

Chapter 19.

Surface and interface physics

Reconstruction and Relaxation

$\overline{\text{Vacuum}}$: clean 한 경우
 $\overline{\text{Substrate}}$ 대개 3층 정도가 surface Selvage reconstructed or unreconstructed
 atomic arrangement 가 같다.
 단지, interlayer spacing change
 interlayer distance가 보통은 준다.
 Diatomic과 bulk의 중간상태이다.

가끔 어떤 metal에서 surface layer는 superstructure를 forming 한다.
 broken covalent or ionic bond 때문이다.
 Bond가 깨져 dangling이 일어나고 서로 옆의 것이 bond를 이루어주면 에너지가 낮아진다.

Reconstruction은 superstructure를 forming하는 것은 아니다.

예) GaAs (110)는 Ga-As에서

Ga의 전자 하나가 As로 가서 As의 dangling을 없애주고
 Ga는 전자의 depletion을 이루게 한다.
 step에서나 kink에 evaporation 된 원자가 잘 붙는다.
 periodic array가 detection될 수도 있다.
 -LEED Low energy electron diffraction

Surface Crystallograph

2차원 : diperiodic or triperiodic structure를 갖는다.
 물리학에서 surface는 2-D net이라 부른다.
 area unit cell은 mesh라 부른다.

2차원에서 mesh를 기술하는 vector

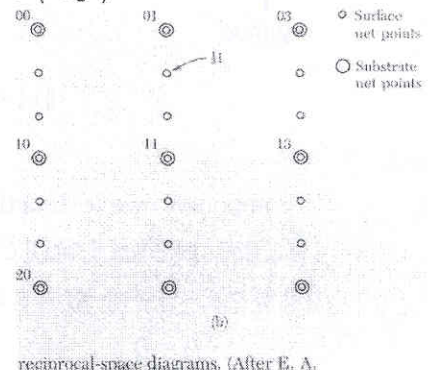
$$\begin{pmatrix} \vec{C}_1 \\ \vec{C}_2 \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} \vec{a}_1 \\ \vec{a}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{a}_1 \\ \vec{a}_2 \end{pmatrix}$$

Reciprocal lattics vector

$$\begin{aligned} \vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2^* &= \vec{C}_2 \cdot \vec{C}_1^* = 0 ; \\ \vec{C}_1 \cdot \vec{C}_1^* &= \vec{C}_2 \cdot \vec{C}_2^* = 2\pi \end{aligned}$$

each diffracted beam 은 h, k 로 labeled 된다.

$$\vec{g} = h \vec{C}_1^* + k \vec{C}_2^*$$



Reflection High energy electron diffraction RHEED

crystal surface 에 높은 에너지 전자를 때린다.
 옆에서 때린다. incident wavevector의 normal component로 변화를 줄인다.

Surface electronic structure

work function : vacuum level 과 Fermi level 사이의 potential 에너지의 차이
 photoelectric emission의 threshold

$$\hbar \omega = W + T \quad [T: E_K \text{ of the emitted electron} \\ W: \text{work function}]$$

Thermionic equation

electron

electron
 ...
 ideal gas로
 볼 수 있다.

$$\mu = \mu_{ext} + \tau \ln \left(\frac{n}{n_Q} \right) \\ n_Q = 2 \left(\frac{m\tau}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}$$

$$\mu_{ext} - \mu = \omega$$

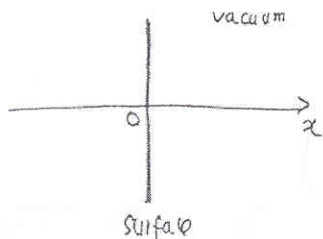
$$\therefore n = n_Q \exp \left(-\frac{\omega}{\tau} \right)$$

$$J_n = \frac{1}{4} n \bar{c} = \left(\frac{\tau}{2\pi m} \right)^{1/2} \cdot n$$

electric charge flux is $e J_n$

$$J_e = \left(\frac{\tau^2 m e}{2\pi^2 \hbar^3} \right) \exp \left(-\frac{\omega}{\tau} \right)$$

Surface state



u : potential energy

$$U(x) = 0, \quad x > 0$$

$$U(x) = \sum_G U_G \cdot \exp(iGx) \quad x > 0$$

vacuum 에서의 wave function 은

$$\Psi_{out} = \exp(-sx) \quad x > 0$$

$$\text{에너지의 wave equation } \epsilon = -\frac{\hbar^2}{2m} S^2$$

$x < 0$ 인 경우

2-component wave function of a bound surface state

$$\Psi_{in} = \exp(qx + ikx) [C(k) + C(k-G) \exp(-iGx)]$$

x 방향으로 전류가 안흐른다.

