5 장 Carrier 전송[轉送] 현상

❖ 반도체 내에서 전기 傳導에 참여하는 carrier 들의 종류

종류	전하량	위치	유효질량	비고
電子 (electron)	−e	傳導帶 (conduction band)	m_n^*	실존 입자
正空 (hole)	+e	價電子帶 (valence band)	m_p^*	가상 입자

* $e\ (=q) = 1.6 \times 10^{-19}$ C

❖ 반도체 내에서 carrier의 움직임과 전류의 종류

움직임	내 용	전 류
drift(漂動)	電界 혹은 磁界에 의한 움직임	drift current (J_{drf})
diffusion(擴散)	carrier들의 공간적인 분포(농도) 차이에 의한 움직임	diffusion current (J_{dif})

5.1 캐리어 드리프트

❖ carrier drift에 관한 예비 검토

✓ 반도체의 결정격자가 완전히 규칙적이면(perfect crystal), 전자는 반도체 내에서 아무런 저항을 받지 않고 이동 가능

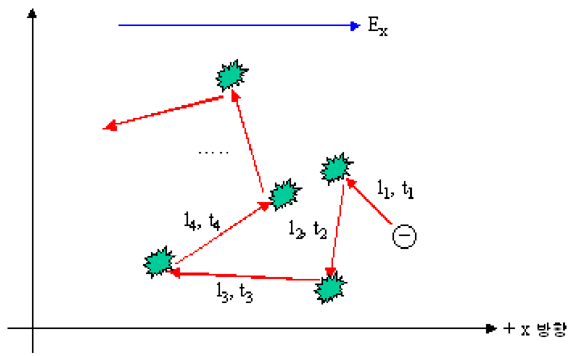
✓ 원자핵의 열적 진동, impurity 등에 의해서 perfect crystal은 실제로 존재할 수 없음

✓ 따라서 전자는 움직임, 충돌, 움직임, 충돌, ... 을 반복하면서 이동

5.1.1 drift 전류 밀도

(1) drift velocity (표동 속도) : electron 경우

① drift : electric field가 인가된 반도체 속에서 전자의 이동



+x 방향으로 electric field가 작용하면 전자는 원자핵, 불순물 등과 충돌하여 이동 방향이 변하면서 전체적으로 -x 방향으로 움직이게 된다.

② drift velocity의 계산

$$v_{dn} = -\frac{1}{2}\left(\frac{e\tau_{cn}}{m_n^*}\right)E_x$$

(2) drift current density, J_{nx}, 의 계산

$$J_{nx} = (\text{단위시간당 단위면적당 지나는 전자의 개수}) \times (\text{전자의 전하})$$
$$= (n\,v_{dn}) \times (-e)$$
$$= -e\,n\,v_{dn}$$
$$= \frac{e^2 n\,\tau_{cn}}{m_n^*} E_x$$

(3) mobility(移動度)의 정의

$$\boxed{\mu_n = \frac{e\tau_{cn}}{m_n^*}} \quad [cm^2 / V\,\mathrm{sec}]$$

* 이동도를 사용하여 drift current density를 다시 정리하면,

$$J_{nx} = e\mu_n n\,E_x$$

(4) 3차원으로 확장

$$\boxed{\vec{J}_{n|drf} = e\mu_n n\,\vec{E}} \quad [A / cm^2]$$

(5) hole의 경우

같은 방법으로, hole mobility는

$$\boxed{\mu_p = \frac{e\tau_{cp}}{m_p^*}} \quad [cm^2 / V\sec]$$

hole current density는

$$\boxed{\vec{J}_{p|drf} = e\mu_p p\vec{E}} \quad [A / cm^2]$$

(5) Total drift current density

$$\vec{J}_{drf} = \vec{J}_{n|drf} + \vec{J}_{p|drf} = e\mu_n n\vec{E} + e\mu_p p\vec{E}$$

$$\boxed{\therefore \quad \vec{J}_{drf} = e(\mu_n n + \mu_p p)\vec{E}} \quad [A / cm^2]$$

