52  | 2.49  |
| W     | 3.04  | 3.20  |
| Zn    | 2.31  | 2.33  |

© 2005 Brooks/Cole - Thomson

$$K = (1/3) c_v v_{rms} L$$

## 12.3 금속의 양자역학 이론

● 고전 전자기체 모형의 결함 ;  $K$ 와  $\sigma$ 의 값, 및  $\sigma$ 의 온도의존성과 금속의 열용량에 대한 잘못된 예측을 준다.

해결

- ◆ 1. Maxwell-Boltzmann 분포를 Fermi-Dirac 분포로 대체하고
- ◆ 2. 전자의 파동성을 고려한 평균자유행로로 보정하면 옳은 결과를 예측할 수 있다.

■  $v_{rms}$  대신  $v_F$ 로 대체

Fermi 구 ; 금속내의 전도띠의 전자들에 허용된 속도벡터는 속도공간에서 Fermi energy  $E_F$ 까지 차는 Fermi 구를 이루고

- 가해진 전기장은 Fermi 구를 약간 변위시킨다.
- 변위된 전자는 대략  $v_F$ 의 속도를 갖는다.
- 모든 전자가 전기장에 의해  $v_d$ 만큼 속도가 증가한다.
- 파울리의 원리에 의한 전자수송의 병목이 일어나지 않는다.

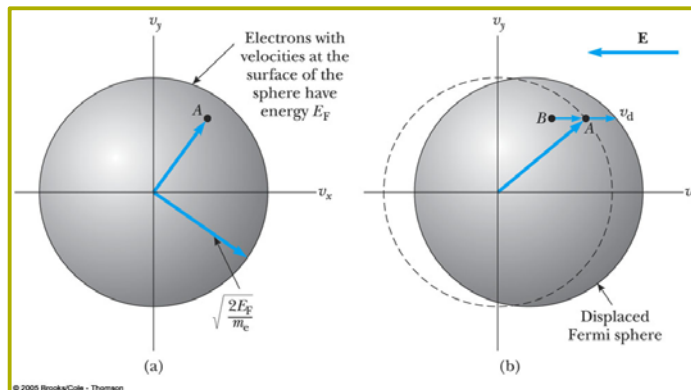
$E < E_F$ 인 전자는 건드리지 않고 Fermi 면 근처에서  $v \approx v_F$ 인 전자만을 변위시킨다. 전기전도도와 열전도도의 고전적인 표현

$$\sigma = \frac{ne^2 L}{m_e v_{rms}} \quad K = \frac{1}{3} C_v v_{rms} L$$

은  $v_{rms}$  대신  $v_F$ 로 대체된다.

$$\sigma = \frac{ne^2 L}{m_e v_F} \quad (12.22)$$

$$K = \frac{1}{3} C_v v_F L \quad (12.23)$$



■ Wiedemann-Franz 법칙의 재고찰

$E_F$  근방의  $k_B T$  내에 있는 전자들만이 온도 변화에 따른 에너지 변화가 있고 그 외의 전자들은 에너지의 변화가 없어서 열용량에 기여하지 않아서  $\frac{3R}{2}$ 보다 훨씬 적은 값을 가져서

$$C \simeq 2 \left( \frac{k_B T}{E_F} \right) \left( \frac{3}{2} R \right) \quad (9.33)$$

정확한 계산을 하면 (Kittel, op. cit 6장)

$$C = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k_B T}{E_F} \right) \left( \frac{3}{2} R \right) \quad (12.24)$$

$K = \frac{1}{3} C v_F L$  이므로, 단위 부피당의 열용량으로  $C$ 를 대입하면

$$K = \frac{1}{3} \left( \frac{\pi^2}{3} \right) \left( \frac{k_B T}{E_F} \right) \left( \frac{3}{2} R \right) \left( \frac{n}{N_A} \right) v_F L$$

$R = N_A k_B$  와  $E_F = \frac{1}{2} m_e v_F^2$  을 대입하여

$$K = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k_B^2 T}{m_e v_F} \right) n L \quad (12.25)$$

Lorentz 수  $\frac{K}{\sigma T}$  는

$$\frac{K}{\sigma T} = \frac{(\pi^2/3)(k_B^2 T/m_e v_F)(nL)}{(ne^2 L/m_e v_F) T} = \frac{\pi^2 k_B^2}{3e^2}$$

즉 비데만-프란츠 법칙의 양자역학적 형태는

$$\frac{K}{\sigma T} = \frac{\pi^2 k_B^2}{3e^2} = 2.45 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \Omega / \text{K}^2 \quad (12.26)$$

→ 실험값과 잘 일치한다.

### 전자의 양자역학적 평균자유거리(평균자유행로)

고전적 자유전자모형에서의 전기전도

$$\sigma = ne^2 L / m_e v_{rms}$$

에서  $v_{rms} \rightarrow v_F$ 로 두고  $L$ 을 원자사이의 간격 정도로 두면 측정된  $\sigma$ 값의 1/200 정도의 값이 된다.  $\Rightarrow$  200배 이상의  $L$ 값이 요구된다.

$$\sigma = \frac{ne^2 L}{m_e v_F}$$

로부터

$$L = \frac{m_e v_F \sigma}{ne^2}$$

$$v_F = \left( \frac{2E_F}{m_e} \right)^{1/2} = \left( \frac{(2)(7.05 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{J})}{9.11 \times 10^{-31} \text{kg}} \right)^{1/2}$$

$$= 1.57 \times 10^6 \text{m/s}$$

$$L = \frac{(9.11 \times 10^{-31} \text{kg})(1.57 \times 10^6 \text{m/s})(5.9 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1})}{(8.49 \times 10^{28} \text{electrons/m}^3)(1.60 \times 10^{-19} \text{C})}$$

$$= 3.9 \times 10^{-8} \text{m} = 390 \text{\AA}$$

→ 원자간 거리의 150배

$$\tau = \frac{L}{v_F} = \frac{3.90 \times 10^{-8} \text{m}}{1.57 \times 10^6 \text{m/s}} = 2.50 \times 10^{-14} \text{s}$$

→ 긴 평균수명

⇒ 넓은 범위의 에너지를 가지는 전자파동은 이온중심의 완벽한 격자를 산란이나 저항 없이 무한대의 평균자유행로를 가지고 통과해나간다. ; 양자역학

전자들에 대한 산란 위치가 바로 이웃의 이온 코어가 아니라 더 넓게 분포된 산란 중심들 때문이다.

완벽한 격자에서 전자 산란이 거의 일어나지 않기 때문에 전자 파동은 마치 투명 결정에서 빛이 진행하는 것과 같이 약화되지 않으면서 금속 내를 돌아다닐 수 있다.

## ▲ 금속의 저항

🍎 넓게 분포된 산란 중심

- ◆ 1. 격자의 열적 변위
- ◆ 2. 불순물 원자나 격자의 결함

## ▲ 비저항의 절대온도 의존성

비저항이 절대온도에 비례하는 것은 격자의 열적진동에 의한 전자파동의 산란 때문이다.

포논; 격자 진동들은  $\hbar\omega$ 로 양자화 된다.

온도  $T$ 에서 에너지  $\hbar\omega$ 를 가지는 포논의 수

$$n_p \propto \frac{1}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1} \quad (10.33)$$

고온에서  $k_B T \gg \hbar\omega$

$$n_p \propto \frac{k_B T}{\hbar\omega}$$

🍎 전자 산란에 기여하는 포논의 수는 직접적으로  $T$ 에 비례하고, 전자 산란자의 수도 온도에 비례하며 결국 비저항은 온도에 비례한다.

## ※Serway 1989※

$A^2 \propto T$ ; 진폭의 제곱은 온도에 비례한다.

◆ -등분배 정리-

산란단면적  $\propto A^2 \propto L^{-1}$  이므로

$$L^{-1} \propto T$$

$$\rho = m_e v_F / n e^2 L \rightarrow \rho \propto T$$

※ 고전론  $\rho \propto \sqrt{T}$

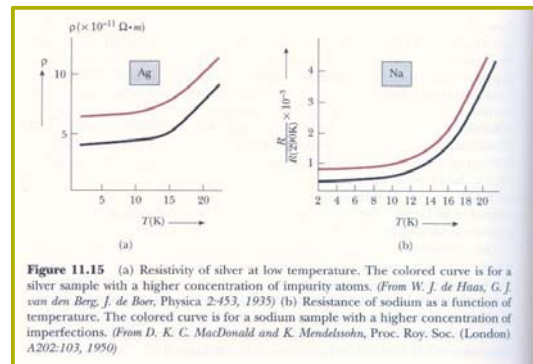
## ※Serway 1989※ 끝

## ▲ Matthiessen's rule

$$\rho = \rho_i + \rho_L$$

◆  $\rho_L$ ; 열운동에 의한 비저항  
 ◆  $\rho_i$ ; 잔류저항, 불순물이나 구조적 결함에 의한 비저항

🍎  $\rho_L$ 은 불순물의 농도에 무관하며,  $\rho_i$ 는 온도에 무관하다.



