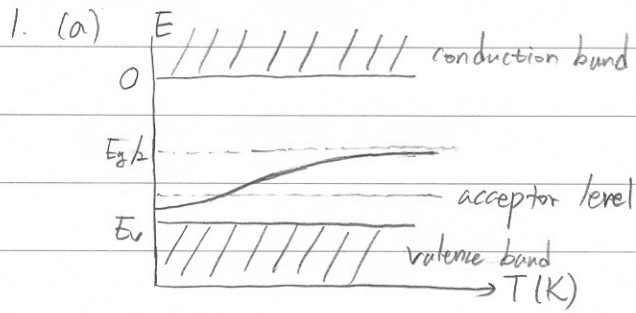


2008 재포의 전자기학 생각 모범 답안 (유상임 교수님)



0 K 에서, 전자는 모두 valence band 에 가득차 있고, 그 위의 level 인 acceptor level 과 conduction band 는 모두 비어있다 따라서 fermi energy 는 E_v 와 acceptor level 의 중간 지점에 존재하게 된다 온도가 올라감에 따라 전자는 acceptor level 으 먼저 올라가기 되고, fermi energy 도

따라서 상승하게 된다 온도가 충분히 올라가 intrinsic effect 가 우세해지면 fermi energy 는 $E_g/2$ 에 근접하게 된다.

(b) $300^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ 의 범위에서, donor 에 의한 extra electron 은 대부분 conduction band 에 존재한다고 생각할 수 있다 ($N_{e,ex} \approx 10^{19}$ 개/cm³)

intrinsic effect 에 의한 $N_{e,in}$ 계산

$$\text{at } 300^\circ\text{C}, E_g(573\text{K}) = 1.17 - \frac{5 \times 10^{-4} \times 573^2}{573 + 650} = 1.04 \text{ (eV)}$$

$$\text{at } 350^\circ\text{C}, E_g(623\text{K}) = 1.17 - \frac{5 \times 10^{-4} \times 623^2}{623 + 650} = 1.02 \text{ (eV)}$$

$$N_{e,in}(300^\circ\text{C}) = 4.84 \times 10^{15} \times 1 \times 573^{3/2} \cdot \exp\left(\frac{-1.04}{2 \times 8.616 \times 10^{-5} \times 573}\right) = 1.77 \times 10^{15} \text{ (개/cm}^3\text{)}$$

$$N_{e,in}(350^\circ\text{C}) = 4.84 \times 10^{15} \times 1 \times 623^{3/2} \cdot \exp\left(\frac{-1.02}{2 \times 8.616 \times 10^{-5} \times 623}\right) = 5.63 \times 10^{15} \text{ (개/cm}^3\text{)}$$

$J = Ne\mu$ 에서 온도 변화에 따른 μ 의 변화를 무시하면, J 은 N 이 비례하게 된다.

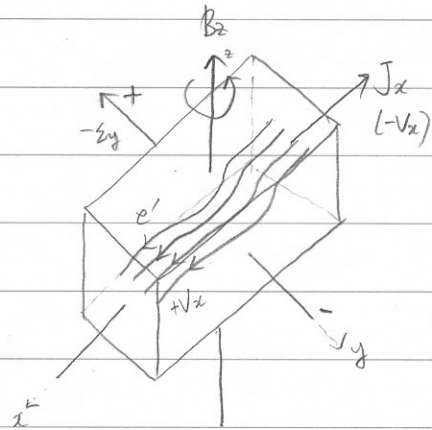
(n-type doping \rightarrow hole 에 의한 conduction 은 electron 이 비해 작으므로 고려하지 않음)

$$300^\circ\text{C} \text{ 에서의 } N_e = N_{e,ex} + N_{e,in} = 1.02 \times 10^{19} \text{ (개/cm}^3\text{)}$$

$$350^\circ\text{C} \text{ 에서의 } N_e = \quad \quad \quad = 1.06 \times 10^{19} \text{ (개/cm}^3\text{)}$$

따라서 $300^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ 영역에서의 J : not significantly changed.

