



# 태양전지 원리-고체전자론 개론

[www.ssu.ac.kr](http://www.ssu.ac.kr)

원자핵은 단지 양전하로만 뭉쳐 있는 것이 아니고,  $+e$  [C]의 양전하를 가진 양성자 (proton)와 이것과 거의 같은 질량을 가지지만, 전하는 가지고 있지 않은 중성자 (neutron)가 강한 핵력으로 결합된 구조로 되어 있다. 양성자나 중성자는 질량이 전자의 약 1840배나 되는 입자이며, 이들을 한데 합하여 핵자 (nucleon)라 한다. 그러므로 원자의 질량은, 전자의 질량을 무시하고 거의 핵자의 질량만이라고 생각해도 된다. 원자핵의 양성자 수  $Z$ 는, 핵의 양전하 수 ( $e$ 를 단위로 하여) 를 나타내고 동시에 원자 번호를 나타낸다. 원소의 종류에 따라서 양성자의 수  $Z$ 는 일정하나, 중성자의 수는  $Z$ 에 가까운 값 중에서 몇 가지의 값을 가지는 경우가 있다. 이를테면, 산소(O)의 원자 번호는  $Z=8$  (양성자 8개) 이나 중성자 수는 8,9,10개 중 어느 하나를 가진 원자들이 있다. 이와 같이, 같은 원소이지만 원자 1개씩 비교하면 양성자 수는 같으나, 핵자의 총수로 나타내는 질량수가 다른 원소들이 있는데, 이들을 동위 원소 (isotope)라 한다.

# @ 자유전자

일반적으로, 금속은 그림 1-2와 같이 다수의 원자가 규칙적인 그물 눈금 (격자) 모양으로 배열된 **결정 (crystal) 구조**로 되어 있다. 예를 들면, 반도체 재료에 사용되는 실리콘(Si)은 결정체의 전 영역에 걸쳐 그림 1-2의 (a)와 같이 **규칙적으로 배열**되어 있다. 이와 같은 구조를 **단결정**이라 한다. 그러나 도전 재료로 많이 쓰이는 구리는 이러한 **단결정 조각들이 많이 모여 있는 구조**로 되어 있다. 이와 같은 구조를 **다결정**이라 하며, 그림 (b)와 같은 모양이다.

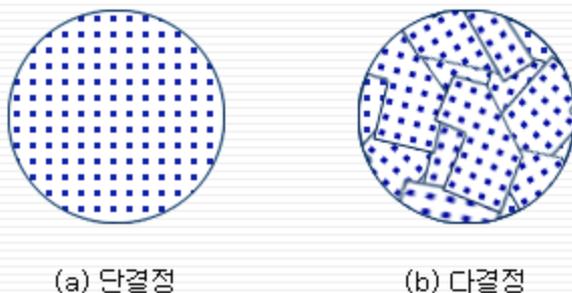


그림 1-2 결정 구조의 모형

구리 원자는, 그림 1-3과 같이 29개의 궤도 전자가 제각기 무리를 이루고 일정한 궤도를 따라 원자핵 주위를 돌고 있다. 이러한 궤도를 **전자각 (electron shell)** 이라 하고, 원자핵의 가까이로부터 순서대로 K각, L각, M각 및 N각이라 한다.

구리의 경우, **궤도 전자의 수** 는 K각에 2개, L각에 8개, M각에 18개, N각에 1개가 있다. 이 경우, 가장 바깥에 있는 N각의 궤도 전자는 원자핵으로부터의 구속력이 가장 약해, **외부로부터 에너지가 주어진다면 원자의 구속으로부터 이탈하여 자유로운 운동을 할 수 있는 자유 전자**로 된다. 자유 전자의 전하량  $e$ 와 질량  $m_0$ 은 다음과 같다.