## 12.4 고체의 띠 이론(Band Theory of Solids)

- 금속과 부도체의 비저항은  $10^{24}$ 배(!!!) 차이가 난다.
- 절연체 ; 이온결합, 공유결합 → 최외각 전자는 자유롭지 못하다.
- 고체의 전자적 성질 ; 격자이온의 효과, 에너지 띠 이론

### ■ 고립원자 방식에 의한 띠 이론(Isolated-Atom Approach to Band Theory)

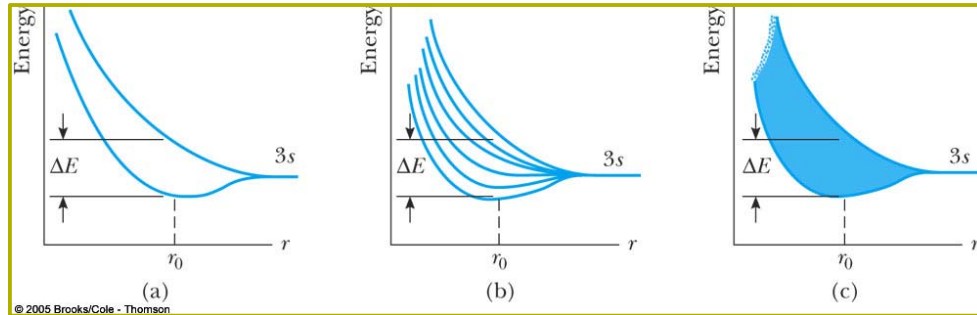


그림12.16 (a) 두 개의 나트륨 원자가 서로 가까워 질 때, 3s 준위의 분할. (b) 여섯 개의 나트륨 원자가 서로 가까워 질 때의 분할. (c) 많은 수의 나트륨 원자의 고체

- 고립된 Na 원자의 특정 에너지 준위 ; 3s
- 두 원자가 서로 가까워지면서 파동함수는 중첩되고 두 개의 겹친 에너지 준위는 서로 다른 준위로 갈라진다.

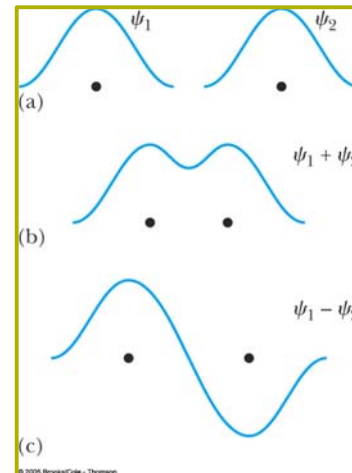
### ▲ 전자의 파동함수의 중첩으로의 이해

$\psi_1, \psi_2$  ; 고립원자의 파동함수

- 인접해 있는 2 원자의 혼합된 파동함수

$\psi_1 + \psi_2$  or  $\psi_1 - \psi_2$

- ◆ ♠  $\psi_1 + \psi_2$  ; 이온중심 사이의 중간에서 전자를 발견할 확률이 높다. 더 낮은 에너지를 갖는다. 그림12.16(a)
- ◆ ♠  $\psi_1 - \psi_2$  ; 중간에서 전자를 발견할 확률이 낮다. 더 높은 에너지를 갖는다. 그림12.16(a)



- 고체 ; 매우 많은 수( $10^{23}$  원자/ $\text{cm}^3$ )의 원자 → 매우 많은 에너지 준위가 매우 조밀하게 모여 있다. → 연속적인 에너지 띠(energy band)
- 에너지 띠 ; 각원자의 에너지 준위로부터 발생한다.

### ▲ 나트륨의 에너지 띠

- 🍎 결정고체는 수많은 허용된 에너지 띠(allowed energy bands)를 갖는다.
- 🍎 에너지 갭(energy gap)
  - ◆ 금지된 에너지 영역. 허용된 에너지 밴드를 분리시킨다.
  - ◆ 원자의 각기 다른 에너지 준위의 간격으로부터 생긴다.
  - ◆ 개개 원자 준위들이 에너지 밴드로 넓어져서 서로 중첩되지 않는 한 존재한다.
- 🍎 Na 3s band and 3p band의 중첩; 전도 띠

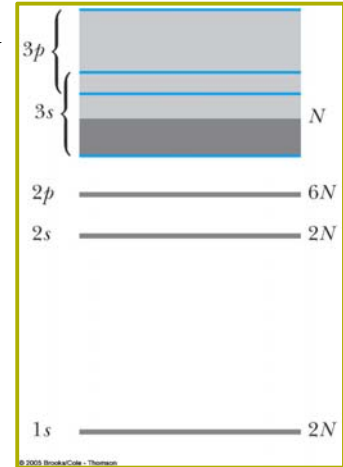


그림 12.18 나트륨의 띠는 이 그림에서 회색으로 나타나는 부분이다. 허용된 에너지 띠 사이에서 에너지 간격과 3s와 3p 띠가 중첩한다는 사실을 주시하라. 각 에너지띠에서 전자의 수는 띠의 오른쪽에 나타나 있다.

### 🟡 금속, 부도체 및 반도체의 전기전도(Conduction in Metals, Insulators, and Semiconductors)

금속, 부도체 및 반도체에서의 큰 전기전도도의 차이를 띠 이론으로 설명한다.

#### ▲ 금속(Metals)

- 🍎  $E_F$  ; Fermi energy, 0K 에서  $E_F$ 아래의 모든 전자가 채워진다.
- 🍎  $E_F$  가 띠의 중간에 있게 되어 전기장이 가해지는 경우 Fermi 에너지 근처의 에너지를 갖는 전자는 전기장으로부터 단지 작은 양의 에너지만을 얻어도 근처의 빈 에너지 상태에 도달할 수 있게 된다. 즉 전도된다.
- 🍎  $E_F$  근처에 비어있는 상태가 많아서 전자는 작은 전기장 하에서도 자유롭게 움직인다.  
→ 높은 전도

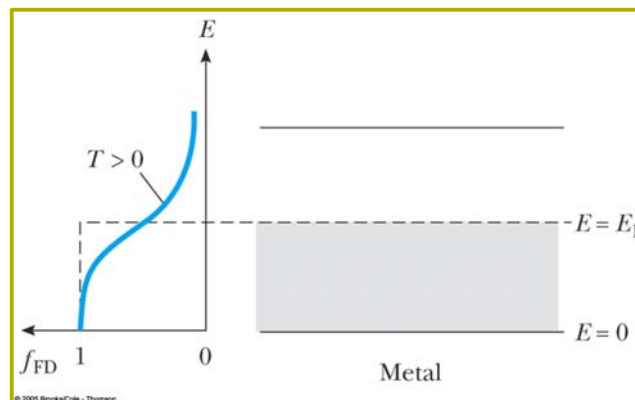


그림 12.19 나트륨의 3s 띠와 같이 도체의 반이 채워진 띠.  $T = 0K$ 에서 페르미 에너지는 띠의 중간에 놓여있다. 에너지 상태  $E$ 가  $T_0$ 에서 채워질 페르미-디랙 확률은 왼쪽 도표에서 보여준다.

### ▲ 부도체(절연체, Insulators)

- 🍎 전자로 완전히 채워진 가전자 띠(valence band)
- 🍎 높은 에너지 간격(Energy gap) ;  $E_g \sim 10\text{eV}$
- 🍎 0K에서 비어 있는 전도띠(conduction band)
- 🍎  $E_g \sim 10\text{eV}$ 로 높아 상온에서( $kT = 0.025\text{eV}$ ) 전도띠로 전자가 거의 여기하지 않는다.
- 🍎 아주 적은 수의 전자만이 실질적으로 전도띠를 점유하고 있어서 전체적으로 전기전도에 기여하는 양은 매우 적어 높은 비저항을 나타낸다.(도체의  $10^{24}$ 배)

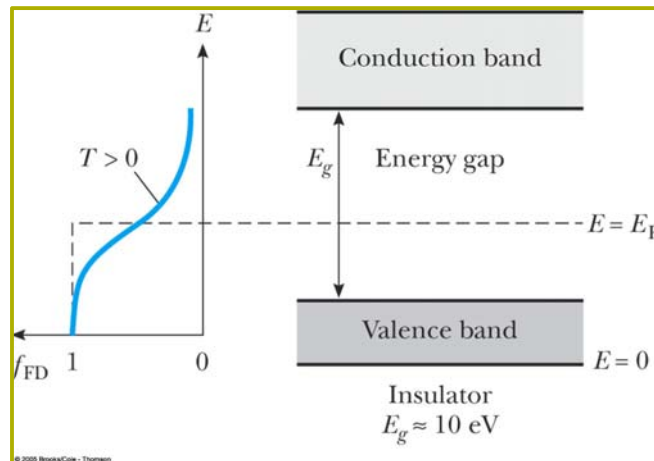
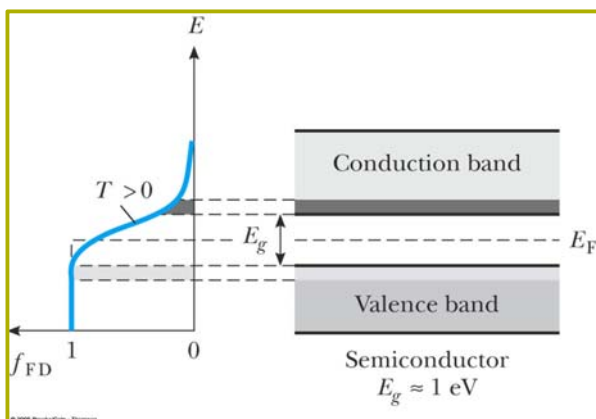


그림 12.20  $T = 0\text{K}$ 에서 절연체는 가전자띠가 채워져 있고, 전도띠는 비어 있다. 페르미 준위는 이들 띠 사이의 중간에 위치한다. 에너지 상태  $E$ 가  $T > 0\text{K}$ 에서 채워질 페르미-디랙 확률은 왼쪽 도표에서 볼 수 있다.

### ▲ 반도체(Semiconductors)

- 🍎 완전히 채워진 가전자 띠와 0K에서 비어있는 전도띠
- 🍎 낮은 에너지 간격 ;  $E_g \sim 1\text{eV}$
- 🍎 전자가 열적으로 여기 되어 쉽게 전도띠로 옮겨 간다.
- 🍎 전도도는 온도의 상승에 따라 급격히 상승한다.
- 💡 금속의 전도도는 온도의 상승에 따라 서서히 감소한다.

