2017117876 김승현 HW#1

1. Covalent bonding 에서 bonding force 의 물리적 근원을 설명하고, conductivity 특성과 이러한 특성이 나타나게 되는 이유에 대해 설명하시오

공유결합에서는 전류를 흐르게 하는 자유전자가 없다. 이 사실은 엄밀하는 절대온도 0K 에서 확실히 적용된다. 공유결합을 이루는 힘의 근원은 원자핵이 전자를 잡아당기는 것이다. 절대온도 0K가 아닌 높은 온도에서는 공유결합이 느슨해지면서 일부 전자가 전도전자가 된다. 이로 인해 전류가 흐를 수 있게 되는것이다. 따라서 conductivity 는 자유전자와 정공의 생성이 늘수록 증가한다.

2. Energy bandgap 양상에 따라서 conductor / semiconductor / insulator 로 나누어짐을 설명하시오.

Energy band diagram 에서 Conduction Band 와 Valance Band로 나뉘는데, Conduction Band 에 Valance Band 에 있는 전자가 올라가서 자유전자가 되면 전류가 흐르게 된다. 이 사이의 간격을 Bandgap 이라고 하며 Si의 경우 $E_g = 1.1eV$ 정도로. E_g 보다 큰 에너지를 주면 전류가 흐르게 되는 Semiconductor 이다. insulator는 E_g이 커서 전류가 안 흐르는 절연체인데, 명확한 boundary는 없지만 주로 4eV 이상일 때 이다. Conductor 같은 경우는 E_g이 없고 두 밴드가 겹쳐져 있으므로 아주 쉽게 전류를 흘릴 수 있다.

3. 4족 반도체 Si Crystal 에서 energy bandgap diagram이 형성됨을 설명하시오.

고체로 이루어진 동일한 원자나 분자 단위의 물질이 결합하는 물질에 Energy band 를 형성하게 된다. 최외각전자들끼리 공유결합을 해서 무수히 많이 겹쳐지면 Energy band가 생긴다. 겹쳐지지 않는 이유는 파울리의 배타원리에 의해서 Band를 이루게 되는 것이다. 이웃한 두 원자들이 가까워짐에 따라 동일한 오비탈을 만나게 되고 에너지 준위가 떨어진 상태로 존재하게 되는것인지, 이는 마치 하나의 에너지 준위가 두개로 분열된 것 같은 모습을 보여주고 이 에너지 차이를 Band gap 이라고 한다.

4. Effective mass 개념에 대해 설명하시오.

결정 내 전자나 정공은 격자내의 원자들과 상호작용을 하고 있으므로 특정 위치에서 바라볼때마다 원자의 밀집도가 달라. 각각 걸리는 힘이 다르게 보인다. 고전역학 뉴턴의 운동법칙 $F=ma$ 를 만족을 시키려 할때 $F = F_{int}$ (내부힘) $+ F_{ext}$ (외부힘) 에서 내부적인 힘은 특정 위치에서 마다 다르므로 이걸 고려하며 수식을 풀어나가는 것은 상당히 비효율적이라 고전역학 '$F=ma$'에서 m은 유효질량으로 바꿔줌으로써 간소화하게 문제를 해결할 수 있게 해준다.

5. Intrinsic semiconductor 에서 온도에 따른 Intrinsic Carrier density 양상을 bandgap diagram 과 Fermi-Dirac function 으로 설명해 보시오.

진성반도체에선 $n=p=n_i$ 이며 전자-정공 재결합률이 np곱에 비례해 $n_i^2=np$ 를 만족한다.

$n = N_c e^{-\frac{(E_c-E_F)}{kT}}$ 이다. $p = N_v e^{-\frac{(E_F-E_v)}{kT}}$ 이며

$np = N_c N_v e^{-\frac{(E_c-E_v)}{kT}}$ 이므로 $E_c - E_v = E_g$ 으로 나타내면 $n_i^2 = np = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{kT}}$

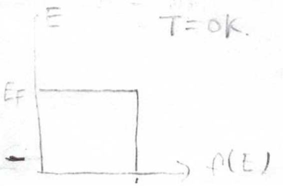
$n_i = \sqrt{N_c N_v}\, e^{-\frac{E_g}{2kT}}$ 이다.

여기서 n_i 가 $e^{-\frac{E_g}{2kT}}$ 에서 T의 영향을 받음을 알 수 있다. 즉 온도가 증가할수록 n_i는 증가한다.