$$J_x = 0 \quad \Rightarrow \quad \Psi \text{가 real 이면}$$

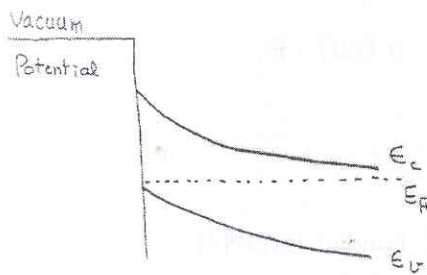
Ψ 가 real이 되는 순간은 $k = \frac{1}{2} G$ 인 경우만임

$$\Psi_{in} = \exp(qx) \cdot [C(\frac{1}{2} G) \exp(\frac{iGx}{2}) + C(-\frac{1}{2} G) \exp(-\frac{iGx}{2})]$$

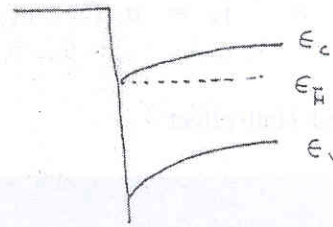
만약 $C^*(\frac{1}{2} G) = C(-\frac{1}{2} G)$ 이면 Ψ 가 real func

Ψ , $\frac{d\Psi}{dx}$ 의 continuum을 생각하자.

Secular equation 푼다.



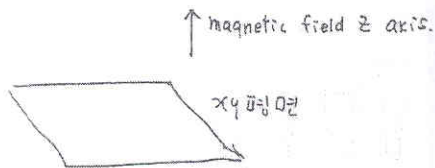
Surface에서 electron concentration이 높다.



Surface에서 electron concentration이 낮다.

Surface에서는 gap사이에 state가 있을 수 있나?

Magnetoresistance in a two dimensional channel



초전도연구단 단장 이 성 익

Surface tensor conductance components

$$\therefore \sigma_{xx} = \frac{\sigma_0}{1 + (\omega_c \tau)^2} \quad ; \quad \sigma_{xy} = \frac{\sigma_0 \omega_c \tau}{1 + (\omega_c \tau)^2}$$

$$\text{where } \sigma_0 = \frac{ve^2 \tau}{m}, \quad \omega_c = \frac{eB}{mc}$$

매우 긴 relaxation time or B가 크면 $\omega_c \tau \gg 1$

$$\therefore \sigma_{xx} = 0, \quad \sigma_{xy} = \frac{\sigma_0}{\omega_c \tau} = \frac{\sigma_0 mc}{eB \tau} = \frac{ve^2 \tau}{m} \cdot \frac{mc}{eB \tau} = \frac{vec}{B}$$

Hall effect를 생각하자.

x방향으로 전자가 움직인다. (정확히 $j_x = \sigma_{xy} E_x + \sigma_{xx} E_y$ 를 써야 한다.)

$$j_x = \sigma_{xy} E_y = vec \cdot \frac{E_y}{B} \quad ; \quad I_x = j_x L_y = \frac{vec}{B} E_y L_y$$

$$\text{hall resistance } \rho_H = \frac{V_y}{I_x} = \frac{E_y L_y}{\frac{\nu e c}{B} E_y L_y} = \frac{B}{\nu e c}$$

정확하게 이 문제를 풀자

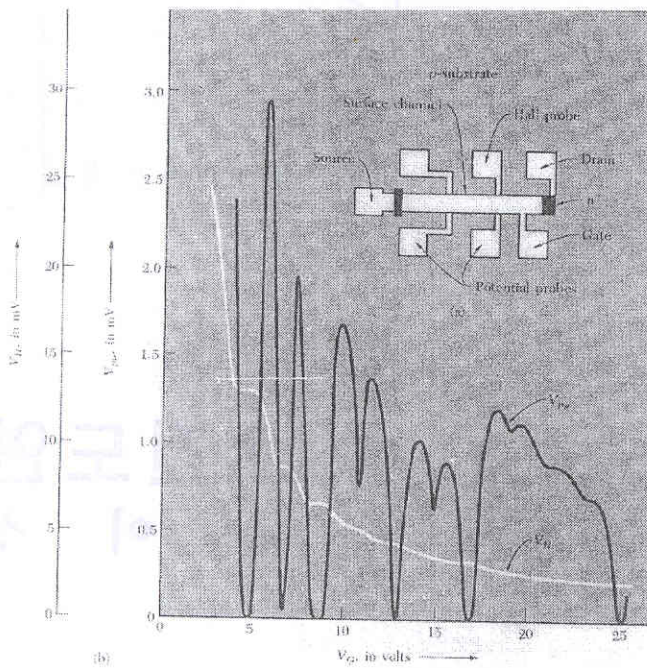
$$j_x = \sigma_{xx} E_x + \sigma_{xy} E_y ; j_y = \sigma_{yx} E_x + \sigma_{yy} E_y$$