5.1.2 이동도 효과

(1) scattering(산란, 散亂)

electron 혹은 hole이 이동 중에 결정격자, 이온화 불순물, 또는 다른 electron이나 hole과 충돌하여 이동 방향과 속도가 변하는 현상

(2) scattering의 종류

① lattice scattering(격자 산란) 또는 phonon scattering(포논 산란)

-. 결정 격자와의 충돌에 의한 산란

-. 온도가 높아질수록 lattice vibration이 커지므로 산란의 영향이 커짐

-. 따라서 **온도가 높아질수록 mobility가 감소**

$$\mu_L \propto T^{-3/2}$$

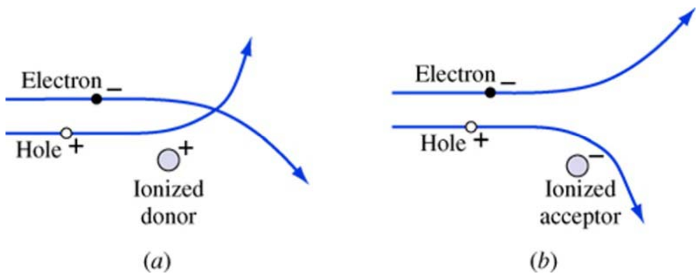
② ionized impurity scattering (이온화 불순물 산란)

-. Coulomb의 힘이 이온화된 불순물에 접근하는 전자 혹은 정공을 편향시킴

-. 온도가 높아질수록 carrier의 이동 속도가 커지므로 산란의 영향이 작아짐

-. 따라서 **온도가 높아질수록 mobility가 증가**

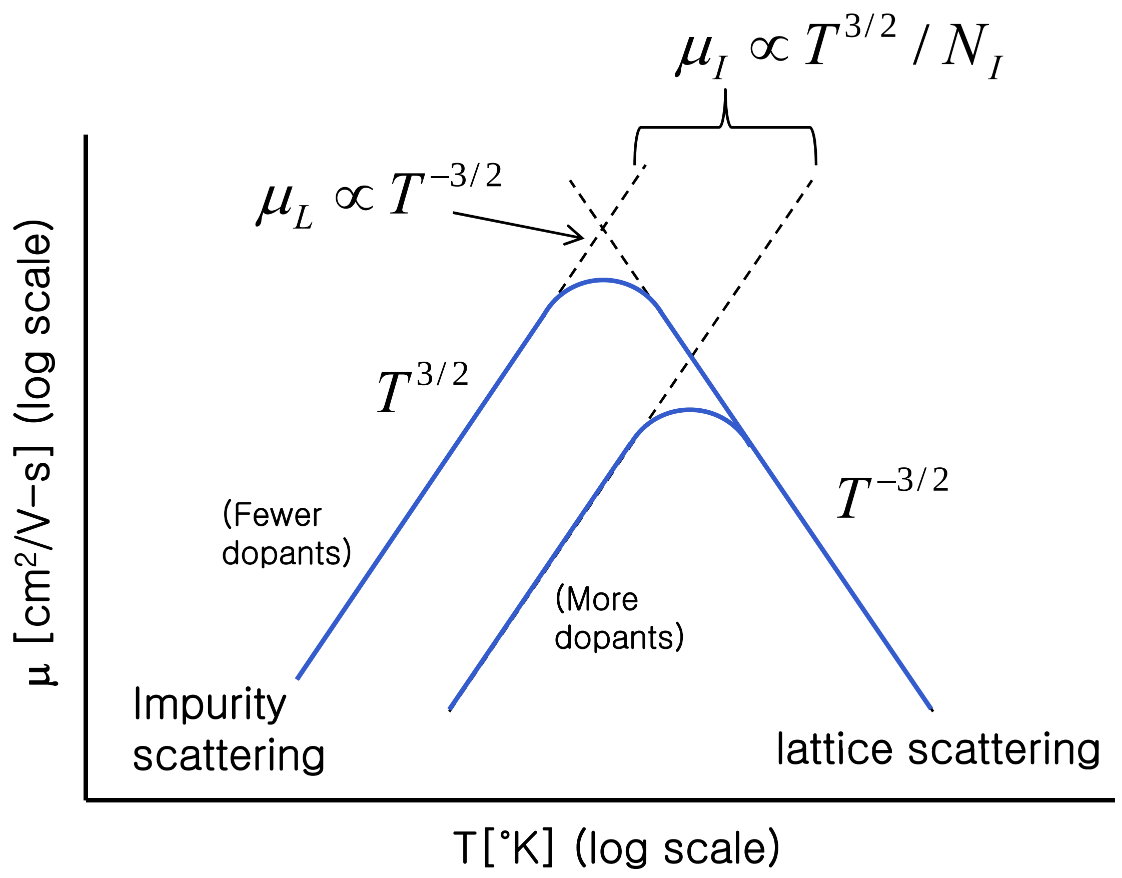
$$\mu_I \propto \frac{T^{3/2}}{N_I} \qquad \text{단, } N_I = N_d^+ + N_a^-$$