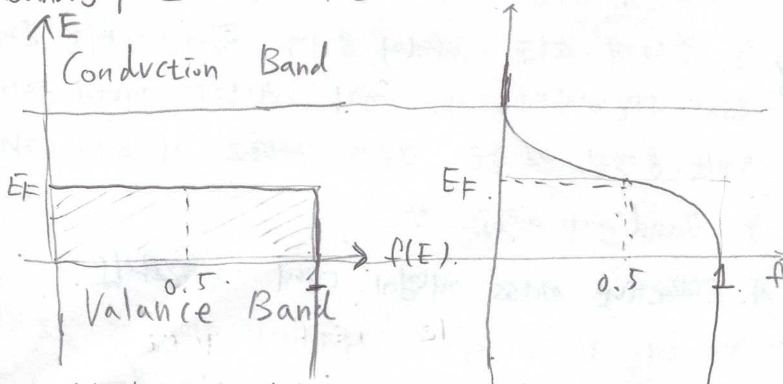
또한 $n = \int_{E_c}^{\infty} f(E) D_c(E)\, dE$ 에서

$n \propto f(E) = \frac{1}{1+e^{(E-E_F)/kT}} \simeq e^{-\frac{E-E_F}{kT}}$

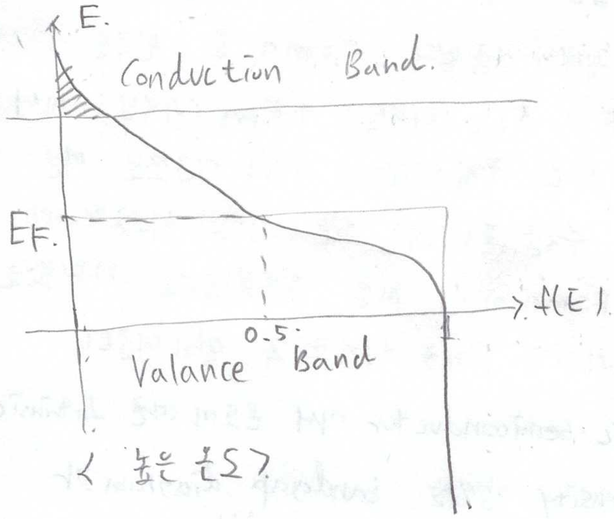
에서도 $n=p=n_i$ 가 온도의 영향을 받는을 알 수 있다



Bandgap으로 나타내면



< 절대온도 0K > <절대온도 300K>



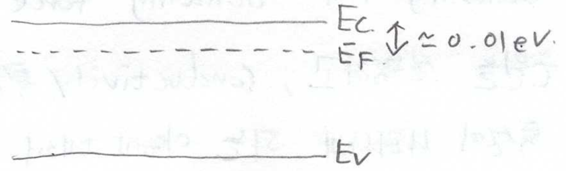
< 높은 온도 >

절대온도 0K 에서는 열에 의한 전자의 운동이 없어 모두 valance Band에 존재한다. 물론 전자가 존재할 확률이 Conduction Band 에선 0이고 Fermi level 에선 0.5 이다.

여기서 온도가 상승하게 되면 전자가 열에 의한 운동 에너지를 갖기 시작하면서 이 에너지의 크기가 밴드갭 크기에는 미치지 않아도 상대적인 확률로 밴드갭을 뛰어 넘어 Conduction Band 이상의 에너지를 가질 확률이 존재하게 된다. 따라서 온도가 높아질수록 n_i가 커지게 된다.

6. Doping Type에 따른 majority Carrier, minority Carrier 양상을 bandgap diagram을 이용하여 설명해보시오.

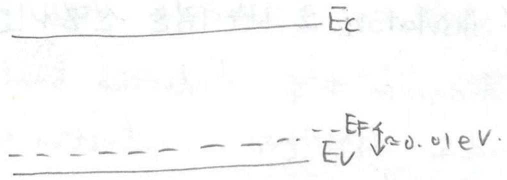
① n-type 에는 donor가 도핑되어 있고, donor는 자유전자를 만들어 낸다



위와 같은 band gap diagram는 만들어 내며 실리콘 격자구조기 donor가 도핑되면서 Bandgap 내에 donor 준위가 발생해 특성상 Conduction Band와 에너지 차이가 매우 작다. donor 원자로 부터 최외각 전자가 이탈하는데 필요한 에너지가 적기 때문이다. 필요한 에너지가 작다는 것은, Conduction Band 내 전자가 존재할 확률이 높아지는 것이므로 Fermi level 이 intrinsic 보다 높아진다.

donor의 doping 농도가 높아질수록 conduction Band 가까이 fermi level 이 형성된다.