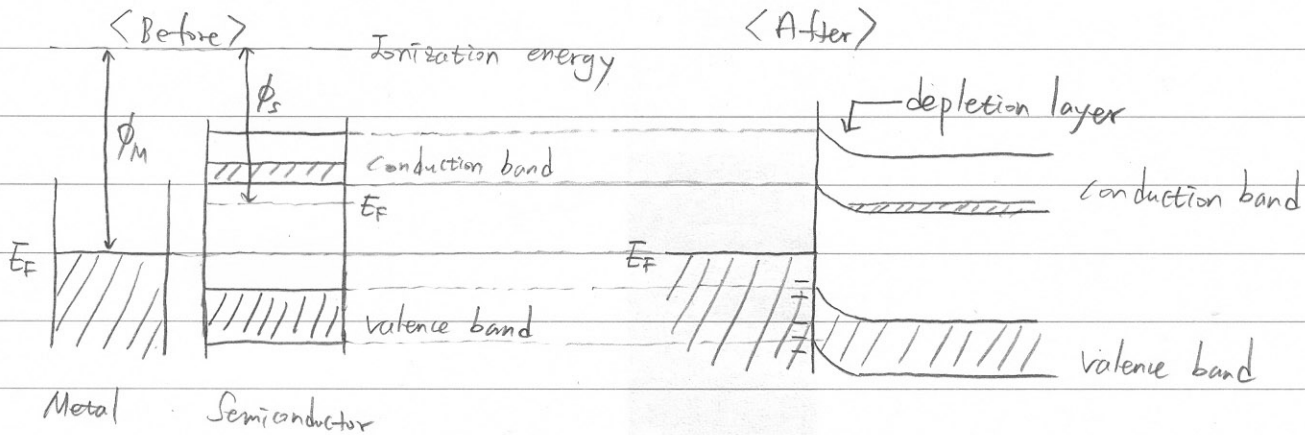
1. (c) n-type semiconductor \rightarrow electron 이 의한 conduction 이 우수하다.



그림과 같이 current density J ($-x$ 방향, 전자는 $+x$ 방향으로 이동) 와 magnetic induction B ($+z$ 방향) 을 생각하자. 이때 Lorentz force 로 인해 전자는 y 방향으로 힘을 받아 이동하게 되고, 이에 따라 y 축을 따라서도 새로운 전기장이 형성된다.

이렇게 전기가 흐를 때 magnetic field (or induction) 이 의해 수직인 방향의 전기장이 형성되는 것을 hall effect 라고 하며, 이 생성되는 전기장 (or Hall voltage) 을 측정함으로써 charge carrier (electron in n-type semiconductor) 의 갯수를 구할 수 있다.