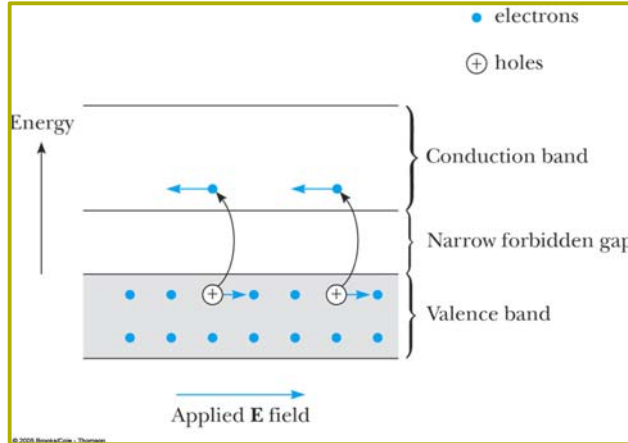


**Table 12.8 Energy-Gap Values for Some Semiconductors\***

| Crystal | $E_g(\text{eV})$ |       |
|---------|------------------|-------|
|         | 0 K              | 300 K |
| Si      | 1.17             | 1.14  |
| Ge      | 0.744            | 0.67  |
| InP     | 1.42             | 1.35  |
| GaP     | 2.32             | 2.26  |
| GaAs    | 1.52             | 1.43  |
| CdS     | 2.582            | 2.42  |
| CdTe    | 1.607            | 1.45  |
| ZnO     | 3.436            | 3.2   |
| ZnS     | 3.91             | 3.6   |

### ▶ 반도체의 전하 운반자(charge carrier)

- 🍎 전자(electron) ; 전도띠에서의 전하 운반자
- 🍎 정공(hole) ; 가전자띠에서의 전하 운반자.
- 🍎 진성반도체(intrinsic semiconductor) ; 전자-정공 쌍(electron-hole pairs)를 가지고 있는 순수한 반도체



예제 12.2 다이아몬드에 대하여 전도를 일으키기 위한 전기장의 세기를 구하여라.

$$L = 5 \times 10^{-8} \text{m}, E_g = 7 \text{eV}$$

(풀이)

$$e\epsilon L = E$$

$$\epsilon = \frac{E}{eL} = \frac{7 \text{eV}}{e(5 \times 10^{-8} \text{m})} = 1.4 \times 10^8 \text{V/m}$$

금속에서 전도를 발생시키는 데 필요한 전기장의 크기에 비교하여 아주 큰 값이다..

### ▶ 전자파동의 반사에 의한 에너지 띠(Energy Bands from Electron Wave Reflections)

고체에서 에너지 띠가 생기는 원인을 생각한다

#### ▶ 주기적인 결정격자(ion core)에 의한 전자파동의 산란

자유로운 전자의 파동함수를 고려한다.

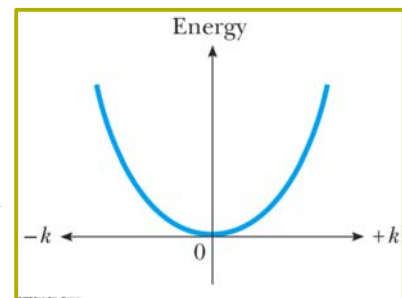
$$\psi_{free} = Ae^{i(kx - \omega t)}$$

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$$

1)  $k \sim 0$  ; 장파장 영역

반사파들은 서로 보강하지 않고 사라진다. → 반사파 없이 전자는 자유입자처럼 격자를 통해 진행한다.

2)  $\lambda = 2a$  ( $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{2a} = \frac{\pi}{a}$ )



인접원자들로부터의 반사파는 동일위상(in phase)을 갖게 되어 보강간섭 → 강한 반사파 일반적으로

$$2a = \pm n\lambda \quad n = 1, 2, 3 \dots ; \text{보강간섭} \quad (12.29)$$

$$k = \pm \frac{n\pi}{a} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (12.30)$$

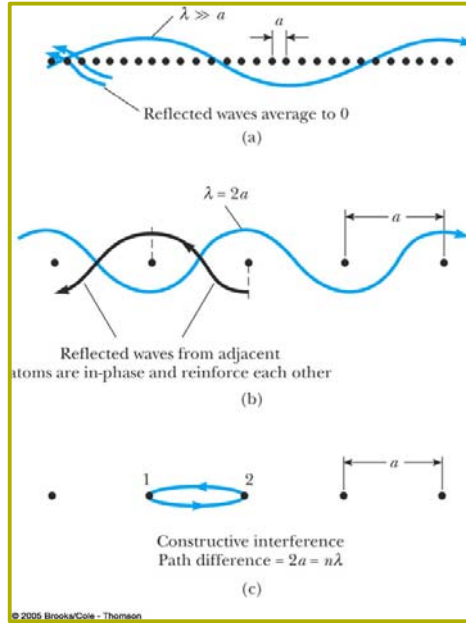


그림12.24 (a)  $\lambda \gg a$ 일 때 전자 파동의 반사. (b)  $\lambda = 2a$ 일 때 전자 파동의 반사. (c) 원자 1과 2로부터 반사된 파들의 보강 간섭

### 2 가지 형태의 정상파

$$\psi_- = Be^{i(kx - \omega t)} - Be^{i(-kx - \omega t)} \quad (12.31)$$

$$\psi_+ = Be^{i(kx - \omega t)} + Be^{i(-kx - \omega t)} \quad (12.32)$$

◆  $Be^{i(kx - \omega t)}$  ;  $+x$  방향으로 진행하는 파

◆  $Be^{i(-kx - \omega t)}$  ;  $-x$  방향으로 진행하는 파

$$\psi_- = \pm 2Be^{-i\omega t} \sin \frac{\pi x}{a} \quad (12.33)$$

$$\psi_+ = 2Be^{-i\omega t} \cos \frac{\pi x}{a} \quad (12.34)$$

🍎  $\psi_-$  ;  $\psi_{free}$  보다 약간 높은 에너지(약간 높은 퍼텐셜에너지)

🍎  $\psi_+$  ;  $\psi_{free}$  보다 약간 낮은 에너지(약간 낮은 퍼텐셜에너지)

◆  $\Rightarrow$  에너지 간격(energy gap), 에너지의 불연속

🍎 두 상태에서의 운동에너지는 같다  $\leftarrow$  같은 크기의 운동량을 가지므로

$$\langle K \rangle = \left\langle \frac{p^2}{2m} \right\rangle = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^2} ; \text{운동에너지}$$

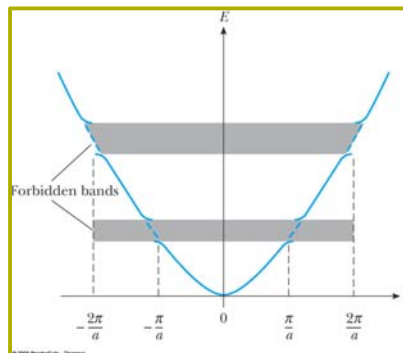


그림 12.25 원자 사이의 거리가  $a$ 인 일차원 격자의 파수에 대한 에너지.

### ▲ 두 상태의 격자중심(ion core)에서의 전하의 분포

$$\psi_{free}^* \psi_{free} = [Ae^{i(kx - \omega t)}]^* [Ae^{i(kx - \omega t)}] = |A|^2$$

$$\psi_+^* \psi_+ = [2Be^{-i\omega t} \cos \frac{\pi x}{a}]^* [2Be^{-i\omega t} \cos \frac{\pi x}{a}] = 4|B|^2 \cos^2 \frac{\pi x}{a}$$

$$\psi_-^* \psi_- = [\pm 2Be^{-i\omega t} \sin \frac{\pi x}{a}]^* [\pm 2Be^{-i\omega t} \sin \frac{\pi x}{a}] = 4|B|^2 \sin^2 \frac{\pi x}{a}$$

🍎  $\psi_+^* \psi_+$  ; 양이온 중심위에 전자가 집중되어 있다.

🟩 → 낮은 퍼텐셜에너지

🍎  $\psi_-^* \psi_-$  ; 양이온 중심들의 사이에 전자가 집중되어 있다.

🟩 → 높은 퍼텐셜에너지

⇒ 운동에너지는 같으므로 이러한 퍼텐셜에너지의 차이로 인해 전체에너지의 차이가 생긴다. ; 에너지 갭의 형성, forbidden gap(금지대)

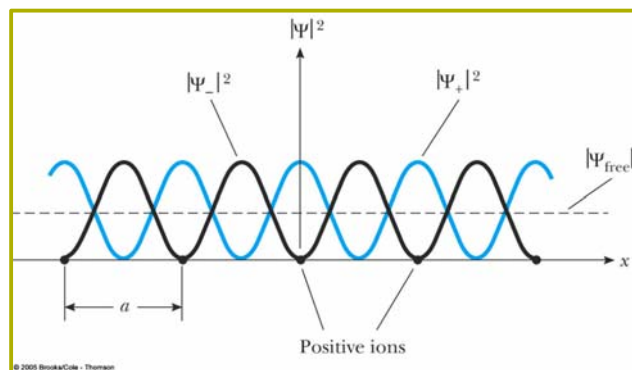


그림12.26 정상파의 확률 밀도와 1차원 격자에서 진행(자유) 전자파.  $\psi_+$  상태는 양이온 위에 전자가 위치하고, 결론적으로 더 낮은 퍼텐셜 에너지를 가진다.

## 12.5 반도체 디바이스(Semiconductor Devices)

### ▲ doping(도핑)

🍎 반도체에 불순물을 의도적으로 넣어 전하운반자의 유형(electron, hole)과 수를 조절하는 과정

### ▲ Si 반도체 ; 4족 반도체

♣ n형 반도체 ; 4족 반도체에 5가 원자(As)를 도핑한다.