② p-type 에는 acceptor가 도핑되어 있고, acceptor는 hole 을 발생시킨다.



실리콘 격자구조 내에. acceptor가 도핑되면서 Band gap 내에 acceptor 준위가 발생해 특성상 Valance band 와 에너지 차이가 매우 작다. 작은 에너지 만으로 Valance band 내 존재하는 전자가 acceptor 원자와 결합을 하고 Valance band 에는 전자가 빠져나가 빈 자리 hole이 생기게 된다 acceptor 준위로 전자가 이동하는데 필요한 에너지가 적다는것은, valance Band를 벗어난 전자가 acceptor 준위에 머물 확률이 높아지는것이고 Conduction Band 까지 전자가 이동할 확률이 더 낮아진다는 것을 의미한다.

7. N-Type doping 된 반도체에서 온도 조건에 따라 Carrier density 변화 양상을 energy bandgap diagram과 Fermi-Dirac distribution 함수로 설명해 보시오.

n-Type 반도체에선 $n = N_d - N_a$ 이며

$p = \frac{n_i^2}{n}$ 이 된다.

이는 charge neutrality $n + N_a = p + N_d$ 와 $np = n_i^2$ 에 의한 결과이다.

$n = N_c e^{-\frac{(E_c - E_f)}{kT}}$ 이므로 n이 T의 영향을 받고 있다. 마찬가지로 $n = \int_{E_c}^{\infty} f(E) D_c(E) dE$ 에서 나왔고, $n \propto f(E) = \frac{1}{1+e^{\frac{(E_c - E_f)}{kT}}}$ 에서도 T가 증가할수록 n이 증가함을 알 수 있다.

Bandgap으로 나타내면

<절대온도 0k>　　<300k>

온도가 높아질수록 열에 의한 운동에너지로 Conduction Band 이상의 에너지를 가질 확률이 높아진다. 심지어 n type doping이 되어 그만큼 Fermi level 이 높아 확률이 높은 구간이 늘어난다.

8. Mobility 에 대해 설명해 보시오.

전자는 열에너지를 받아서 이동하는 열속도가 존재한다. 이때 electric Field 가 존재하지 않으면 열 속도는 있어도 제자리로 다시 돌아가 이동하지 않는것처럼 보인다. 여기서 E Field 가 걸리면 마치 전자가 이동한것처럼 보이는데 이를 보고 drift라고 한다. 전자가 한번 부딪히고 다음에 부딪힐때 까지 거리의 평균을 mean free path라 하며 이때 걸리는 평균시간을 mean free time 이라 한다. 이 시간을 정공 기준으로 τ_{mp} 라 할때 운동량 기준으로 $m_p v = qE\tau_{mp}$ 이야하므로 $v = \frac{q\tau_{mp}}{m_p}E = \mu_p E$ 로 나타내고 이때 μ_p를 hole의 mobility 라고 한다.

전자의 경우 $v = -\mu_n E$ 이되고 $\mu_n = \frac{q\tau_{mn}}{m_n}$ 인데 이때 부호가 − 인건 전자의 이동 방향과 E Field의 방향이 달라서이다.

Mobility는 전자나 정공이 전기장내에서 얼마나 빨리 움직이는지를 나타내는 정도라할 수 있다.

9. Drift current 와 Diffusion current에 대해 수식적으로 / 개념적으로 설명해 보시오.

전류밀도 J는 단위면적당 흐르는 전류량이다. 이때 전류량은 단위시간당 지나가는 전하량이므로

전류밀도(drift) = 전하량 · 드리프트속도 · 전자개수로 나타낼 수 있고, hole의 경우 $Q = q$, electron의 경우 $Q = -q$ 이므로