2. (a) n-type, $\phi_M > \phi_S$

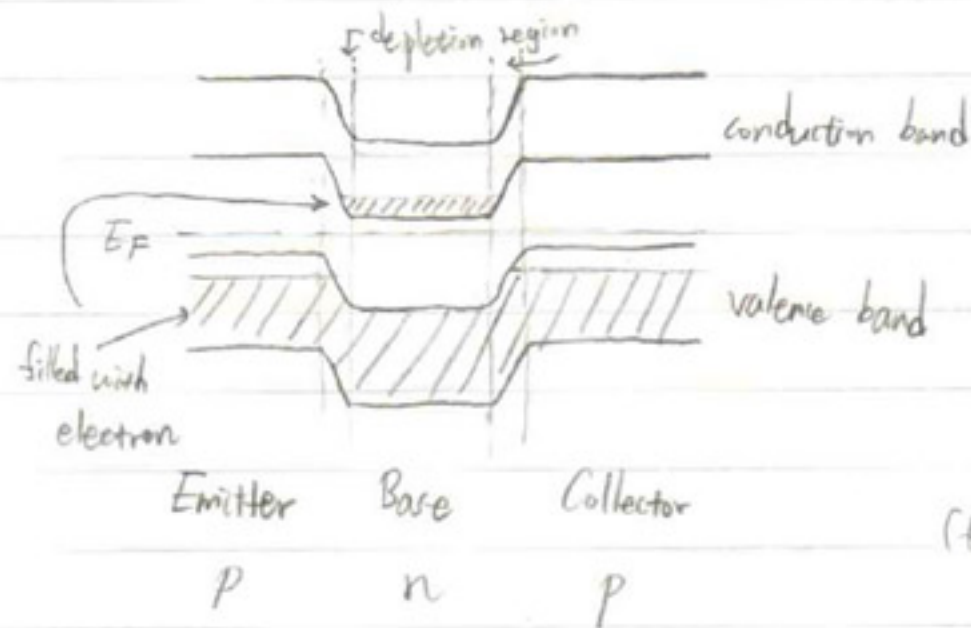


Contact 후에는 Fermi energy 가 같아질 때까지 semiconductor 에서 metal 로 전자가 이동

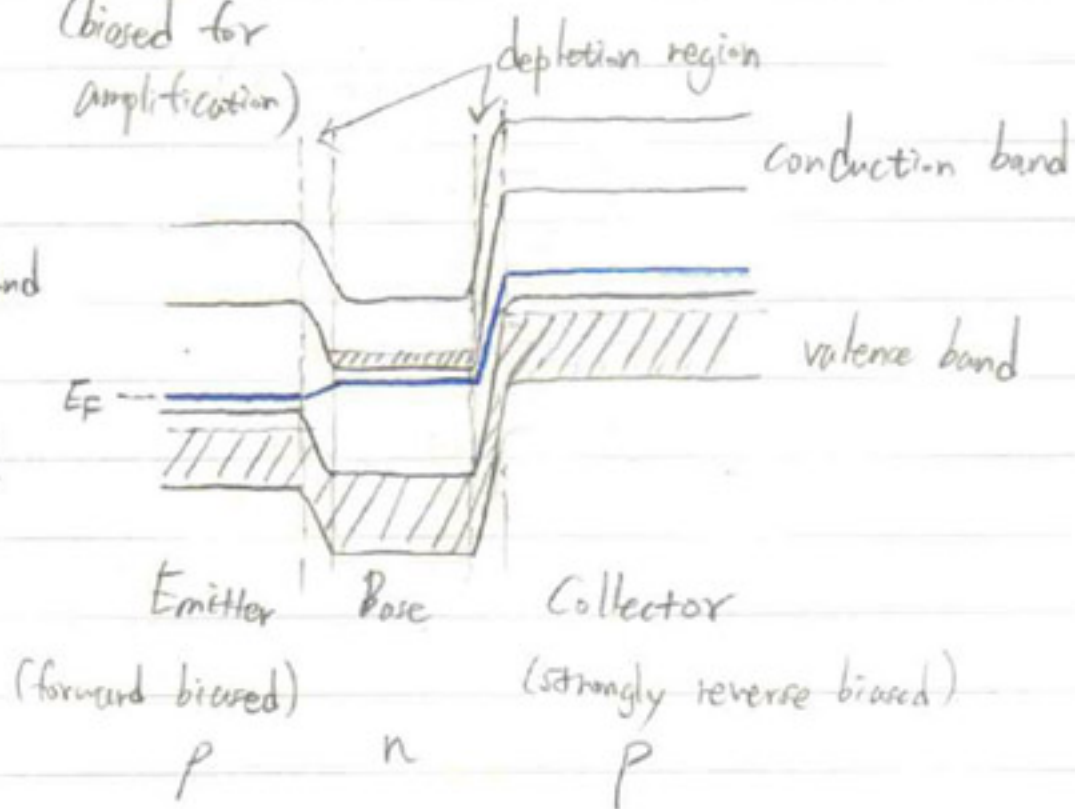
- \rightarrow metal surface 가 negatively charged 된다.
- \rightarrow depletion layer 형성
- \rightarrow potential barrier for electron (Schottky Barrier contacts)