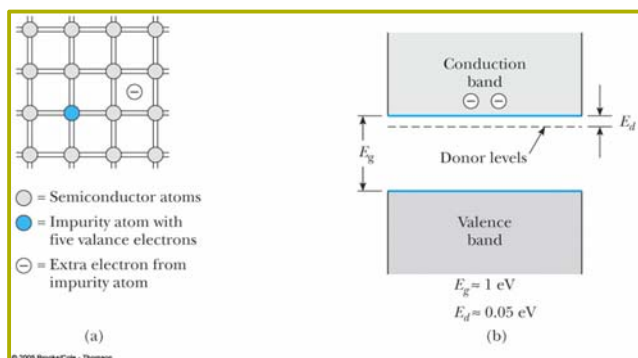
🍎 4개의 전자는 공유결합에 쓰이고

🍎 1개의 전자는 donor level을 형성한다. 주개 원자

🟩  $E_d = 0.05\text{eV}$

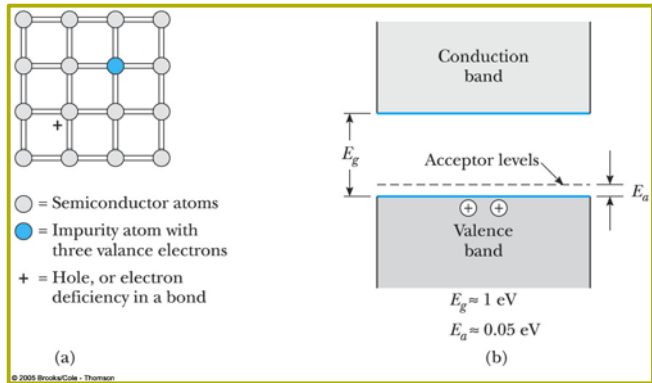
🍎 donor level의 전자는 쉽게 여기(excite)되어 전도띠의 전도전자가 된다.

🍎 전하운반자 ; electron → n형 반도체



♣ p형 반도체 ; 4족 반도체에 3가 원자(In, Al)을 도핑한다.

- 🍎 3개의 전자는 공유결합에 쓰이고
- 🍎 4번째 level은 전자가 빈, 가전자 띠 바로 위에, acceptor level을 만든다.
- 💎  $E_a = 0.05\text{eV}$
- 🍎 가전자 띠의 전자는 쉽게 acceptor level로 여기되고
- 🍎 가전자 띠에는 정공(hole)을 남긴다. → p형 반도체(p-type semiconductor)



### 🌸 불순물 반도체(extrinsic semiconductor)

💎  $10^{13} \sim 10^{19}\text{ atoms/cm}^3$ 의 불순물을 첨가한 반도체

### 🌸 진성 반도체(intrinsic semiconductor)

### 🟩 p-n 접합(p-n Junction)

- 🍎 p형 반도체와 n형 반도체를 접합시킨다.
- 🍎 결핍영역(depletion region) ; 접합부로부터 수 마이크로미터 거리의 확산되는 영역
- 💎 n형 반도체의 전도전자, p형 반도체의 정공이 접합부에서 확산된다.
- 💎 결과적으로 n형 반도체의 전자들이 p형 반도체로 확산되는 것이다.
- 💎 접합부에 내부 전기장이 형성된다.  
 $E = 10^3 \sim 10^5\text{ V/cm}$  ; 내부 전기장
- 💎 내부 전기장은 움직일 수 있는 전하 운반체를 끌어내어 접합부를 비운다.
- 💎 내부 전기장은 퍼텐셜 장벽을 형성한다.  
 $V_0$  ; potential 장벽
- 💎 내부 퍼텐셜은 접합부에서 더 이상의 확산을 막는다.

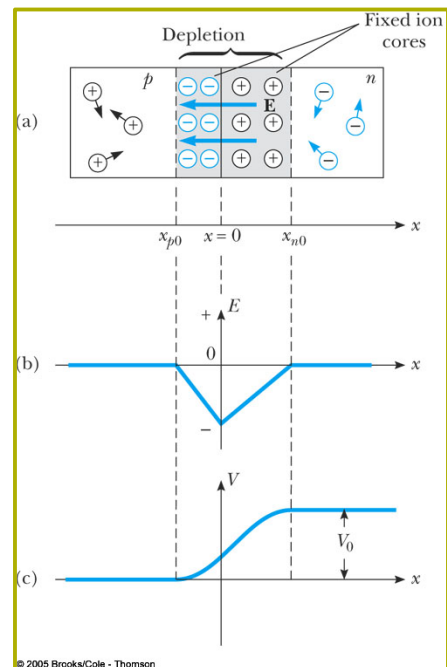


그림 12.29 (a) p-n 접합의 물리적 배열 (b) p-n 접합에서 형성된 전기장 (c) p-n 접합에서 형성된 전압

### ▲ 다이오드 동작(diod action)

- 🍎 바이어스(인가 전압)에 따라 한 방향으로만 전류를 소통시킨다
- 🍎 순방향 바이어스에서 퍼텐셜 장벽은 감소하여 전류가 지수적으로 증가한다.
- 🍎 역방향 바이어스에서 퍼텐셜 장벽은 증가하여 빠르게 포화값에 도달한다.

다이오드의 전류-전압의 관계

$$I = I_0 (e^{qV/k_B T} - 1) \quad (12.35)$$

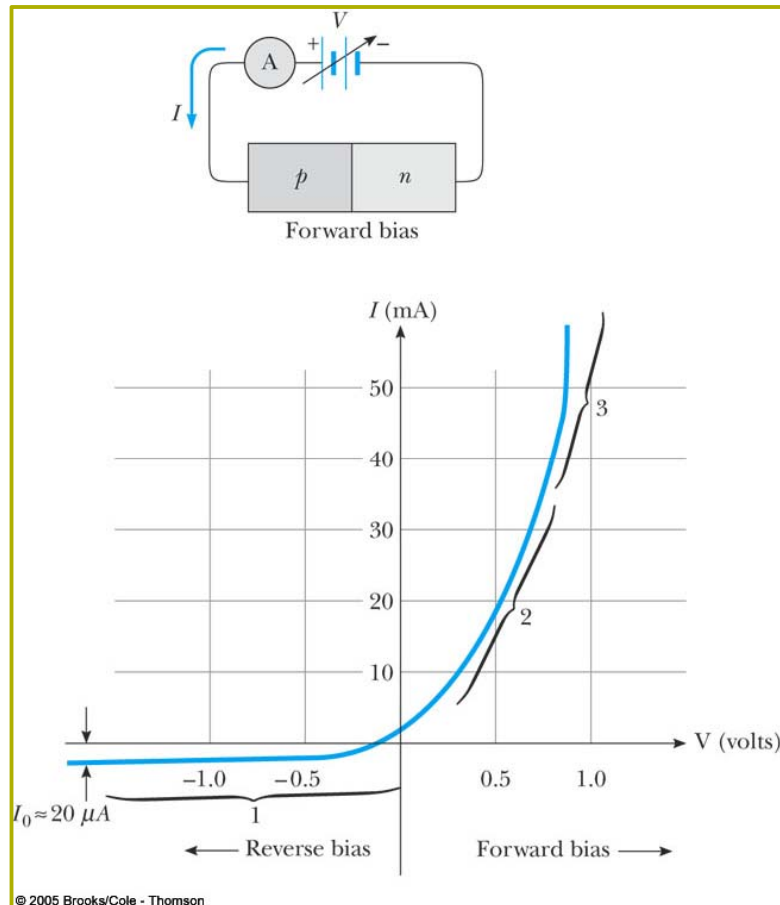


그림 12.30 실제 다이오드에 대한 특성 곡선.

- ◆ 1영역 ; 역 바이어스 작동
- ◆ 2영역 ; 일반적인 순 바이어스 작동
- ◆ 3영역 ; 집합 레이저에서 필요한 급격한 순 바이어스 작동

### 예제 12.3 다이오드에서의 순방향 및 역방향 전류

순방향 전류(+1.0V)의 역방향 전류(-1.0V)에 대한 비를 계산하라.

$$\frac{I_{forward}}{I_{reverse}} = \frac{I_0 (e^{+qV/kT} - 1)}{I_0 (e^{-qV/kT} - 1)}$$

$kT = 0.025 \text{ eV}$  이라면

$$\frac{I_f}{I_r} = \frac{e^{40} - 1}{e^{-40} - 1} = -2.40 \times 10^{17} !!!!$$

▶ 광방출 및 광흡수 다이오드-LED, 레이저, 태양전지

▶ LED(Light -Emitting Diode), 주입 레이저(Injection Laser)

전도띠로 들뜬 전자는 정공과 결합하여 띠 간격에 해당하는 광자를 방출한다.