$$\text{hall effect geometry } j_y = 0$$

$$\therefore E_y = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{yy}} E_x \text{ with } \sigma_{xy} = -\sigma_{yx}$$

$$\therefore j_x = \sigma_{xx} E_x + \sigma_{xy} \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{yy}} E_x = \sigma(\text{eff}) \cdot E_x$$

Integral Quantized Hall effect



Landau level에서

$$\frac{SeB_x}{he} = \nu$$

S : integer

ν : electron surface concentration

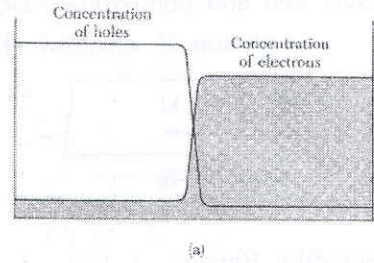
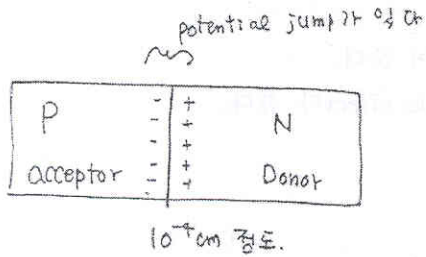
Hall resistance의 quantization

$$\rho_H = \frac{B}{\nu e c} = \frac{B}{ec} \cdot \frac{hc}{SeB} = \frac{h}{Se^2}$$

Fractional Quantum Hall effect

$$\frac{3h}{e^2}, \quad \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{2}{5}, \frac{3}{5}, \frac{4}{5}, \frac{2}{7} \text{ 등 여러 가지가 보고 된다.}$$

p-n junction

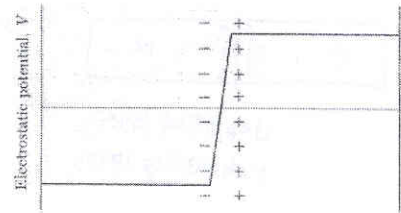


P ->

<- electron

:서로 diffusion 한다.

diffusion을 하기에 local electrical neutrality가 깨진다.



equilibrium에서 chemical potential is constant

$$k_B T \ln p + e\phi = \text{constant}$$

p region ϕ 가 크면 p가 작고

$$k_B T \ln n - e\phi = \text{constant}$$

n region ϕ 가 크면 n이 크고

equilibrium 상태에서

전자는 n에서 p로 움직인다. \therefore recombine 한다.

thermally P에서 전자가 생겨나 N으로 간다.

$$J_{nr}(0) + J_{ng}(0) = 0$$

otherwise electron will accumulate

Rectification

p-n junction은 정류기 :

backward Recombination current는 Boltzman factor 만큼 reduce 된다.

$$J_{nr}(V_{back}) = J_{nr}(0) \exp\left(-\frac{e|V|}{k_B T}\right)$$

thermal generation은 back voltage의 영향을 받지 않는다.

$$J_{ng}(V_{back}) = J_{ng}(0)$$

$$\text{Forward } J_{nr}(V_{forward}) = j_{nr}(0) \exp\left(\frac{e|V|}{k_B T}\right)$$

$$J_{ng}(V_{forward}) = J_{ng}(0)$$

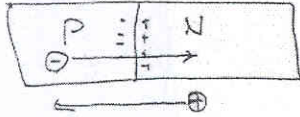
전자와 hole이 합쳐진다.

total forward electric current

$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right)$$

Solar cell and photovoltaic Detector

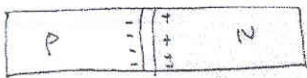
photon 은 electron 과 hole을 만들어 낸다.



∴ forward voltage 만들어 준다.

이 voltage를 photovoltaic effect라 한다.