2.(b) P-n-p transistor

band diagram (unbiased)



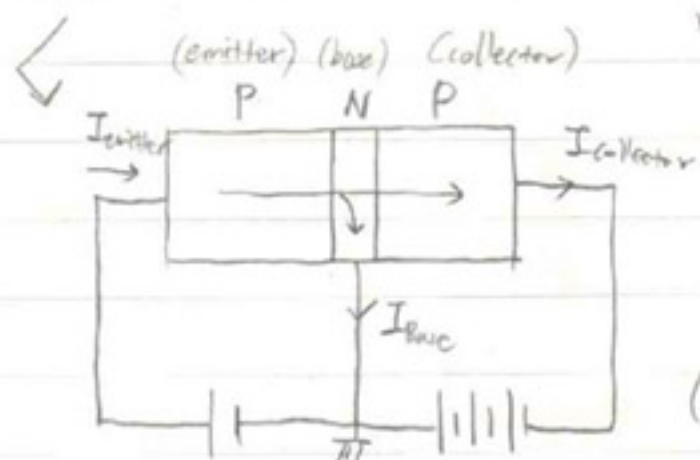
(biased for amplification)



n.p.n. transistor 과 비교했을 때 major charge carrier 가 hole 이라는 점이 다르다.

우선 emitter 에 존재하는 hole 이 potential barrier 를 뛰어넘게 되면 base 지역이 포화하게 되고, 이때 일부가 base 의 전자와 결합하여 소멸된다. 이러한 소수의 전자는 전위의 -극에서 계속 공급 되므로 이것이 양의 base current 가 된다. emitter 에서 base 로는 hole 을 전자와 결합하지 않은 것은 강한 reverse bias 에 의해 collector 쪽으로 가서 collector current 를 형성한다. 또한 emitter 의 hole 은 전위의 +극에서 점차 보급되어 emitter current 를 형성한다. 따라서 emitter current 의 대부분은 collector current 가 되고, 일부만 base current 를 형성하게 된다 위와 같은 transistor 에서 base current 의 작은 변화도 collector current 의 매우 큰 변화를 얻을 수 있으며, 이를 amplification 이 이용한다. 또한 base voltage 의 조절이 의해 emitter 에서 collector 로의 전류는

많은 electronic switch 기능도 나타낼 수 있다.



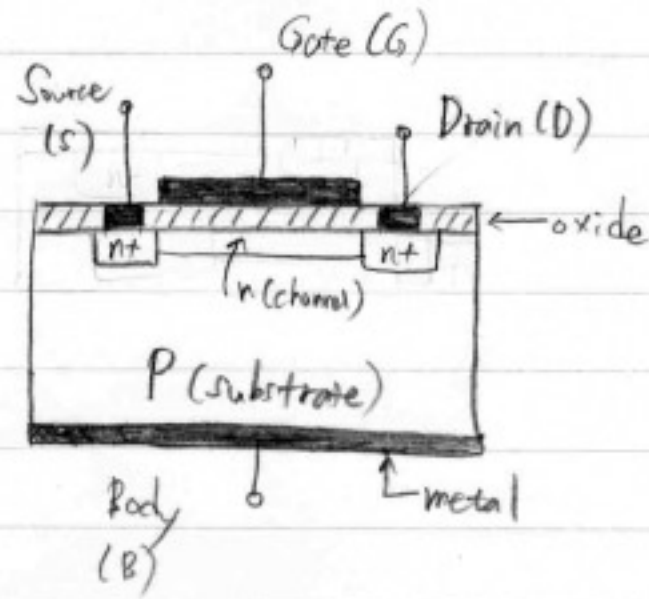
$$I_{emitter} = I_{base} + I_{collector}$$