$J_{p,drift} = qpv$ 이며 $v = \mu_p E$ 적용시

$J_{p,drift} = qp\mu_p E$

$J_{n,drift} = -qnv$ 이며 $v = -\mu_n E$ 적용시

$J_{n,drift} = qn\mu_n E$

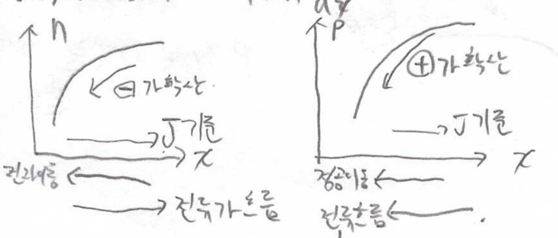
$J_{drift} = J_{p,drift} + J_{n,drift} = qp\mu_p E + qn\mu_n E$
$= (qp\mu_p + qp\mu_n)E$

여기서 $qp\mu_p + qn\mu_n$ 은 σ로 conductivity로 나타낼 수 있다.

이 drift current는 drift 속도로 인해 전류가 흐르게 되는것이다.

Diffusion current는 많은데서 적은데로 이동하려는 특성때문에 생기며, 전자농도가 불균일하면 이를 균일화하는 과정중 흐르는 전류이다. 농도와 관련되어 있으므로 농도의 기울기와 비례하고, 전자확산상수 D_n, 전하량 q 에도 비례해

$J_{n,diffusion} = qD_n \frac{dn}{dx}$ 이 된다.



$J_{p,diffusion}$ 는 전류흐름이 반대라 부호도 반대가 된다.

$J_{p,diffusion} = -qD_p \frac{dp}{dx}$

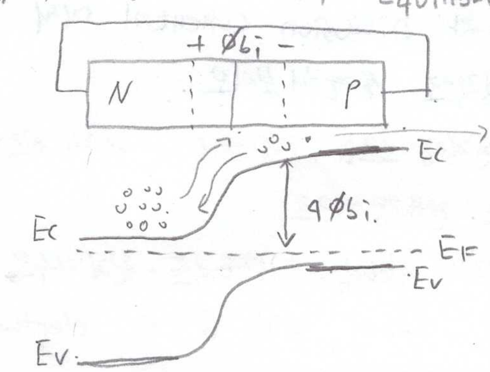
$J_n = J_{n,drift} + J_{n,diffusion} = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx}$

$J_p = J_{p,drift} + J_{p,diffusion} = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$ 이며

$J = J_n + J_p$ 로 전류밀도를 나타낼수 있다.

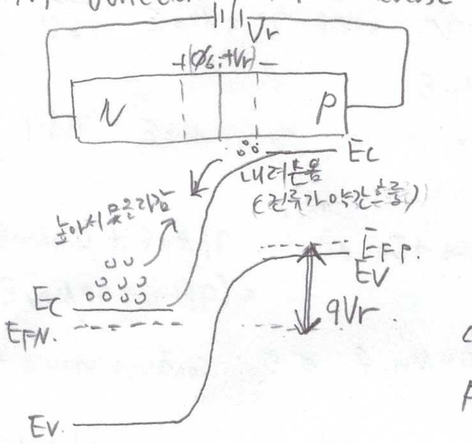
10. PN접합 diode 에서 bias 조건에 따른 carrier의 flux 양상과 current 양상을 drift 성분과 diffusion 성분, 그리고 net 성분으로 설명해보시오. (bandgap diagram의 변화와 함께 quasi-fermi level 변화를 같이 그려가면서 정성적으로 설명하라)

① NP junction 에서 Equilibrium 일때.



올라오고 내려오는게 확률적으로 같아서 전류는 흐르지 않음.

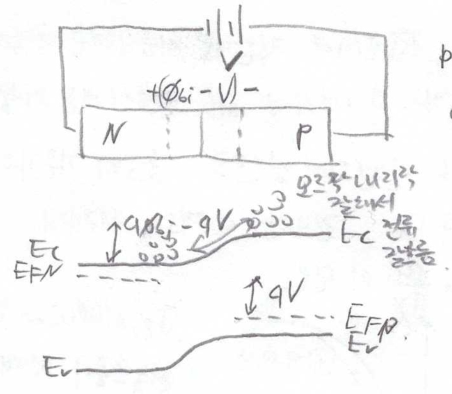
② NP junction 에서 Reverse bias 일때



N Type에 Vr 이 P Type 보다 높게 걸리므로 그만큼 에너지 감소.

qVr 만큼 Fermi - Energy 차이발생.