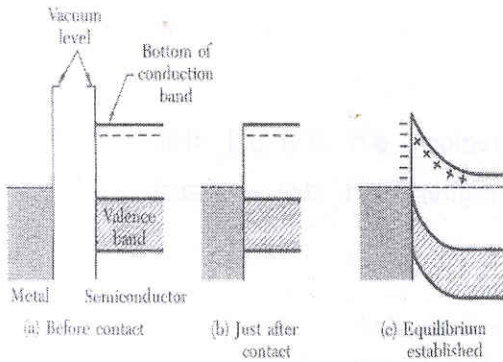
Schottky Barrier



depletion layer
exhausting layer

n-type semiconductor는

metal 과 contact를 이룬다. => Schottky Barrier



depletion region 에서의 potential

$$\nabla \cdot \vec{D} = 4\pi ne \quad n : \text{donor concentration}$$

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{4\pi ne}{\epsilon}$$

$$\therefore \phi = -\frac{2\pi ne}{\epsilon} x^2 \quad \text{Metal insulator 의 간단한 view}$$

Hetero structures

Semiconductor 의 hetero structure : 2개 또는 more differential semiconductor를 한 개 crystal structure 위에 세운다.

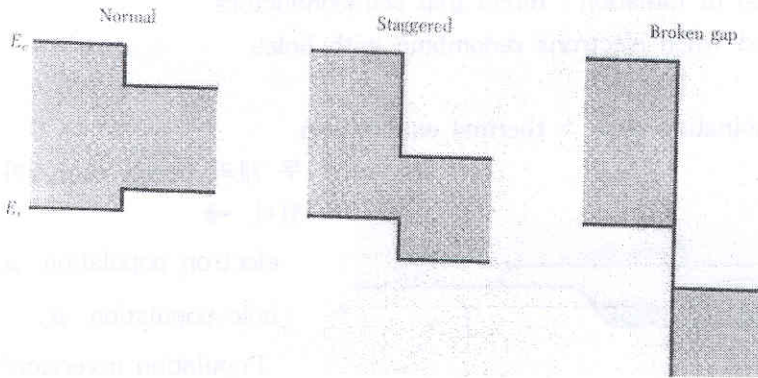
예 : Ge (diamond) GaAs (Zinc Sulfide) both lattice 5.65 Å

band gap :

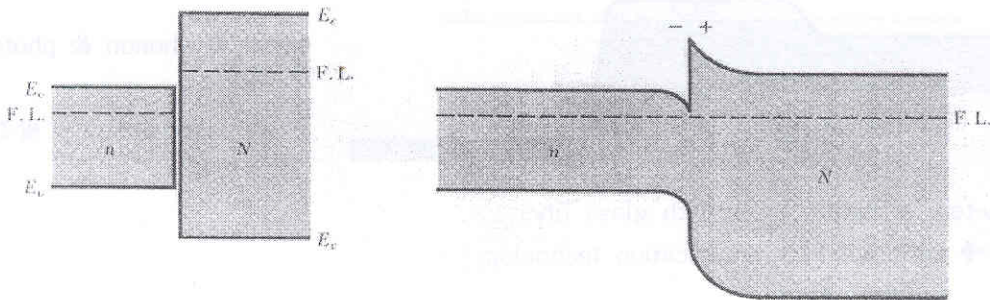
source of the real interest in the hetero structure

Ge ~ 0.67eV , GaAs ~ 1.43eV

calculation



n-N hetero junction



n,N : type E_L 가 높은 곳을 대문자로 쓴다. n-N junction 이다.

F,L : fermi level

이것은 Schottky barrier 와 비슷하다. 전자 이동 했다.

Fermi energy는 같아야 한다.

negative space charge : negative 2nd derivatives

n : dipping 하자

doner를 넣으면 전자가 튀어나온다.

lattice scattering에 의해 전자 mobility 가 작아진다.

low temp mobilities : $2 \times 10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$



이 thickness를 depletion layer보다 짧게 하면,

N material 은 low mobility electron 이 다 없어지고,

n material 은 high mobility electron 이 평면위에 있다.