$$(\Delta I_{emitter} = \Delta I_{base} + \Delta I_{collector})$$

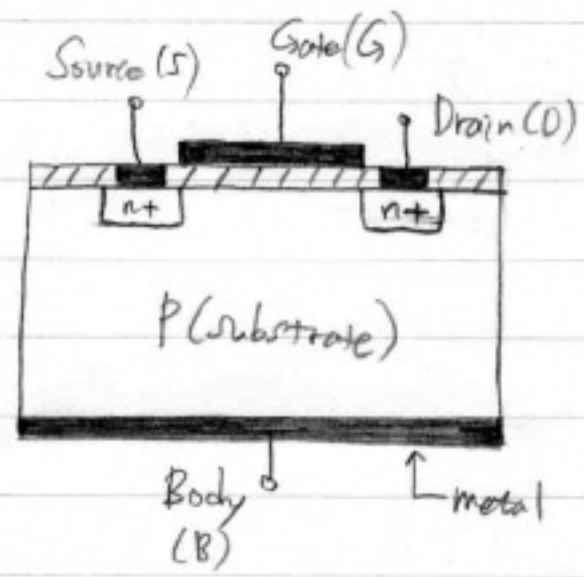
forward bias reverse bias

(common emitter)

2.(c) depletion-type MOSFET (normally-on)



enhancement-type MOSFET (normally off)



normally on: channel 부분에 n-type doping 이 되어있어 Gate 와 Body 사이에 전압이 걸리지 않아도 S-D 사이에 전류가 흐른다. G-B 사이에 negative 전압이 걸리면, 전자가 channel 영역에서 substrate 로 밀려나게 되고, 결국 특정 전압 (-) 이하에서는 S-D 사이에 전류가 흐르지 않게 된다.

normally off: P-type doped substrate 가 그대로 channel 부분이 있어서 G-B 사이에 전압이 걸리지 않으면 S-D 사이에도 전류가 흐르지 않는다. G-B 사이에 positive 전압이 걸리면, 대부분의 hole 은 body 부분으로 가게 되고, negative charge carrier 가 channel 부분에 모이게 된다 따라서 특정 전압 (+) 이 상에서는 S-D 사이에 전류가 흐르게 된다.

3. (a) Einstein relation $\mu_{ion} = \frac{D_e}{k_B T}$, $J_{ion} = N_{ion} e \mu_{ion}$, $D = D_0 \exp\left[-\frac{Q}{k_B T}\right]$

$\therefore J_{ion} = N_{ion} e \frac{D_e}{k_B T}$

$= N_{ion} e^2 \frac{D_0}{k_B T} \exp\left[-\frac{Q}{k_B T}\right]$

↑ Arrhenius equation

Let $J_0 = \frac{N_{ion} e^2 D_0}{k_B T}$, $\therefore J_{ion} = J_0 \exp\left[-\frac{Q}{k_B T}\right]$

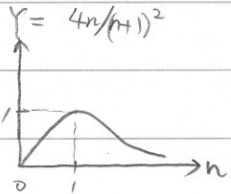
(b) $D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{k_B T}\right) \rightarrow \ln\left(\frac{D}{D_0}\right) = -\frac{Q}{k_B T}$

$\therefore Q = -k_B T \ln(D/D_0) = -8.616 \times 10^{-5} \times 300 \times \ln(10^{-17}/10^{-3}) = 0.833 \text{ (eV)}$

(c) $\begin{cases} D = \epsilon \epsilon_0 E \\ D = \epsilon_0 E + P \end{cases} \rightarrow \epsilon \epsilon_0 E = \epsilon_0 E + P, \therefore P = (\epsilon - 1) \epsilon_0 E$

for vacuum, $\epsilon = 1, \therefore P = 0, D = \epsilon_0 E$

4. (a) $R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}$ ceramic and polymer 에서는 통상적으로 $n \sim 1.5, k \sim 10^{-7}$ 값을 가진다. 이 때 $R \approx (n-1)^2 / (n+1)^2 = 1 - 4n / (n+1)^2$ 로 나타낼 수 있다