③ NP junction 에서 forward bias 일때



P Type 에 V 이 걸리고 depletion layer는 ϕbi−V 의 전압이 걸림.

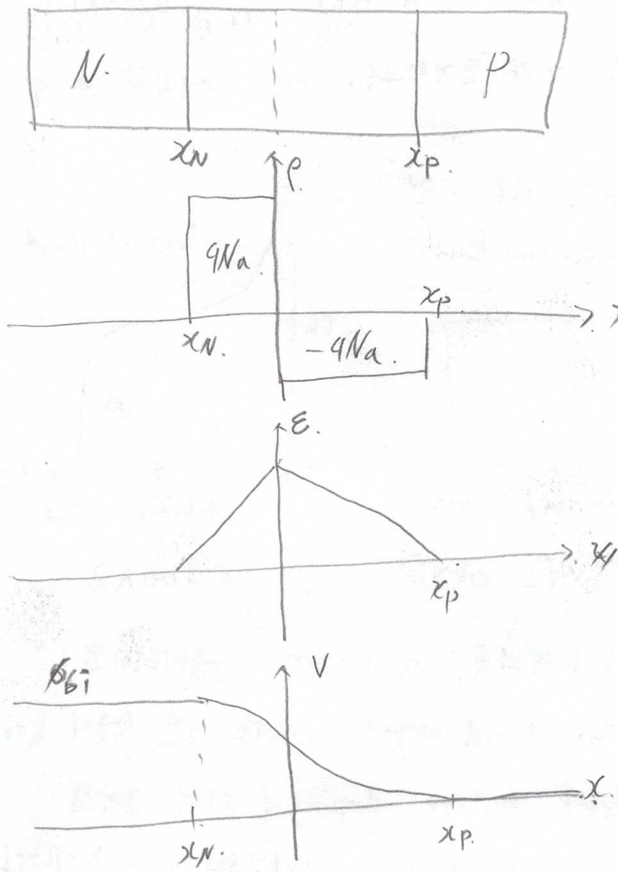
P Type 과 N Type 간 qV 만큼 에너지 차이 발생.

P Type 그만큼 에너지 감소.

11. PN접합 diode 에서 built-in potential이 존재함을 설명하시오. Doping density에 따른 Depletion width에 대해 구해보시오.

band diagram 에서 N Type과 P Type을 붙이면 서로의 Region 에서 Ec와 Ev가 다르다. 이는 flat 하지 않으므로 전압차가 있음을 나타내고 이 차이를 Built-in potential 이라 한다. 이 전압을 측정하려고 멀티미터로 찍으면 0이 나오는데 그 이유는 멀티미터 구리선과 N Type, 구리선과 P Type 간의 Built-in potential도 있고 이 연결이 폐회로를 이뤄 상쇄되기 때문이다.

포아송 방정식에 의해 $\frac{d}{dx}\mathcal{E}(x) = \frac{\rho}{\varepsilon_s}$ 이며



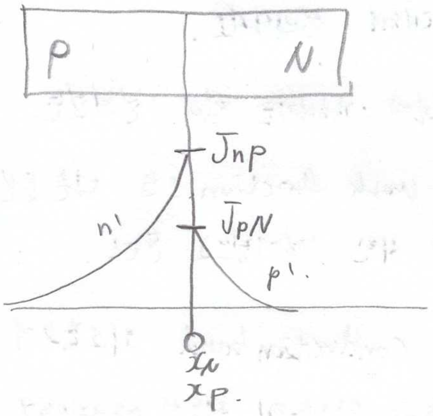
$V(x) = \frac{qN_a}{2\varepsilon_s}(x_p - x)^2$ 이 $x=0$ 에서

$V(x) = \phi_{bi} - \frac{qN_d}{2\varepsilon_s}(x - x_N)^2$ 연속이므로

$x_p - x_N = W_{dep} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \phi_{bi}}{q}\left(\frac{1}{N_a}+\frac{1}{N_d}\right)}$ 이된다.

즉 많이 도핑된 것은 Wdep에 영향을 거의 안주고 적게 도핑된게 Wdep에 큰 영향을 준다.

12. Ideal diode equation을 유도하시오.



$J_{pN} = -qD_p \frac{dp'(x)}{dx}$

여기서 과잉전공 개수와 수명 $-\frac{dJ_p}{dx} = q\frac{p'}{\tau}$ 에서

J_p 는 $J_{p(diffusion)}$ 이므로, $J_p = -qD_p\frac{dp}{dx}$ 를 대입시.

