6.1 캐리어 생성과 재결합

- 생성(generation) : 전자-정공 쌍을 형성하는 과정 또는 가전자대로부터 전도대로 전자가 勵起(excite)되는 과정
- 재결합(recombination) : 전자가 전도대로부터 가전자대로 이동함으로써 하나의 전자-정공 쌍(EHP)이 소멸되는 과정

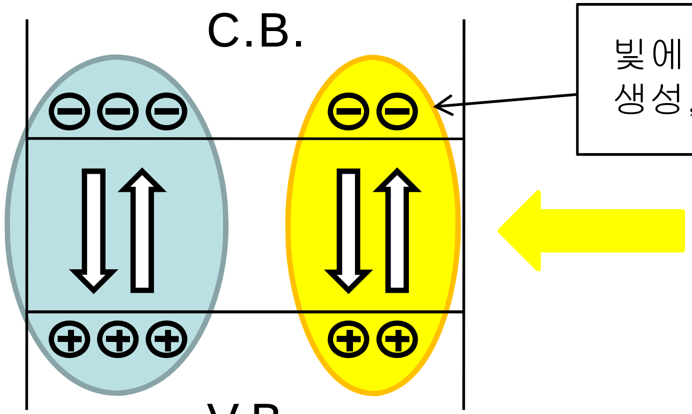
6.1.2 過剩(excess) 캐리어 생성과 재결합

(1) 빛에 의한 과잉 캐리어 생성

반도체 재료에 빛이 쪼여지면 빛으로부터 추가적인 energy를 받아 EHP가 증가

열에 의해 생성, 소멸되는 캐리어

n_0, p_0



빛에 의해 추가적으로 생성, 소멸되는 캐리어

$\delta n, \delta p$

$$E = h\nu$$

$$\therefore \; n = n_0 + \delta n\,, \quad p = p_0 + \delta p$$

(2) 과잉 캐리어의 직접 재결합에 의한 감소

- 비평형상태(non-equilibrium) : 과잉 캐리어가 존재할 때 반도체는 비평형상태가 됨
- 빛이 차단되면 과잉 캐리어는 재결합에 의해 소멸되고 다시 평형상태로 돌아감

(3) excess carrier의 시간에 따른 변화

(a) minority carrier의 경우

① p-type 내에서 electron

✓ 임의의 시각 t에서 excess carrier의 감소율은 그 시각에 존재하고 있는 electron과 hole의 양에 비례하므로

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\alpha_r [n(t)p(t) - n_i^2]$$

여기서

$$n(t) = n_0 + \delta n(t)$$
$$p(t) = p_0 + \delta p(t)$$

따라서

$$\frac{d(\delta n(t))}{dt} = -\alpha_r \delta n(t)\left[(n_0 + p_0) + \delta n(t)\right]$$