(3) mobility(μ) 와 온도(T)와의 관계

-. total mobility $$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I}$$

-. 온도 변화가 두 가지 scattering 현상에 미치는 영향이 반대



5.1.3 전도도(傳導度, conductivity)

- electron drift current density : $J_{n|drt} = e\mu_n nE = \sigma_n E$
  - ✓ electron conductivity(σ_n) : $\boxed{\sigma_n = e\mu_n n}$
- hole drift current density : $J_{p|drt} = e\mu_p pE = \sigma_p E$
  - ✓ hole conductivity(σ_p) : $\boxed{\sigma_p = e\mu_p p}$
- Total drift current density :

$$J_{drt} = J_{n|drt} + J_{p|drt} = e(\mu_n n + \mu_p p)E = (\sigma_n + \sigma_p)E$$

$$\boxed{\therefore J_{drf} = \sigma E} \qquad [A/cm^2](=[(\Omega\ cm)^{-1}][V/cm])$$

✓ total conductivity(σ) : $\boxed{\sigma = \sigma_n + \sigma_p = e(\mu_n n + \mu_p p)}$ $[(\Omega\ cm)^{-1}]$

✓ resistivity : $\boxed{\rho = \dfrac{1}{\sigma}}$ $[\Omega\ cm]$

5.1.4 속도 포화(速度 飽和, velocity saturation)