$qD_p \frac{d^2p}{dx^2} = q\frac{p'}{\tau_p}$ 이며 $p' = p - p_0$ 이므로.

$\frac{d^2p'}{dx^2} = \frac{p'}{D_p\tau_p} = \frac{p'}{L_p^2}$ 이 된다.

Boundary condition 이 되게. $p'(\infty) = 0$ 이고 $p'(x_N) = p(x_N) - p_{no}$

$$p(x_N) = N_V e^{-\frac{(E_{Fp}-E_v)}{kT}} = N_V e^{-\frac{E_{FN}-E_V}{kT}} e^{\frac{E_{FN}-E_{Fp}}{kT}} = p_{no} e^{\frac{qV}{kT}}$$

즉 $p'(x_N) = p_{no}(1 - e^{\frac{qV}{kT}})$

$p'(x) = Ae^{\frac{x}{L_p}} + Be^{-\frac{x}{L_p}}$ 일때. $A = 0$ 가 되므로

$$p'(x) = p_{No}(e^{\frac{qV}{kT}} - 1)e^{-\frac{(x-x_N)}{L_p}}$$

단 $(x > x_N)$

그러므로 $J_{pN} = q\frac{D_p}{L_p}p_{No}(e^{\frac{qV}{kT}} - 1)e^{-\frac{(x-x_N)}{L_p}}$ 이 되며

유사하게 $J_{nP} = q\frac{D_n}{L_n}n_{po}(e^{\frac{qV}{kT}} - 1)e^{-\frac{x-x_p}{L_n}}$

total current density $J = J_{pN}(x_n) + J_{nP}(x_p)$

$$= \left(q\frac{D_p}{L_p}p_{No} + q\frac{D_n}{L_n}n_{po}\right) \cdot (e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$$

total current $I = J \cdot A$

즉 여기서 p_{No} A $= \frac{n_i^2}{N_d}$, $n_{po} = \frac{n_i^2}{N_a}$ 이므로

$$I = Aqn_i^2\left(\frac{D_p}{L_pN_d} + \frac{D_n}{L_nN_a}\right)(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) = I_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$$

13. Quasi-Fermi level 에 대해 설명해보시오.

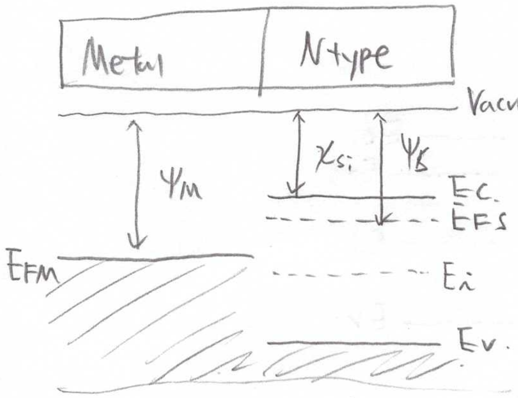
equilibrium 일때는 E_F가 항상 일정하고 $np = n_i^2$ 이므로 쉽게 계산이 가능하다

하지만 non-equilibrium 일때는 E_{Fn}, E_{Fp}가 발생하게 되는데. 이때 $E_{Fn} \neq E_{Fp}$ 이며. loose 한 결합과 생성 매커니즘에 의해 fermi-level 이 나뉘진것이다. 이 계산을 편히 하기 위해 quasi-equilibrium 컨셉을 사용하고 $n = N_c e^{-\frac{(E_c-E_{Fn})}{kT}}$, $p = N_v e^{-\frac{(E_{Fp}-E_v)}{kT}}$ 로 계산된다.