▶ 태양전지(Solar Cell or Photovoltaic Device)

빛에 의해 만들어진 전자와 정공이 접합 전기장에 의해 분리되어 전류로 모아지는 기기

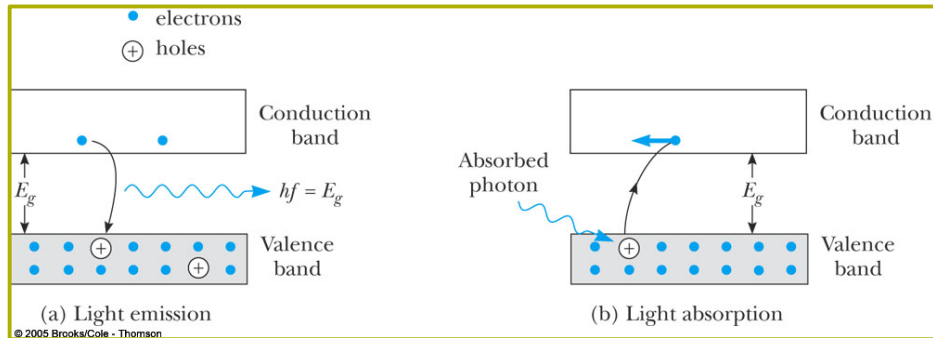
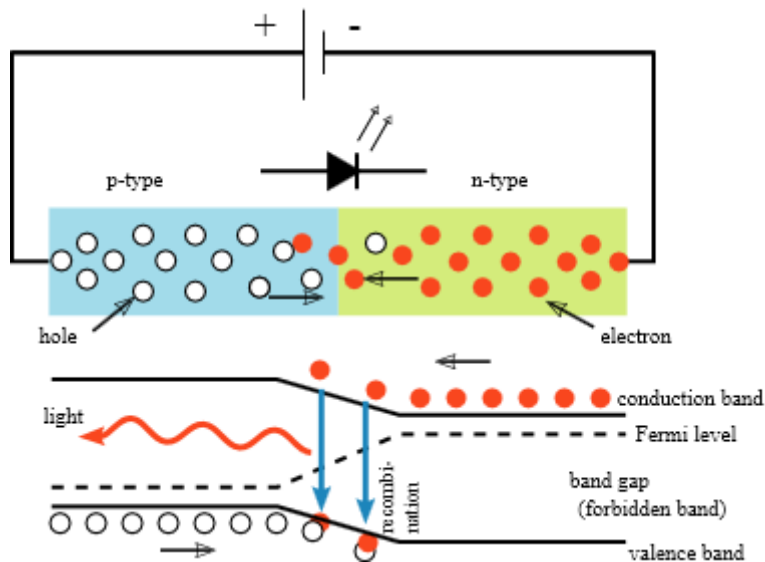
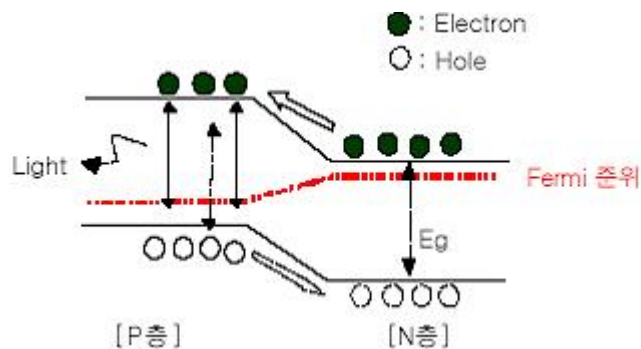


그림 12.31 (a) 반도체로부터 빛 방출. (b) 반도체에 의한 빛 흡수. 태양전지



## ▶ 접합 트랜지스터(The Junction Transistor)

### ▶ 트랜지스터의 발명

- ◆ John Bardeen, Walter Brattain, William Shockley, 1948
- ◆ 3극 진공관의 기능 - 증폭작용
- ◆ 전자장비에서 진공관을 대체
- ◆ 전자산업 혁명의 준비

### ▶ pnp transistor

### ▶ npn transistor

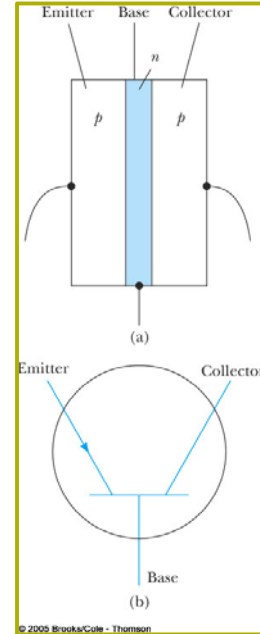
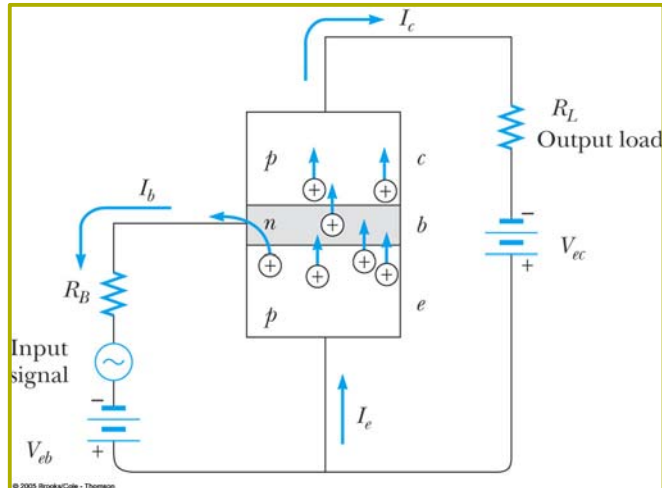


그림 12.33 작은 베이스 전류  $I_b$ 는 큰 컬렉터 전류  $I_c$ 를 조절한다.

### ▶ 전류 증폭

$$I_e = I_b + I_c$$

$$I_b \ll I_c$$

$$I_c = \beta I_b \quad \beta \approx 10 \sim 100 ; \text{ 전류이득}$$

## 장 효과 트랜지스터(Field-Effect Transistor, FET)

- FET의 개발 ; 1960년대 새로운 전자 산업의 도약의 계기
- 접합 트랜지스터보다 훨씬 만들기 쉽고, 전력 소모가 적다.
- MOSFET는 고집적 IC의 도래를 가능하게 함

### ▲ MOSFET 증폭기 ; 전압 증폭기

- ◆ 소스, 드레인 ; n-type 반도체에 연결된 소스와 드레인은 n-channel로 연결
- ◆ 소스, 드레인과 n-channel은 p-type 반도체에 파묻혀 있다.
- ◆ n-channel 바닥을 따라 결핍층이 형성된다. (소스, 드레인의 바닥에도 결핍층이 형성된다)
- ◆ 게이트는 절연 산화 실리콘의 막에 의해 n-channel과 분리(절연)
- ◆ 소스, 드레인에 전압( $\Delta V_{SD}$ )이 인가되면 n-channel의 상층부를 통하여 전자가 이동한다.
- ◆  $\Delta V_{SG}$ (소스-게이트간의 전압)의 게이트에 인가된 양(+)의 전위는 n-channel에 아래로 향하는 전장을 가하게 되어, 전자에 위쪽 방향의 힘을 받게하고, 결핍층을 좁히고 상층부를 넓혀서 전자의 소통을 원활히 한다. → Field Effect(장 효과)
- ◆ 게이트에 걸리는 신호의 변화는 소스-드레인 전류를 변화시켜 저항 양단의 출력 전압으로 증폭된다.

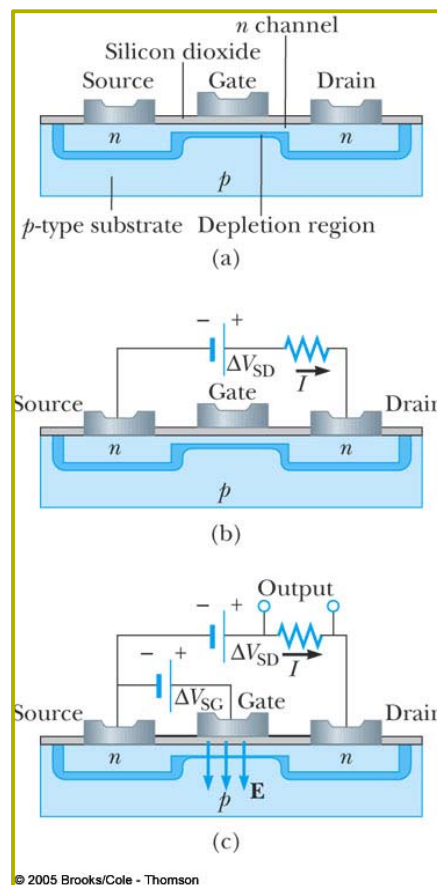


그림 12.34 (a)금속산화반도체 장 효과 트랜지스터(MOSFET)의 구조 (b)소스-드레인 전압이 걸리면, 결과적으로 회로에 전류가 존재한다. (c) 게이트 전압은 소스-드레인 전류를 조절하기 위하여 사용된다. 그 결과로 MOSFET는 증폭기로 작용한다.

### ▲ MOSFET 전력스위치

- ◆  $\Delta V_{SG}$ 를 역전시켜 스위치로 작동하게 한다.
- ◆ 소모 전력이 낮은 스위칭회로의 구성에 사용(SRAM)
- ◆ 집적회로(Integrated Circuit)의 구성

### ■ 집적회로(Integrated Circuit, IC)

- 1953년 Texas Instrument, Jack Kilby(1923, 2000년 노벨상)  
Fairchild Camera, Robert Noyce, 1927~1992)
- 트랜지스터, 다이오드, 저항 및 축전기를 하나의 실리콘 조각에 내부적으로 연결시켜 만든 집합체
- 제2의 산업혁명; 컴퓨터, 통신 ; 정보화 시대의 도래
- 최초의 IC ; 실리콘 한 조각 위에 다수의 전자 장치를 포함
- VLSI(Very-large-scale integration)



그림 12.35 64비트 마이크로 프로세서(R1000 RISC). 이 프로세서의 면적은  $298\text{mm}^2$ , 약 600만개의 트랜지스터를 가지고 있다.