➢ drift velocity (v_d) saturation 현상

① electric field의 크기가 작을 때

-. drift velocity는 electric filed에 비례

$$v_{dn} = \mu_n E$$

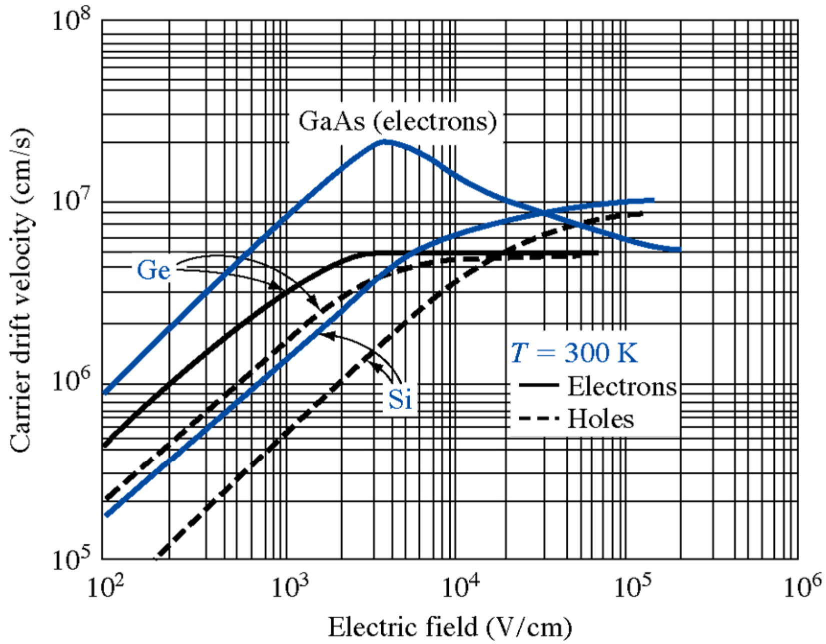
$$v_{dp} = \mu_p E$$

② electric field의 크기가 충분히 클 때

-. drift velocity는 saturation되어 더 이상 증가하지 않음.
따라서 v_d 는 일정한 값을 가짐

$$v_{dn} = v_{dn,sat}$$

$$v_{dp} = v_{dp,sat}$$



5.2 캐리어 확산(擴散, diffusion)

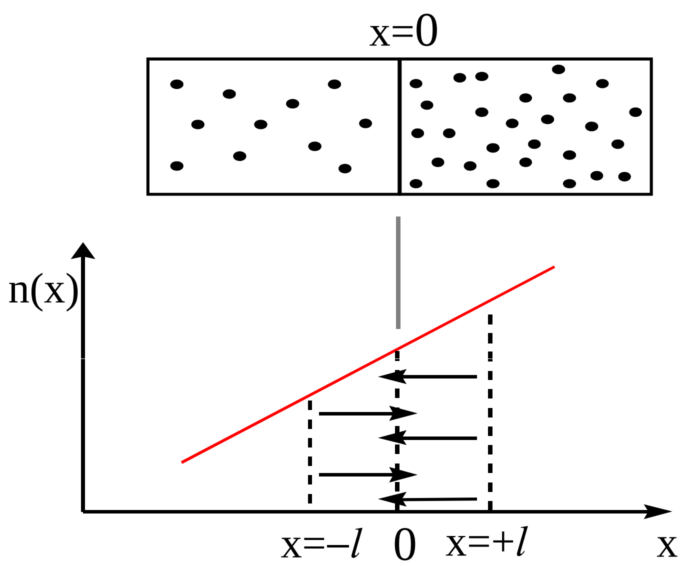
❖ diffusion이란?

-. carrier들의 공간적인 분포가 불균일하기 때문에 발생되는 carrier들의 움직임

-. carrier의 density가 큰 곳에서 낮은 곳으로 이동

5.2.1 확산전류밀도(diffusion current density)

(1) electron 경우



✓ x=0 면을 통과하여 +x 방향으로 이동하는 순 전자 흐름율(F_n)은

$$F_n = \frac{1}{2} n(-l)\cdot v_{th} - \frac{1}{2} n(+l)\cdot v_{th} = \frac{1}{2} v_{th}\left[n(-l) - n(+l)\right]$$

$$\cong \frac{1}{2} v_{th}\left\{\left[n(0) - l\cdot\frac{dn}{dx}\right] - \left[n(0) + l\cdot\frac{dn}{dx}\right]\right\}$$

$$= -v_{th}\cdot l\cdot\frac{dn}{dx}$$

✓ 따라서 x 방향으로 전자의 확산전류밀도는

$$J_{nx|dif} = -eF_n = e \cdot v_{th} \cdot l \cdot \frac{dn}{dx}$$

$$\boxed{J_{nx|dif} = eD_n \frac{dn}{dx}}$$

단, D_n : electron diffusion coefficient [cm^2/sec]

(2) hole의 경우

같은 방법으로, x 방향으로 hole의 확산전류밀도는

$$\boxed{J_{px|dif} = -eD_p \frac{dp}{dx}}$$

단, D_p : hole diffusion coefficient [cm^2/sec]