$$e = -1.602189 \times 10^{-19} \text{ [C]}$$

$$m_0 = 9.109534 \times 10^{-31} \text{ [kg]}$$



그림 1-3 구리의 원자 모형

# @ 원자로부터의 전자기파 방사

원자 내의 에너지 계도 전자가 빛이나 열 등의 외부 에너지를 받아, 이에 따른 전자의 충돌 등으로 인해 에너지가 증가되어 보다 높은 준위를 가지게 될 때, 이를 **여기 (excitation)**되었다고 한다. 이 때, 더욱 강한 에너지를 받아서 원자 내의 계도 전자가 자유 전자로 될 때, 이것을 **전리 또는 이온화 (ionization)**라 하고, 원자는 양이온으로 된다. 여기된 계도 전자는 불안정하므로 안정된 더 낮은 준위로 내려가려고 한다. 이 때에 남는 에너지를 빛 등의 전자기파로 공간에 방사한다. 그림 1-4에 전자기파의 방사를 그림으로 나타냈다.

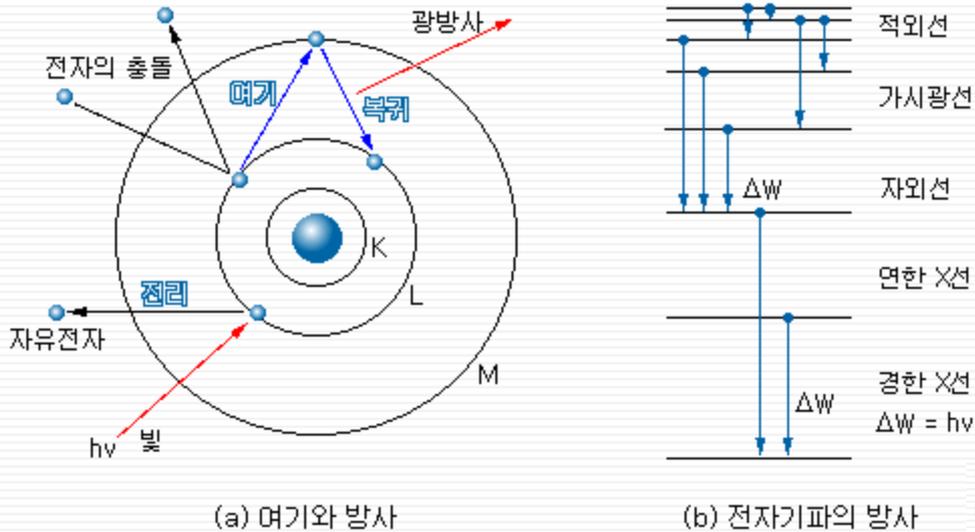


그림 1-4 원자로부터의 전자기파 방사

빛의 입자를 광자(photon)라 하는데, 광자는 빛의 진동수  $\nu$ 에 비례하는 다음과 같은 에너지를 가진다.

$$W = h\nu \quad [J] \text{----- (1-1)}$$

위의 식의  $h$ 를 **플랑크 상수**라 하고, 다음 값으로 나타낸다.

$$h = 6.626176 \times 10^{-34} \quad [J \cdot s]$$

빛에 의한 계도 전자의 여기나 복귀에 의한 발광시에,  $h\nu$ 의 정수 배의 에너지 교환이 광자와 계도 전자 사이에서 일어난다. 그림 1-4와 같이 여기된 다음부터 복귀까지 에너지 준위 간의 에너지차  $\Delta W$ 에 해당하는 전자기파가 방사된다.

# @ 에너지장벽

금속 도체에 전류가 흐르는 것은 원자핵의 구속에서 빠져 나온 전자, 즉 전도 전자가 금속 안에서 전기장과 역방향으로 가속되어 이동하기 때문이다. 따라서, 금속 내부에서 원자의 표면에는 전자가 원자의 구속으로부터 탈출하는 데에 필요한 에너지에 상당하는 장벽 (barrier layer) 이 있는데, 이 벽을 뛰어넘어 금속 내부를 자유로이 움직일 수 있는 전도 전자라도 그 금속의 표면을 뛰어넘어 자유 공간으로 이동될 수는 없다. 그것은 다시 큰 제2의 장벽이 있어 이것을 뛰어넘을 만큼의 에너지를 필요로 하기 때문이다. 즉, 전자가 금속 밖으로 나가려 해도 금속 중에 남은 원자의 양전하 사이에 정전력 (electrostatic force) 이 작용해서 다시 끌어당겨지기 때문이다. 이러한 전자 방출에 필요한 에너지를 띠 (band) 그림으로 나타내면 그림 1-5와 같이 된다.