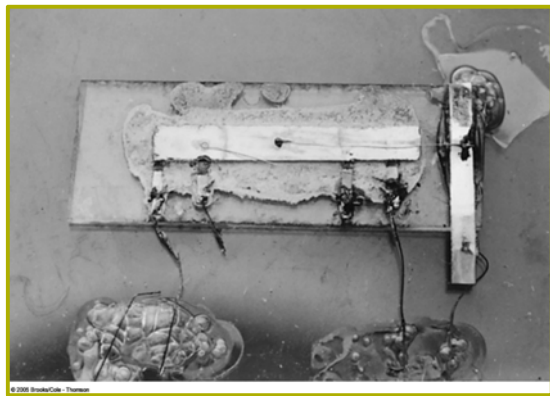
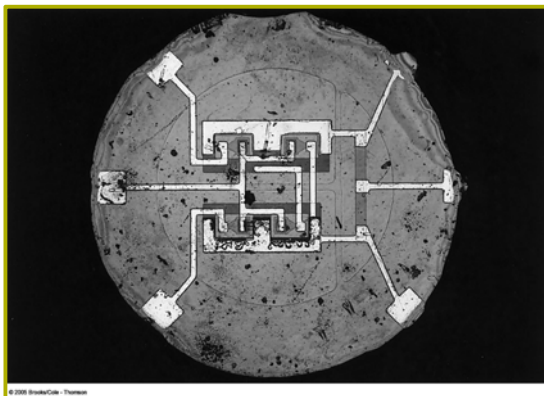


그림12.37. 로버트 노이스의 최초의 집적회로

그림12.36 잭 킬비의 최초의 집적회로. 1958년 9월 12일 테스트되었다.(Courtesy of Texas Instruments. Inc.)

### ▲ IC의 소형화와 집적도

- 근접 패키징의 결과
- 빠른 속도의 컴퓨터에 결정적인 역할
- 회로의 반응 시간;  $1\text{ns}/\text{ft}$

## ■ IC 칩 기술의 발전

● IC 칩의 기술은 지수적이다.

● 무어의 법칙

◆ 집적회로에서 제곱인치당 트랜지스터의 수는 18개월마다 두 배가 된다.

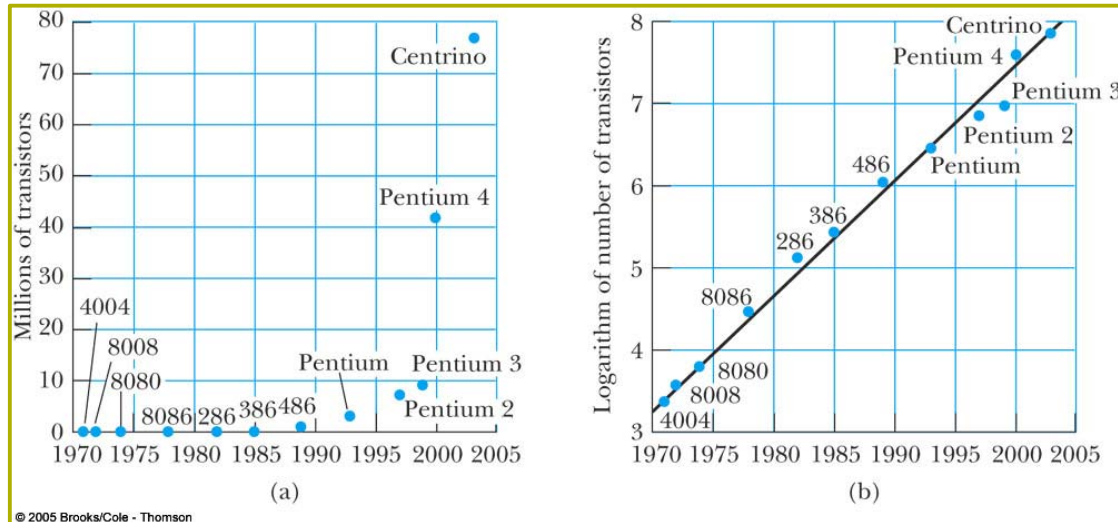


그림12.38 인텔사가 생산하는 컴퓨터 마이크로 칩과 관계된 칩 기술에서의 극적인 진보. (a) 생산 년도에 따른, 한 개의 컴퓨터 칩에 있는 트랜지스터 수의 변화. (b) (a)부분에서의 트랜지스터 수에 대한 로그의 그림. 이 그림이 근사적으로 직선이라는 사실은 성장이 지수적이라는 것을 보여준다.

## ■ RISC(reduced instruction set computer)

컴퓨터의 실행속도를 높이기 위해 복잡한 처리는 소프트웨어에게 맡기는 방법을 채택하여, 명령세트를 축소 설계한 컴퓨터를 말한다.

### 본문

범용 마이크로프로세서를 구성하는 요소에는 명령세트, 레지스터, 메모리 공간 등이 있다. 이중 명령세트는 RISC와 CISC(complex instruction set computer)의 2가지로 크게 분류할 수 있다. CISC란 소프트웨어 특히, 컴파일러 작성을 쉽게 하기 위해 하드웨어화할 수 있는 것은 가능한 모두 하드웨어에게 맡긴다는 원칙 아래 설계된 컴퓨터이다. 반면 RISC는 실행 속도를 높이기 위해 가능한 한 복잡한 처리는 소프트웨어에게 맡기는 방법을 택한 컴퓨터이다.

RISC의 특징을 CISC와 비교하여 알아보면 다음과 같다. 첫째, 명령의 대부분은 1머신 사이클에 실행되고, 명령길이는 고정이며, 명령세트는 단순한 것으로 구성되어 있는데, 가령 메모리에 대한 액세스는 Load/Store 명령으로 한정되어 있다. 둘째, 어드레싱 모드가 적으며, 마이크로 프로그램에 의한 제어를 줄이고, 와이어드 로직을 많이 이용하고 있다. 반면에 레지스터수가 많으며 마이크로 프로그램을 저장하는 칩의 공간에 레지스터를 배치한다. 셋째, 어셈블러 코드를 읽기 어려울 뿐 아니라 파이프라인을 효과적으로 사용하기 위해서 일부 어셈블러 코드를 시계열로 나열하지 않은 부분이 존재하여 컴파일러의 최적화가 필요하다. 최적화를 하지 않으면 파이프라인을 유효하게 이용할 수 없고, RISC를 사용하는 의미가 없어진다.

## 12.6 초전도체

### ▲ 초전도체(superconductor)

임계온도  $T_c$  아래에서 전기적 저항이 '영'이 되는 금속

### ■ 마이스너 효과(Meissner effect)

- 자기장이 초전도체 내부에서 방출되는 현상
- 초전도체 내부의 자기장은 시간에 따라 변할 수 없다.

### ▲ Faraday의 법칙

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

초전도체 내부의 전기장은 '0'이다.

$$\vec{E} = 0 \quad \frac{d\Phi_B}{dt} = 0 \quad ; \quad \text{초전도체 내부}$$

초전도체 내부에서 자기전속은 변할 수 없다.

$$B = \frac{\Phi_B}{A} = \text{일정}$$

- 완전 도체가 자기장 하에서 임계온도 이하로 냉각된다면, 외부 자기장이 제거된 후에도 자기장은 도체 내부에 가두어진다.
- 완전 도체를 임계온도 이하로 냉각한 후에 자기장이 가해진다면, 자기장은 초전도체로부터 방출된다.

**Table 12.9 Critical Temperatures for Various Superconductors**

| Material                                                         | $T_c$ (K) |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| Zn                                                               | 0.88      |
| Al                                                               | 1.19      |
| Sn                                                               | 3.72      |
| Hg                                                               | 4.15      |
| Pb                                                               | 7.18      |
| Nb                                                               | 9.46      |
| Nb <sub>3</sub> Sn                                               | 18.05     |
| Nb <sub>3</sub> Ge                                               | 23.2      |
| YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub>                  | 92        |
| Bi-Sr-Ca-Cu-O                                                    | 105       |
| Tl-Ba-Ca-Cu-O                                                    | 125       |
| HgBa <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>8</sub> | 134       |

© 2005 Brooks/Cole - Thomson

- 초전도체는 완전 도체이다.  $\rho = 0$
- 초전도체는 완전한 반자성체이다.
- 유도된 표면 전류는 외부의 자기장을 정확히 상쇄시킨다.
- $B_c$  이하의 외부 자기장에서 초전도체 내부의 자기장은 '0'이다
- $B_c$  이상의 외부 자기장이 가해지면 자기장은 시료를 통과한다. 초전도성이 파괴된다.

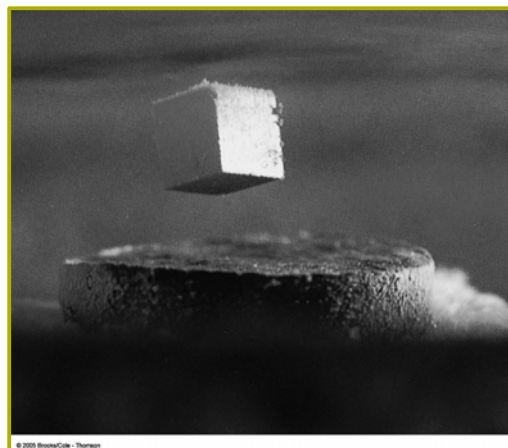
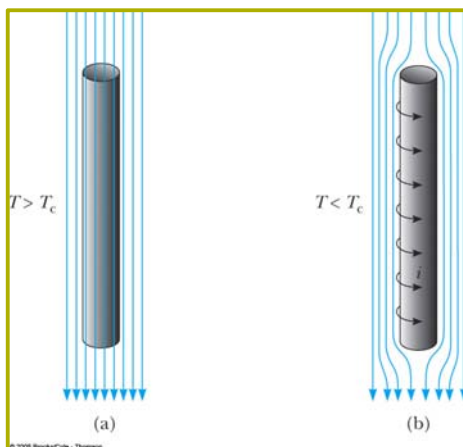


그림 12.39 외부 자기장하에서 긴 원통형의 초전도체.