< 교재, 168쪽, 그림 5.11 참조 >

5.2.2 총 전류밀도

- total current density

$$J_n(x) = J_{n|drt}(x) + J_{n|dif}(x) = en\mu_n E_x + eD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

$$J_p(x) = J_{p|drt}(x) + J_{p|dif}(x) = ep\mu_p E_x - eD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

$$\therefore J(x) = J_n(x) + J_p(x) = en\mu_n E_x + ep\mu_p E_x + eD_n \frac{dn(x)}{dx} - eD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

✓ 3차원 확장

$$\therefore \vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p = en\mu_n \vec{E} + ep\mu_p \vec{E} + eD_n \vec{\nabla} n - eD_p \vec{\nabla} p$$

✓ 대표적인 반도체 재료에 대한 data

	D_n [cm^2/s]	D_p [cm^2/s]	μ_n [cm^2/Vs]	μ_p [cm^2/Vs]
Ge	100	50	3900	1900
Si	35	12.5	1350	480
GaAs	220	10	8500	400

5.3 경사 불순물 분포

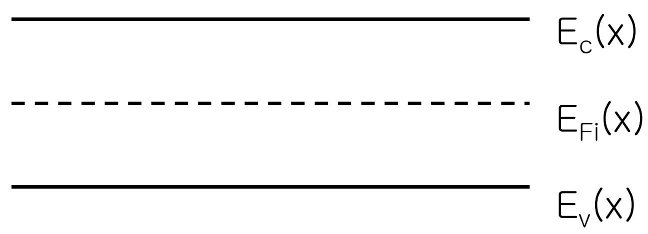
5.3.1 유도 전계(Induced electric field)

(1) 평형상태에서 Fermi level의 일정성(一定性)

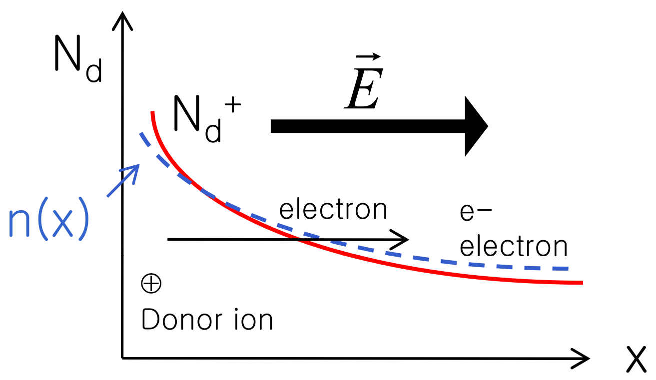
평형상태에 있는 어떤 물리적 system 내에서는 어느 곳이든지 Fermi level이 항상 일정하게 같다.

(2) 균일 도핑된 반도체의 energy band diagram

⇒ 모든 x에 대해서 E_{Fi} , E_V , E_C는 수평



(3) 불균일 도핑된 반도체



-. +x 방향으로 diffusion of majority carrier(electron)

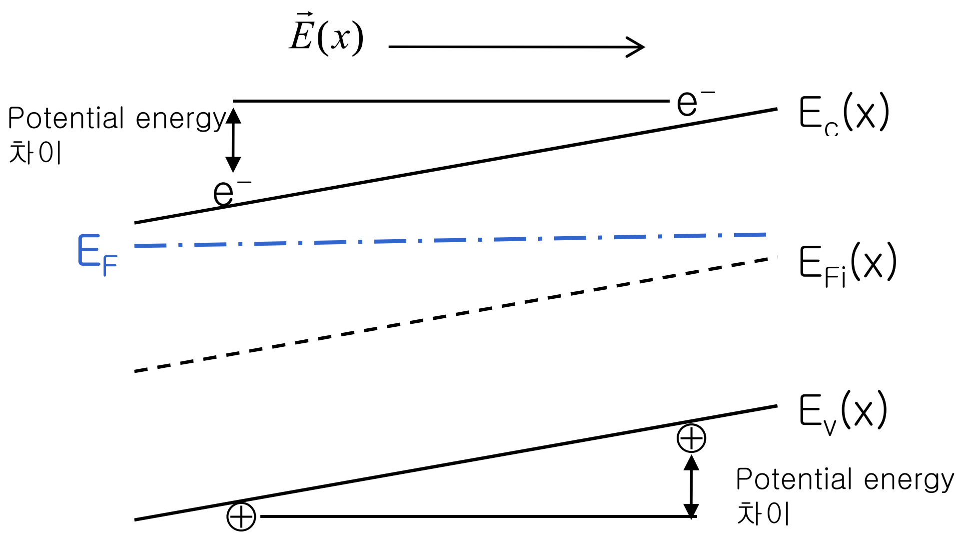
-. 평형상태에서 $n(x) \neq N_d(x)$ ⇒ net charge