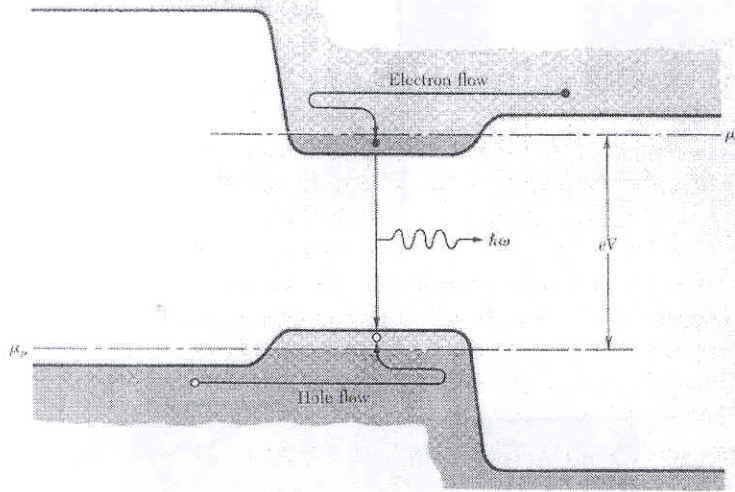
2D-electron gas 로 생각

초전도연구단
단장 이성익

Semiconductor laser

stimulated emission of radiation : direct gap semiconductors
 : radiation emitted when electrons recombine with holes

[Electron-Hole] e-h recombination time > thermal equilibrium



두 개의 Fermi energy가 있다. →

electron population μ_c

hole population μ_v

Population inversion이 일어나려면

$\mu_c > \mu_v + \epsilon_g$

indirect: phonon & photon이 관여

(아직 laser action이 발견되지 않았다.)

double hetero structure laser with glass fiber

→ light wave communication technology

GaAs : 1.48 eV

IR laser

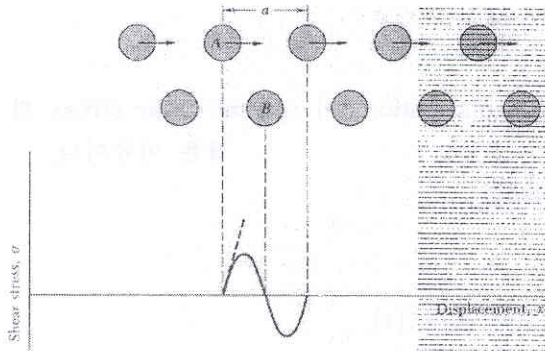
정확한 것은 온도의 함수

Chapter 20.

Dislocation

Shear strength of single x-ral

예 :



plastic properties : irreversible deformation

elastic properties : reversible

단결정 : plastic deform이 쉽다.

Pure aluminum crystals are elastic

이론 elastic limit = $(10^2 - 10^4)$ 실험 elastic limit

예외 : Si, Ge : 단결정이지만 plastic 이 아니다. fracture 로 깨진다.

Glass : crystal 은 아니지만 fracture

Shear strength of single crystals

small elastic strains

$$\sigma = \frac{Gx}{d}$$

d : interplanar spacing G : appropriate shear modulus

stress - displacement relation

$$\sigma = \left(\frac{Ga}{2\pi a} \right) \sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right) = \sigma_c \sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \quad \text{when } \sigma_c = \frac{Ga}{2\pi d}$$

$$a \approx d, \text{ then } \sigma_c \approx \frac{G}{2\pi} \quad \text{Ideal critical shear stress}$$

$$S_n : \quad G \rightarrow 10^{11} \quad \sigma_c \rightarrow 10^7$$

왜 이렇게 차이가 나나?

imperfection (source of mechanical weakness)

dislocation의 움직임이 이유가 된다.

초전도연구단
단장 이성익

Slip : plastic deformation은 slip 때문이다.

운동 방향은 slip direction이라 한다.

운동을 보면 slip의 highly anisotropic nature를 볼 수 있다.

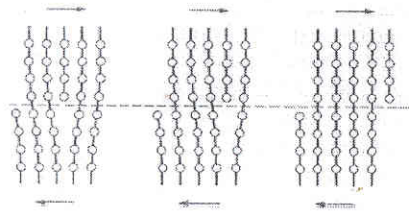
displacement || 방향

FCC에서 ABCABABC 등을 볼 수 있다.
 slip plane 때문이며, FCC, HCP
 Slip : plastic deformation의 예이다.
 twining : hcp, bcc structure

Dislocations :

조금전의 lattice 의 line imperfection (dislocation)이 critical shear stress 의 작은 이유이다.

이 생각 : 1934 Taylor, Orowan, Polanyi
 여러 type : edge dislocation



dislocation이 움직인다.

이렇게 움직이기 위해 stress를 가해야 하는데, 매우 적어도 된다.

『anisotropic 하지 않아야 한다.』

dislocation은 plastic의 원인이다.

2nd type of dislocation.

screw dislocation.