그림 12.40 액체 질소 온도 77K로 냉각된 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 위의 영구자석

## BCS 이론

- 🍎 John Bardeen, Leon N. Cooper, J. Robert Schreiffer, 1957
- 🍎 1972년 노벨상 수상. 바딘은 두 번째 수상!
  - ◆ 두 전자는 격자 배열에서의 찌그러짐에 의해 인력으로 상호작용한다.
  - ◆ 두 전자는 쿠퍼쌍(Cooper pair)으로 묶여서 거동한다.
  - ◆ 쿠퍼쌍은 정수의 스핀을 가지는 보존적 거동을 한다.
  - ◆ 매우 낮은 온도에서 쿠퍼쌍의 보존들은 가장 낮은 양자상태에 존재한다.
  - ◆ 이때 쿠퍼쌍의 전체 모임은 단 하나의 파동함수에 의해 기술된다.
  - ◆ 쿠퍼쌍들과 격자이온들과의 산란은 쿠퍼쌍의 에너지를 변화시킬 수 있다.
  - ◆ 쿠퍼쌍의 에너지보다 낮은 허용에너지 준위는 없고, 더 높은 에너지 준위도 없다.
  - ◆ 충돌은 금지되고, 쿠퍼쌍의 운동에서 저항은 존재하지 않는다.

## 고온 초전도 현상

- 🍎 1986년 스위스 IBM 취리히 연구소, J. G. Bendorz, K. Alex Müller
  - ◆ Ba, La, Cu의 산화물이 30K에서 초전도 현상을 보임을 보고
  - ◆ 1987년 노벨상 수상
- 🍎 1987년 앨라배마 대학, 휴스턴 대학
  - ◆  $(YBa_2Cu_3O_7)$ 이 92K에서 초전도 현상을 보임
- 🍎 1988년 일본, 미국
  - ◆ 비스무스, 스트론튬, 갈륨, 구리의 산화물이 105K에서 초전도 현상을 보임
- 🍎 150K 이상의 고온 초전도체에 대한 보고
  - ◆ 고온 초전도 현상에 대한 확증된 이론은 없다.
  - ◆ 고온 초전도체는 세라믹이어서 성형을 어려움이 있다.

## 12.7 레이저

평형상태에 있는 원자의 복사원리

흑체복사, 자발적 방출(spontaneous emission), 유도방출(stimulated emission),

상태밀도 반전(population inversion), 들뜬상태의 수명, 시작 진동조건

응용 ; 의학, 기계, 사진, 측량, 동위원소분리, 통신, 컴퓨터, 무기

### ▶ 흡수, 자발적 방출 그리고 유도방출

Einstein ; 원자의 흡수, 자발적 방출, 유도방출

#### ▶ 원자의 흡수

$$E_2 - E_1 = hf$$

$B_{12}u(f)$  ; 흡수 확률

◆  $B_{12}$  ; Einstein의 흡수계수

◆  $u(f)$  ; 단위주파수당 에너지 밀도

#### ▶ 자발적 전이

들뜬 상태(2)에서 더 낮은 에너지 상태(1)로 돌아갈 일정한 확률을 갖는다.

$$t_s = \frac{1}{A_{21}} ; \text{자발적 방출수명}$$

◆  $A_{21}$  ; 자발적 전이계수

#### ▶ 유도방출

흡수, 방출과정에 광자(hf)가 상호작용할 때 이 광자의 전기장이 방출을 유도하고 방출된 전자기파(광자)는 유도 전자기파와 같은 위상(coherence)과 같은 방향을 갖는다.

$B_{21}u(f)$  ; 원자당 유도전이 비율(확률)

◆  $B_{21}$  ; Einstein의 유도방출계수

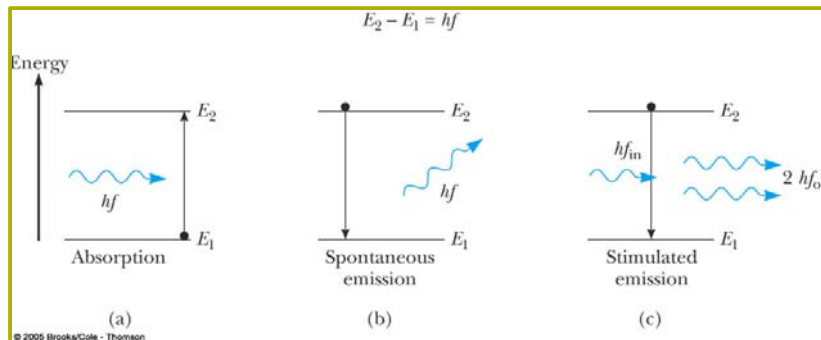


그림 12.41 (a) 흡수, (b) 자발적 방출. 위쪽 상태에서 존재하는 수명은  $t_s$  이고, 광자는 마구잡이 방향으로 방출한다. (c) 유도 방출. 이 과정에서 방출된 광자들은 유도 광자와 같은 위상을 가진다. 그리고 모든 광자는 같은 방향으로 진행한다.

온도 T에서 열적 평형상태에 있는 원자들의 복사

$E_1$ 과  $E_2$ 의 상태밀도의 비는

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2 - E_1)/kT} = e^{-hf/kT} \quad (12.37)$$

#### ▶ 동역학적 평형상태

흡수확률과 자발적 전이와 유도전이의 확률이 균형을 이룬 상태

$N_1u(f, T)B_{12}$  ; 단위시간당 1에서 2로 가는 원자의 수

$u(f, T)$  ; 단위주파수당 복사에너지 밀도(J/m<sup>3</sup>Hz)

유도방출에 의한 단위시간당 2에서 1로 가는 원자의 수는

$$N_2 u(f, T) B_{21}$$

자발적으로 단위시간당 2에서 1로 가는 원자의 수는

$$N_2 A_{21}$$

동역학적 평형상태에서는 단위시간당 위쪽으로의 전이회수와 아래쪽으로의 전이회수가 같다.

$$N_1 u(f, T) B_{12} = N_2 [B_{21} u(f, T) + A_{21}] \quad (12.38)$$

(12.37)을 이용하여

$$u(f, T) = \frac{A_{21}}{B_{12} e^{hf/kT} - B_{21}} \quad (12.39)$$

Placnk의 흑체복사법칙

$$u(f, T) = \frac{8\pi h f^3}{c^3} \frac{1}{(e^{hf/kT} - 1)} \quad (3.9)$$

과 (12.39)을 비교하면

$$B_{21} = B_{12} = B \quad (12.40)$$

$$\frac{A_{21}}{B} = \frac{8\pi h f^3}{c^3} \quad (12.41)$$

- 1) 흡수확률과 유도방출확률은 같다
- 2) 높은 주파수에서는 자발적방출이 유도방출보다 우세하다

## ■ 상태밀도 반전과 레이저 작동

열적평형상태 ; 일반적인 열적평형상태에서 들뜬상태보다 바닥상태의 원자수가 많다.

상태밀도 반전 ; 바닥상태보다 들뜬상태의 원자가 더 많은 경우

- 🍎 광자증폭 ; 상태밀도가 반전된 상태에서 하나의 광자(유도광자)로부터 전이가 유도되어 광자가 폭포처럼 증폭된다. 유도된 광자는 유도광자와 같은 위상으로 같은 방향으로 진행하며 같은 진동수를 갖는다.

Laser ; Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

유도방출에 의한 광증폭

## 🍆 레이저의 필수적 요소

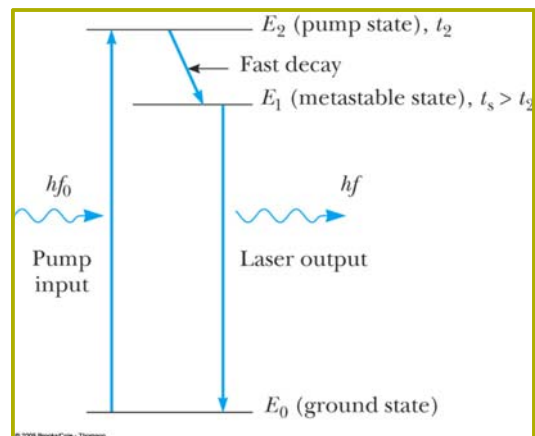
### 1. 상태밀도 반전을 일으킬 수 있는 에너지 원천

He-Ne Laser ; 전기방전

결정 Laser ; 광펌핑(optical pumping)

### 2. 3개의 에너지 준위

- 🍎 ground state ( $E_0$ ) ; 바닥상태
- 🍎 pump state ( $E_2$ ) ; 펌프상태
- 🍎 metastable state ( $E_1$ ) ; 준안정상태
  - 🍈 상대로 긴 수명( $t_s$ )을 가지는 중간 에너지 상태
  - 🍈  $E_0 < E_1 < E_2$



상태밀도가 반전되려면  $t_s$ 가 펌프상태의 에너지준위의 수명  $t_2$ 보다 길어야 한다.

두 개의 준위로는 상태밀도 반전을 할 수 없기 때문에 광증폭을 일으킬 수 없다.

### 3. 광 공명기

유도방출을 일으키는 광자를 오래 머물도록 하여 광자증폭이 용이하게 일어나도록, 레이저 빔에 수직으로 놓이는 두 개의 거울을 둔다.

두 거울 사이의 거리는 레이저의 반파장의 정수배가 되도록 조절한다.