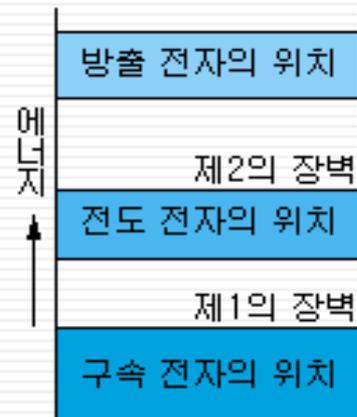


그림 1-5 전자방출에 필요한 에너지

# @ 전자의 에너지준위

그림 1-6과 같이 작은 공을 연마기 모양의 그릇에 넣고 원운동을 시켜 보면, 공을 빨리 돌린 편이 높은 궤도를 돌게 된다. 이와 마찬가지로, 그림 1-7과 같이 전자는 원자핵의 가장 자리를 일정한 법칙에 따라 정해진 몇 개의 궤도를 돌고 있다. 이 궤도에는 앞에서 설명한 바와 같이, 안쪽으로부터

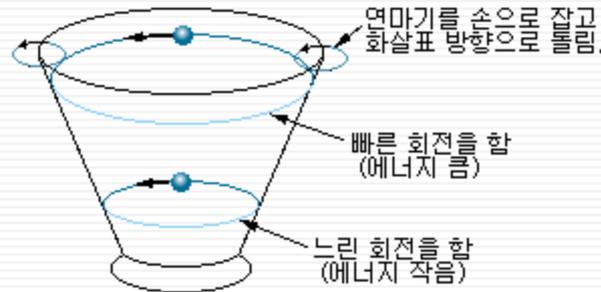


그림 1-6 에너지와 공의 위치

붙여진 번호(주 양자수라고 함) 1,2,3,...,n 에 따라  $2n^2$ 개의 전자가 안정된 상태로 들어가게 된다. 그리고 주 양자수 n의 궤도를 도는 전자의 에너지  $W_n$ 은 수소 원자의 경우

$$W_n = -13.58 \frac{1}{n^2} \text{ [eV]} \text{-----(1-2)}$$

로 된다는 것이 알려져 있다. 이 식은, 전자가 가지는 에너지는 원자핵으로부터 멀어지는 정도에 따라 단계적으로 커지고, 그 중간의 에너지를 가지는 전자는 존재하지 않음을 나타내고 있다. 이와 같은 에너지의 불연속의 관계를 **에너지 준위(energy level)**라 하고, 최저의 준위를 기저 준위라 한다.

식 (1-2)의 '-'부호는 에너지의 기점을 탈출 준위에 놓았기 때문이다.