왼쪽 그림과 같이 Y 값이 변하므로, R 값 ($R = 1 - Y$) 은 n이 큰 곳에서 0 가 된다.

ceramic, polymer 의 $n \sim 1.5$ 이므로 R 은 매우 작은 값을 가지게 된다

반면 metal 은 n이 바빠 k 값이 크게 되므로 ($n < 1, k > 3$) IR region 의 경우

이 값이 가 리 심해져 $R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \approx \frac{k^2}{k^2} = 1$ 에 근접하게 된다

(b) $R = \frac{\sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2} + 1 - \sqrt{2(\sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2} + \epsilon_1)}}{\sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2} + 1 + \sqrt{2(\sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2} + \epsilon_1)}}$ Hagen-Rubben relation 을 유도하기 위해서는 metal, IR region 에의 가정이 필요하다 ($\epsilon_2^2 \gg \epsilon_1^2$)

$\therefore R \approx \frac{\epsilon_2 + 1 - 2\sqrt{\epsilon_2}}{\epsilon_2 + 1 + 2\sqrt{\epsilon_2}} = 1 - \frac{2\sqrt{\epsilon_2}}{\epsilon_2 + 1 + 2\sqrt{\epsilon_2}} = 1 - \frac{2\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_2} + \frac{1}{\sqrt{\epsilon_2}} + \sqrt{\epsilon_2}}$ (\therefore IR region, $\epsilon_2 \approx 10^4$)

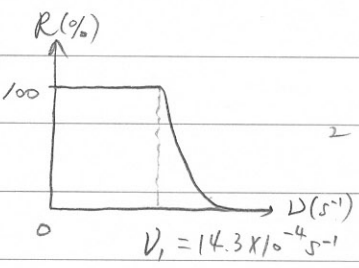
$\therefore R = 1 - \frac{2\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_2}} = 1 - 4 \sqrt{\frac{\pi \epsilon_0 \nu}{\sigma}}$

$\left(\epsilon_2 = \frac{\sigma}{2\pi \epsilon_0 \nu}\right)$ (for small frequency, $\sigma = \sigma_0$)

4. (c) Free electrons without damping

$$\hat{n}^2 = 1 - \frac{e^2 N_f}{4\pi^2 \epsilon_0 m \nu^2} \rightarrow \nu_i^2 = \frac{e^2 N_f}{4\pi^2 \epsilon_0 m} \quad (N_f: \text{free electrons/cm}^3)$$

- i) $\nu > \nu_i, \hat{n}^2 > 0 \rightarrow \hat{n}: \text{real} \rightarrow k=0 \therefore R = (n-1)^2 / (n+1)^2$
- ii) $\nu < \nu_i, \hat{n}^2 < 0 \rightarrow \hat{n}: \text{pure imaginary} \rightarrow n=0 \therefore R = (1+k^2) / (1+k^2) = 1$ ($R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}$)



($\nu > \nu_i$ 영역) ν 증가 \rightarrow n 증가 \rightarrow R 감소 (ν 증가함에 따라 R 은 점점 0으로 수렴)

5. (a) $B = \mu_r \mu_0 H$

$B = \mu_0 (H+M)$
 $M = \chi H$

$\mu_r = 1 + \chi$

$B = \mu_r H$

$B = H + 4\pi M$
 $M = \chi H$

$\mu_r = 1 + 4\pi \chi$

$B = (1 + 4\pi \chi) H$

< SI >

< cgs >

(b) < SI unit > $B = \mu_r \mu_0 H = 1.001 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 5.0 \times 10^5 = 0.629 \text{ (T)}$

$M = \chi H = (\mu_r - 1) H = 0.001 \times 5.0 \times 10^5 = 500 \text{ (A/m)}$

(c) for a superconductor : $\mu_r = 0, \chi = -1$

Meissner effect : 초전도 물질이 $T < T_c$ 가 되면, 기존에 물질 내부에 통과하고 있는

magnetic flux line을 모두 밖으로 밀어내는 현상 (induction)