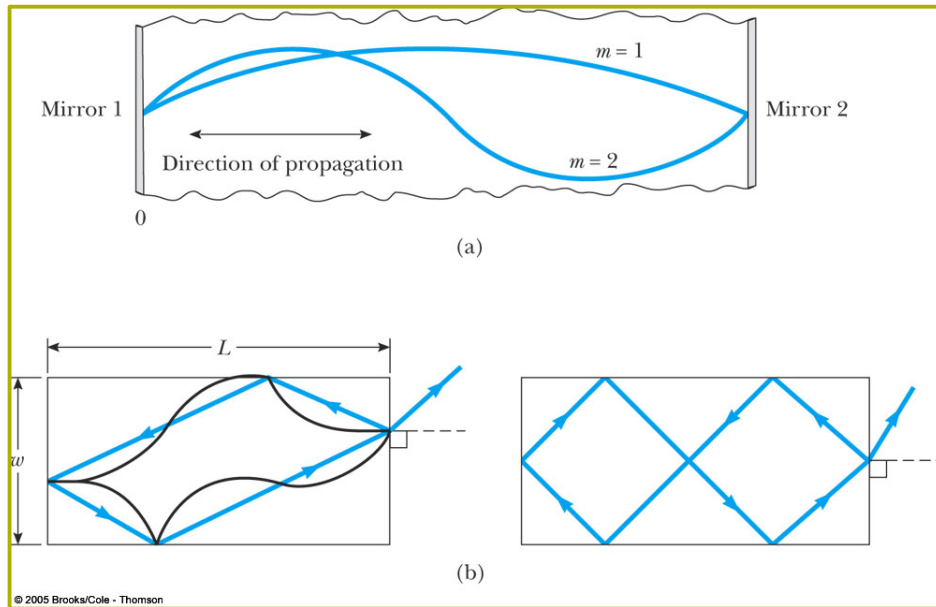


그림 12.43 레이저에서의 공진기 모드 (a)  $L = m\lambda/2$ 를 가지는 세로모드 (b) 횡방향 모드, 레이저의 양쪽 끝과 옆면이 반사체로 되며 반사체간 거리는 반파장의 정수배가 되어야 한다.

🍅 레이저의 특성 ; 단일 파장, 강한 세기, 같은 위상, 작은 빔 퍼짐

🍅 레이저의 응용 ; 외과수술, 측량, 길이측정, 핵 융합기의 에너지 원천, 금속절단, 광통신

#### 🌟 시작진동조건(start-oscillation condition)

laser을 발사하는 조건

공명공동 내부의 같은 위상의 광자의 방출수가 투과에 의한 감소요인보다 크면 레이저가 계속 유지된다.

**Table 12.10 Typical He-Ne Gas Laser Characteristics**

| Monochromaticity              | Beam Power | Beam Diameter at Laser Exit                                         | Beam Divergence |
|-------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------|
| $632.81 \pm 0.002 \text{ nm}$ | 10 mW      | 0.50 mm                                                             | 1.0 mrad        |
| Irradiance at Laser Exit      |            | Irradiance for a Beam Focused to a $10\text{-}\mu\text{m}$ Diameter |                 |
| 5100 mW/cm <sup>2</sup>       |            | $1.27 \times 10^7 \text{ mW/cm}^2$                                  |                 |

## 반도체 레이저

- 작은 크기 ( $\sim 10\text{mm}$ )
- 높은 효율 (25 ~ 30%)
- 간단함
- 긴 수명 ( $10^2\text{yr}$ )
- 빠른 반응 ( $\sim \text{GHz}$ )

반도체 레이저의 특징

1. energy band(에너지 띠)  $\leftrightarrow$  불연속적인 에너지 준위(기체레이저)
2. injection pumping(주사펌핑)  $\leftrightarrow$  광학적 혹은 방전에 의한 펌핑(기체 혹은 고체레이저)

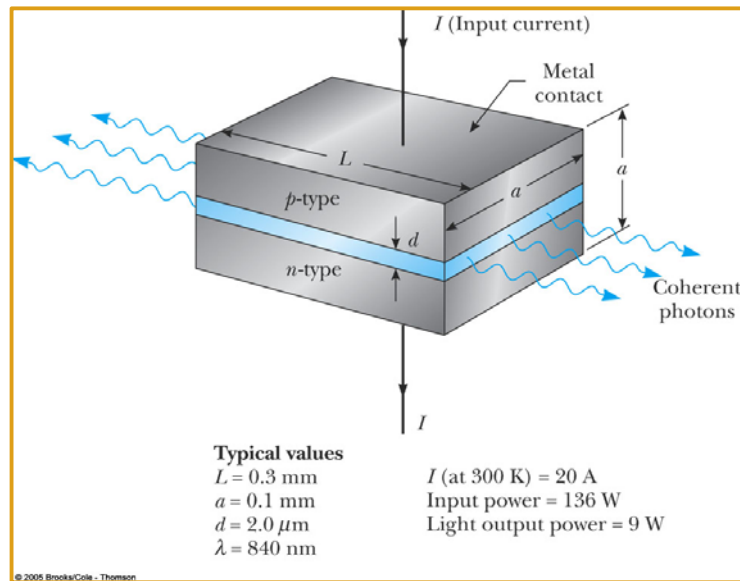


그림 12.44 GaAs p-n junction laser

## ▲ GaAs p-n junction laser

pair generation ; laser diode에 정방향 전류를 흘려서 전자와 홀(electron and hole)을 생성시키고  $\rightarrow$  전자와 홀이 결합하면서 laser을 복사한다.

반도체의 상태밀도 반전

- $\rightarrow$  자발적으로 방출된 광자가 유도 방출을 일으킨다.
- $\rightarrow$  방출된 광자는 에너지가 부족하여 흡수율이 낮다.
- $\rightarrow$  유도 방출이 흡수보다 많이 일어나면 광자의 파장이 일정해지고 laser가 작동한다.

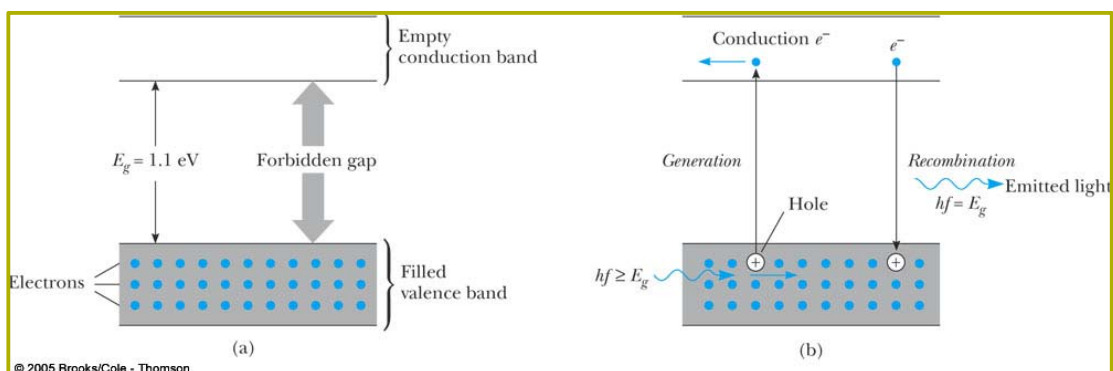


그림 12.45 (a) 0K에서 순수한 실리콘의 에너지 띠. (b) 실리콘에서 전자-홀 쌍의 생성과 재결합

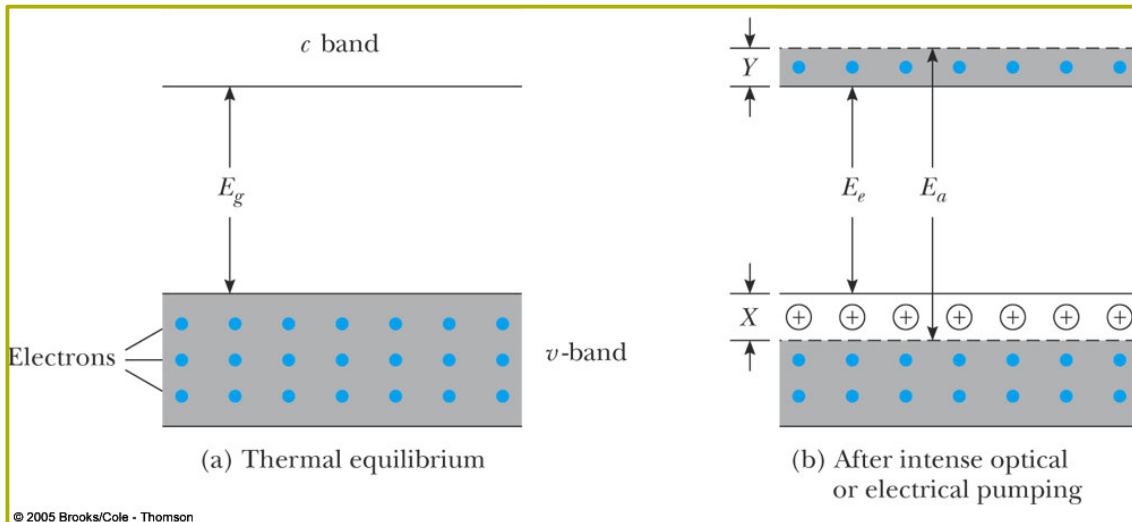


그림 12.46 반도체에서의 밀도 반전. 방출 에너지  $E_e$ 는  $E_g$ 와 같고, 흡수 에너지  $E_a$ 는  $E_g + X + Y$ 와 같다. 흡수 에너지는  $E_g + X + Y$ 이지  $E_g + X$ 가 아니다. 왜냐하면 전자는 파울리의 배타원리를 따르기 때문이다. 그러므로 전자들은  $Y$  위의 상태를 채우기 위하여 충분한 에너지를 흡수해야 한다.

#### ▲ 다른 형태의 반도체 laser

- 🍎 single-homojunction laser
  - 🟩 GaAs laser
- 🍎 double-heterojunction laser(DH laser)
  - 🟩 TbTe-PbSnTe, GaAS-AlGaAs laser