# 전자의 에너지 준위

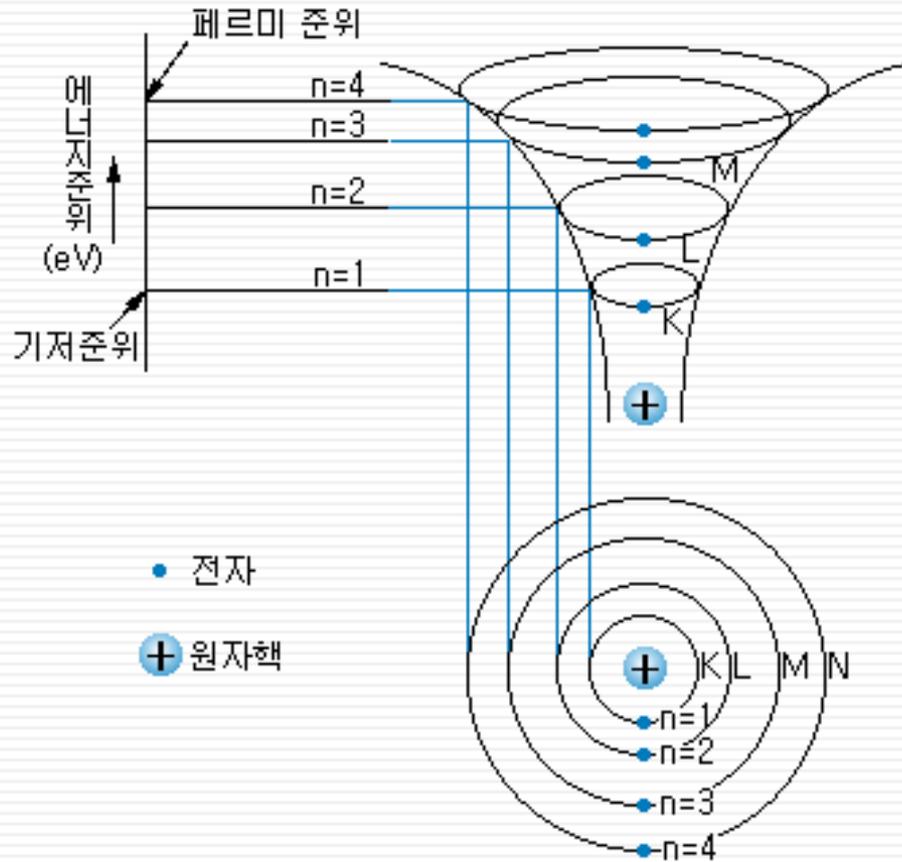
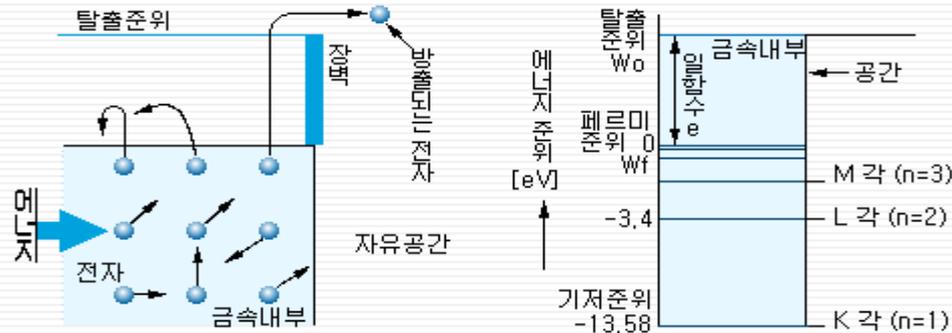


그림 1-7 전자의 에너지 준위

# @ 일 함수

그림 1-8의 (a)에 나타난 바와 같이, 금속에 열이나 빛 등의 에너지를 가하면 전자는 운동 에너지를 얻어 활발하게 움직이며, 에너지 준위가 높은 몇 개의 전자는 공간으로 방출되고, 이러한 일은 장벽을 뛰어넘을 만큼의 운동 에너지를 얻은 전자만이 자유 공간으로 방출된다고 생각하면 된다. 그림 1-8의 (b)는 이 상태를 에너지 준위로도 나타낸 것이다. 여기서, 장벽의 높이는 전자가 금속면을 탈출하는 데에 필요한 에너지 준위에 상당하는데, 이것을 일함수 (work function)  $W$ 라 한다. 또, 장벽의 윗부분은 전자가 금속면을 탈출하는 데에 필요한 에너지 준위에 상당하므로, 탈출 준위 또는 이탈 준위라고 한다. 따라서, 일함수는 탈출 준위( $W_0$ )와 페르미 준위( $W_f$ )와의 차( $W_0 - W_f$ ) [eV]로 나타낼 수 있다. 페르미 준위 (Fermi level)란, 절대 온도 영도 (0 [K])에서 가장 밖의 전자(가전자)가 가지는 에너지 높이이다. 일함수는 그 금속의 종류, 표면의 형태 등에 따라 다른 값을 가지고, 흔히  $W = e\phi$ 로 나타내며, 1개의 전자를 금속체로부터 공간으로 방출하는 데 필요한 일의 양으로 나타낸다. 따라서, 일함수가 작은 물질은 비교적 적은 에너지로 많은 전자를 방출시킬 수 있고, 그 단위는 1[V]의 전위에서 전자에게 주어지는 위치 에너지인 전자볼트 [eV]로 나타낸다.