-. +x 방향 electric field(built-in electric field)

-. diffusion과 반대 방향의 drift 전류가 생김

-. 평형상태에서 total electron current = 0

- 불균일 도핑된 반도체에서의 energy band diagram



- electrostatic potential : $\phi(x)$

$$\phi(x) = -\frac{E(x)}{e} \quad \text{(E(x): 에너지)}$$

- electrostatic potential와 전장의 관계

$$\vec{E}(x) = -\frac{d\phi(x)}{dx}$$

$$\vec{E}(x) = \frac{1}{e}\frac{dE(x)}{dx} = \frac{1}{e}\frac{dE_{Fi}(x)}{dx}$$

단, E_{Fi}, E_V, E_C는 평행

- equilibrium 상태에서 불균일 도핑된 반도체에서의 electric field는

$$J_n = e\mu_n n\vec{E} + eD_n \frac{dn}{dx} = 0$$

$$\therefore \vec{E}(x) = -\frac{D_n}{\mu_n}\frac{1}{n}\frac{dn}{dx}$$

  - ✓ quasi-neutral 조건이면, $\left|\frac{n(x) - N_d^{+}(x)}{N_d^{+}(x)}\right| << 1$

$$n(x) \approx N_d^{+}(x) = N_d(x)$$

$$\vec{\mathrm{E}}(x) \approx -\frac{kT}{e} \cdot \frac{1}{N_d(x)} \frac{dN_d(x)}{dx}$$

5.3.2 Einstein relation (아인슈타인 관계식)

-. equilibrium 상태의 반도체 시료에서 carrier density에 gradient가 있는 경우, carrier의 diffusion이 발생하는데 equilibrium 상태에서는 전류의 흐름이 없어야 하므로 이 diffusion을 억제하는 내부 전장이 유기된다.

$$J_n = 0 = J_{n|drt} + J_{n|dif} = en(x)\mu_n E_x + eD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

$$\therefore E(x) = -\frac{D_n}{\mu_n}\frac{1}{n(x)}\frac{dn(x)}{dx}$$

$$E(x) = -\frac{D_n}{\mu_n}\frac{1}{n(x)}[-\frac{1}{kT}\frac{dE_{Fi}(x)}{dx}n(x)] = \frac{D_n}{\mu_n}\frac{1}{kT}\frac{dE_{Fi}(x)}{dx}$$