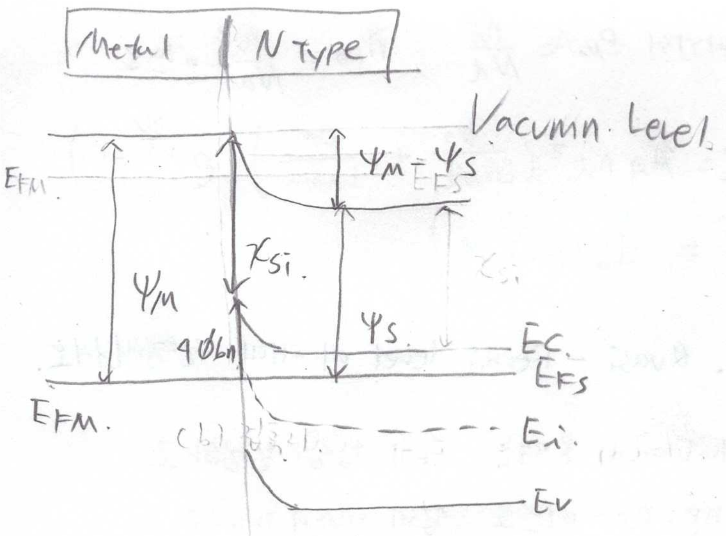
Quasi-Fermi level을 사용함으로써 non-equilibri 상태에서 과잉 캐리어의 존재를 설명할 수 있게된다.

14. MS Contact 에서 work function관계에 따라 ~~sho~~ schottky contact과 ohmic contact이 나타남을 bandgap diagram을 통해 설명하시오.

schottky contact 에선 work function 관계가 $\psi_M > \psi_S$ 이며



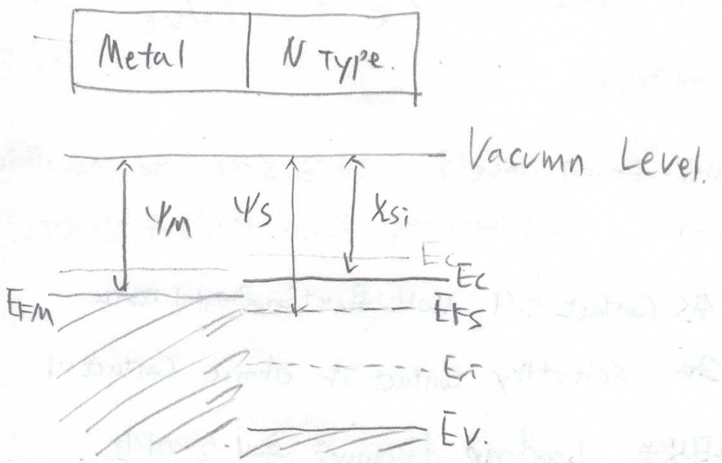
(a) 비접촉시.



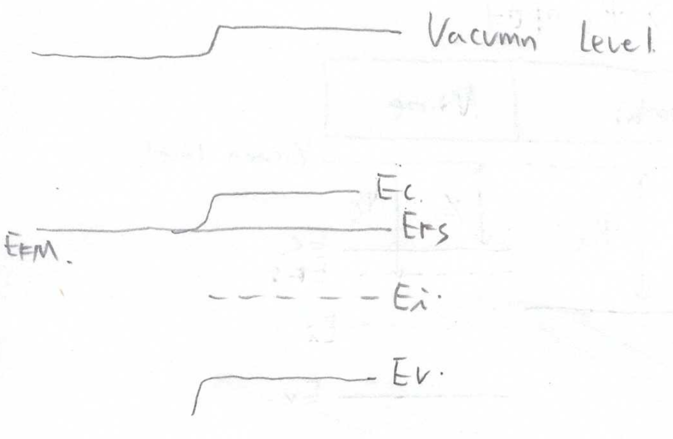
(b) 접촉시.

쇼트키장벽으로 인해: 반도체에서 금속으로는 전자가 이동해도 금속에서 반도체로는 전자가 이동 못해 Pn접합 같은 다이오드 역할을 한다.

Ohmic Contact 에선 work function 관계가 $\psi_S > \psi_M$ 이다.



(a) 비 접촉시.



(b) 접촉시

금속에서 반도체쪽, 반도체에서 금속쪽으로 전자의 이동이 원활히 일어날 수 있어 전류가 선형적으로 변한다

15. Vacumn level, electron affinity, work function 개념에 대해 정의하시오.

Vaccumn level는 전자에 가해지는 힘이 전혀없는 자유로운 상태이며 work function 으로 다른 물질 간의 에너지를 비교하기 위한 절대점으로 둔다.

electron affinity는 conduction band 최소값부터 전자를 떼어내어 자유롭게 만드는데 필요한 에너지이며 전자 친화력이다.

Work function은 전자를 Fermi level 에서부터 떼어내어 자유롭게 만드는데 필요한 최소한의 에너지이다