그러므로 1 [eV] =  $1.6 \times 10^{-19}$  [J]이다.



(a) 큰 에너지 준위를 얻은 전자는 장벽을 뛰어넘어 공간으로 방출됨. (b) 금속의 에너지 준위와 일함수

그림 1-8 에너지 준위와 장벽



# 전자의 방출\_광전자방출

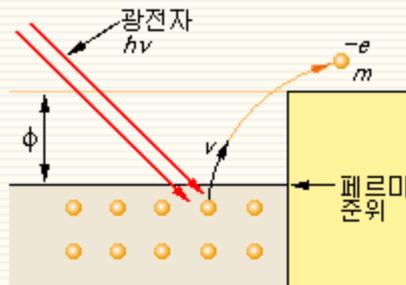


그림 1-11 광전자 방출

그림 1-11에 나타낸 바와 같이, 금속에 빛을 비추면 그 부분에서 전자가 공간으로 방출된다. 이것을 광전자 방출 (photoelectric emission) 이라 하며, 이 때에 방출된 전자를 광전자 (photoelectron) 라고 한다. 이 광전자 방출 현상은, 전자기파인 빛이 금속면에 부딪히면 그 빛의 주파수에 의해 금속 표면의 전기장과 자기장이 진동하므로, 자유 전자는 그의 힘을 받아서 크게 흔들려 에너지 장벽을 넘어 공간으로 방출되어 일어난다. 그리고 빛에는 이와 같은 파동성이 있

음과 동시에 입자성이 있다는 것을 아인슈타인 (Einsteinin,A.) 이 제창하였다. 즉, 주파수  $\nu$  [Hz]의 빛은  $h\nu$  [J]의 에너지를 가지는 광양자 (light quantum) 라 하는 입자가 빛의 속도로 진행한다고 생각한 것이다. 그림 1-11은 어떤 물질에  $h\nu$  [J]의 에너지를 가지는 광양자를 쬐었을 때, 그 표면에서 최대 방출 속도  $v$  [m/s]로 1개의 광전자가 그 물질의 일함수  $e\phi$  [eV]의 장벽을 넘고 다시  $\frac{mv^2}{2}$  [J]의 에너지를 얻는 것이 되므로

$$h\nu - e\phi = \frac{1}{2} mv^2 \quad [J] \text{-----} (1-4)$$

이 성립된다.

따라서,  $h\nu - e\phi > 0$ 의 범위에서는 광전자 방출이 되지만,  $h\nu - e\phi < 0$ 에서는 광전자 방출은 없다. 또,  $h\nu - e\phi = 0$ , 즉  $\nu_0 = \frac{e\phi}{h}$ 일 때 빛의 파장  $\lambda_0$ 을 광전 한계 파장 (photoelectric threshold wave length) 이라 한다.

# @ 에너지 밴드 이론

앞에서 배운 바와 같이, 고립 전자가 가지는 에너지는 불연속인 값이 되므로, 그림 1-32와 같은 선으로 나타낼 수 있다.