$$E(x) = \frac{1}{e}\frac{dE_{Fi}(x)}{dx}$$

$$\therefore \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{e}$$

-. hole에 대해서 같은 방법으로

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{e}$$

-. Einstein relation

$$\boxed{\therefore \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{e}}$$

5.4 Hall effect (Hall 효과)

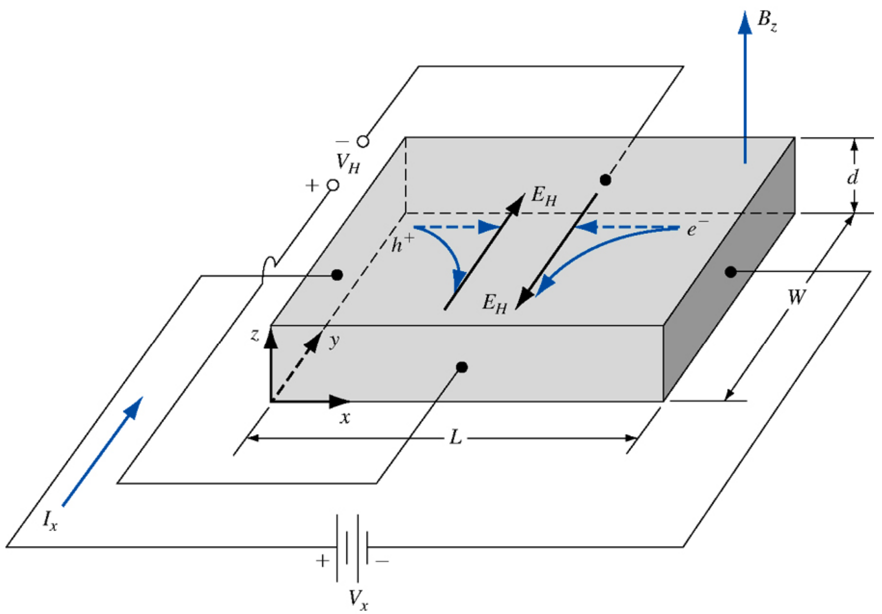
* Hall effect란?

전자기장 내에서 움직이는 charged particle에 발생하는 힘에 의해 나타나는 현상

➔ 반도체 시료의 다수 carrier 농도, resistivity, mobility 등의 실험적 측정

✓ 전하 q를 가지고 자기장에서 이동하는 입자에 작용하는 힘

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$



-. p-type의 경우, hole이 y=0에 쌓이고 n-type이면 electron이 y=0에 쌓인다.
이 charge에 의해 electric field가 생기고, 인가된 자기장에 의한 힘과 균형을 이룬다.

$$\vec{F} = q[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}]$$: Lorentz Force

$$F_y = q[E_y + v_x \times B_z] = 0$$: y 방향 성분

$$\therefore E_y = v_x B_z$$

➢ y 방향으로 유기된 전압은

$$V_H = E_y W = v_x B_z W$$: Hall voltage

$$J_x = epv_x \Rightarrow v_x = \frac{J_x}{ep}$$

$$\therefore \mathrm{E_y} = \frac{J_x}{ep} B_z = R_H J_x B_z$$

$$\boxed{R_H \equiv \frac{1}{ep}}$$: Hall coefficient

➢ Hall effect를 이용한 반도체 시료의 특성 측정(p-type)

① carrier concentration

$$V_H = E_y W = v_x B_z W = \frac{I_x B_z}{epd}$$

$$(\Leftarrow v_x = \frac{J_x}{ep} = \frac{I_x}{(Wd)(ep)})$$

$$\boxed{\therefore\ p = \frac{I_x B_z}{edV_H}}$$

: hole concentration 측정 가능

② resistivity

$$\boxed{\rho = R_s \frac{Wd}{L} = \frac{V_x}{I_x}\frac{Wd}{L}}$$

: resistivity 측정 가능

③ mobility

$$J_x = ep\mu_p E_x \Rightarrow \frac{I_x}{Wd} = ep\mu_p \frac{V_x}{L}$$

$$\boxed{\therefore \mu_p = \frac{I_x L}{epV_x Wd}}$$

: mobility 측정 가능

➢ n-type 반도체 경우

① carrier concentration

$$E_H = -v_x B_z$$

$$V_H = -\frac{I_x B_z}{end}$$

$$\boxed{\therefore n = -\frac{I_x B_z}{edV_H}}$$

② mobility

$$J_x = en\mu_n E_x \Rightarrow \frac{I_x}{Wd} = en\mu_n \frac{V_x}{L}$$

$$\boxed{\therefore \mu_n = \frac{I_x L}{enV_x Wd}}$$