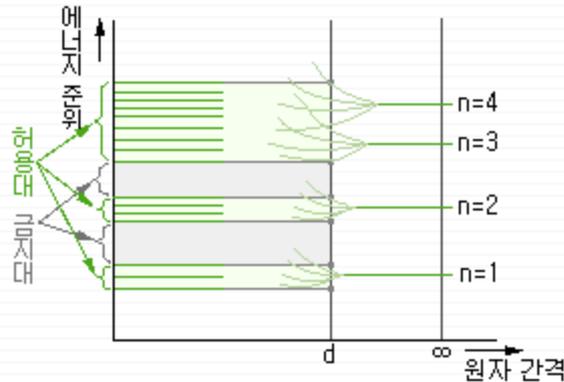
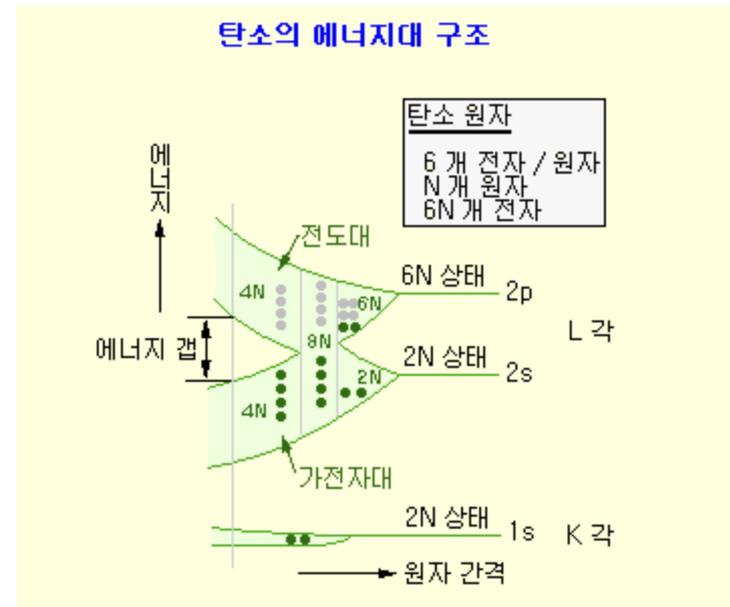
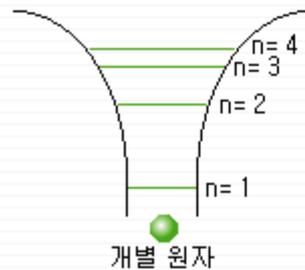


그림 1-32 고체의 에너지대 구조

그런데 고체에서는 원자가 좁은 간격으로 일정하게 늘어 놓여 있으므로, 원자의 내부만이 아니라 그 상호간에도 영향을 끼치게 된다. 그 결과, 에너지의 값은 다시 작은 단위로 나뉘어져 선 모양이 되고, 전자는 그 중에서 결정된 에너지 값이 궤도에 들어가 있다. 그림 1-32는 원자 간격이  $d[m]$ 인 고체의 에너지대 구조를 나타낸 것이다. 바꿔 말하면, 고체 내의 전자가 얻는 에너지 준위는 이와 같이 대(band) 모양으로 되어 있으므로, 고체의 전자 현상을 생각할 때, 에너지대의 구조를 기본으로 한 에너지대 이론 (energy band theory)을 쓰면 좋다. 에너지대 구조 중에서 전자가 존재할 수 있는 에너지대를 허용대(allowable band)라 하고, 전자가 존재할 수 없는 에너지대를 금지대(forbidden band) 또는 에너지 갭(energy gap)이라 한다.



# @ 에너지 밴드 이론



예를 들면, 그림 1-33의 도체의 에너지대 구조에서는,  $n=3$ ,  $n=4$ 의 준위는 전자가 들어갈 수 있는 허용대이고, 전기장을 가하면 전자는 그 반대의 방향으로 이동해서 전류를 흘릴 수 있다. 이와 같이 전자가 자유로이 이동되는 허용대를 전도대(conduction band)라고 한다. 또, 같은 허용대라 하더라도 들어갈 수 있는 전자의 수가 전부 들어가서 전자가 이동할 여지가 없는 허용대를 충전대(filled band)라 하며, 어떤 에너지를 가해 주면 전자가 들어갈 수 있는 허용대라 하더라도 보통의 상태에서는 전자가 존재하지 않는 허용대를 공핍대(exhaustion band, empty band)라고 한다.

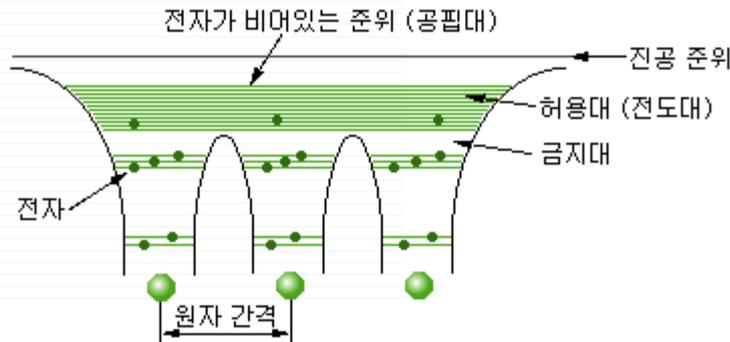


그림 1-33 도체의 에너지대 구조

# @ 에너지 밴드 이론

그림 1-34는 도체, 반도체, 절연체의 에너지대 구조를 나타낸 것으로, 이 그림의 가로축 쪽은 특별한 의미는 없다.

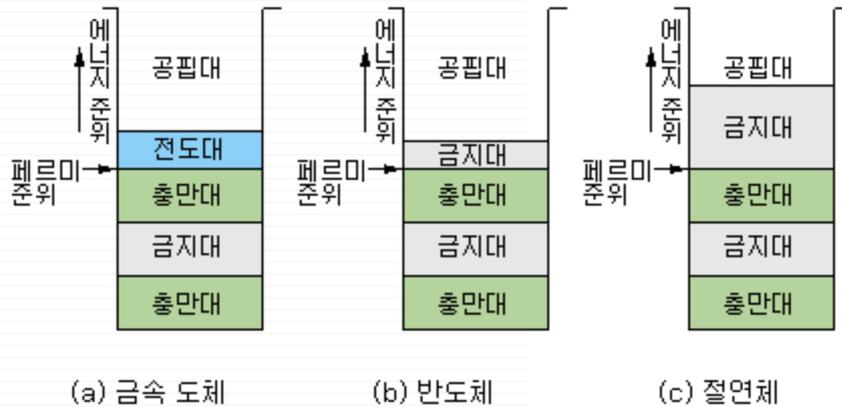


그림 1-34 총만대와 공핍대

## 금속 도체

그림 1-34의 (a)와 같이, 총만대에 공핍대가 접해 있어 공핍대에서는 총만대로부터 전도 전자가 옮겨져서 전도대를 형성하고 있기 때문에 전기 전도가 매우 좋다.

## 반도체

그림 1-34의 (b)와 같이, 보통 때에는 공핍대에는 전자가 없으며, 또 상위의 총만대와 공핍대와의 사이에 금지대의 폭이 좁다. 그래서 총만대의 일부 전자는 열이나 빛 등의 적은 에너지(1[eV]정도)에서도 비교적 용이하게 금지대를 넘어서 공핍대에 올라갈 수 있다. 이 결과, 너무 올라간 전자는 전도 전자가 되어서 도전성을 가질 수 있게 되나, 그 전도 전자의 수가 적으므로 매우 고저항의 것이 된다. 또, 이때에 그 총만대에는 전자가 빠진 구멍이 생긴다.

## 절연체

그림 1-34의 (c)와 같이, 전자의 움직임은 반도체와 같다고 보나, 총만대와 공핍대 사이의 에너지 갭이 크므로, 상당히 큰 에너지(6~7[eV])를 가하지 않으면 총만대의 전자는 공핍대에 올라갈 수 없다. 따라서, 절연체는 도전성을 가질 만큼 큰 전기장을 가하면, 절연 파괴를 일으켜 절연체로서의 역할을 잃고 만다.



**Thank You !**