✓ low level injection 조건과 p-type을 고려하면,

$$\frac{d(\delta n(t))}{dt} = -\alpha_r p_0 \delta n(t)$$

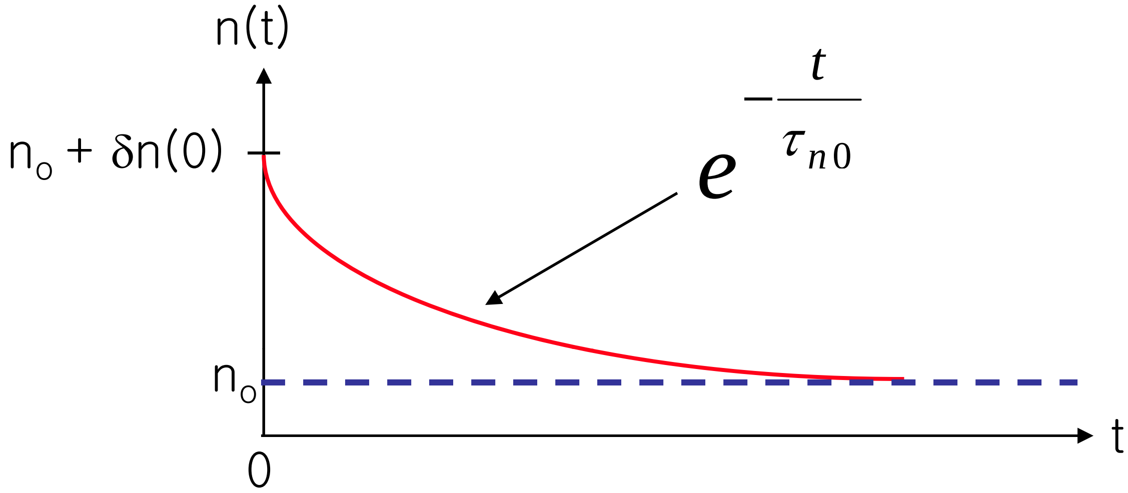
✓ 이 식의 해는,

$$\delta n(t) = \delta n(0) e^{-\frac{t}{\tau_{n0}}}$$

단, τ_{n0} : excess minority carrier(electron) lifetime

✓ 이제 total electron의 시간에 따른 변화는,

$$n(t) = n_0 + \delta n(t) = n_0 + \delta n(0) e^{-\frac{t}{\tau_{n0}}}$$



② n-type 내에서 hole

✓ 비슷한 방법으로

$$\delta p(t) = \delta p(0) e^{-\frac{t}{\tau_{p0}}}$$

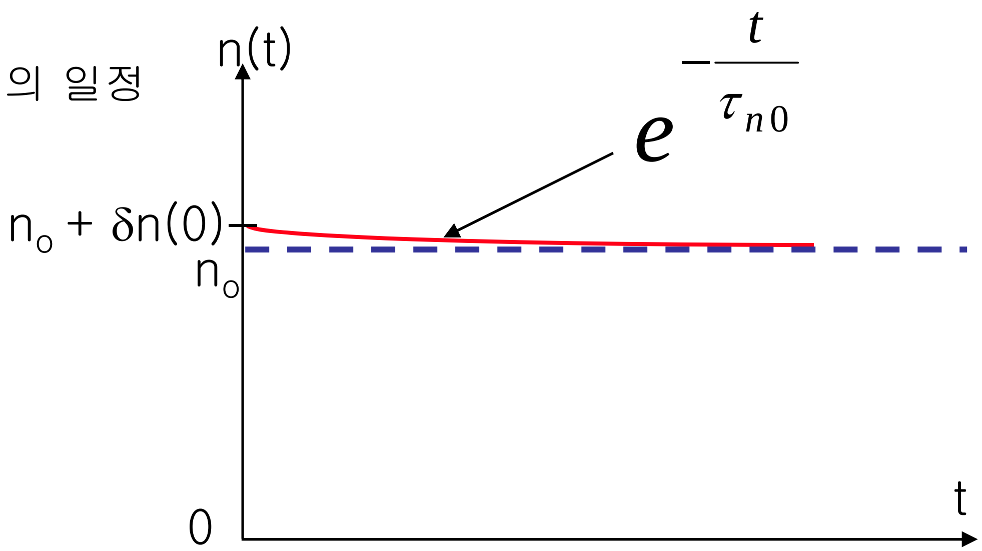
단, τ_{p0} : excess minority carrier(hole) lifetime

$$p(t) = p_0 + \delta p(t) = p_0 + \delta p(0) e^{-\frac{t}{\tau_{p0}}}$$

(b) majority carrier의 경우

① n-type에서, $n_0 >> p_0$, $n_0 >> \delta n(t)$ 이므로

$$n(t) = n_0 + \delta n(t) \cong n_0$$: 거의 일정



② p-type에서, $p_0 >> n_0$, $p_0 >> \delta p(t)$ 이므로

$$p(t) = p_0 + \delta p(t) \cong p_0$$: 거의 일정

- 즉, excess carrier가 지나치게 많이 주입되지 않는 한(⇒ 'low level injection') majority carrier의 양은 거의 변화가 없다고 볼 수 있다.

❖ low-level injection (저준위 주입) condition

주입되는 과잉 캐리어의 농도가 열평형상태의 다수 캐리어 농도보다는 작고 소수 캐리어 농도보다는 큰 조건

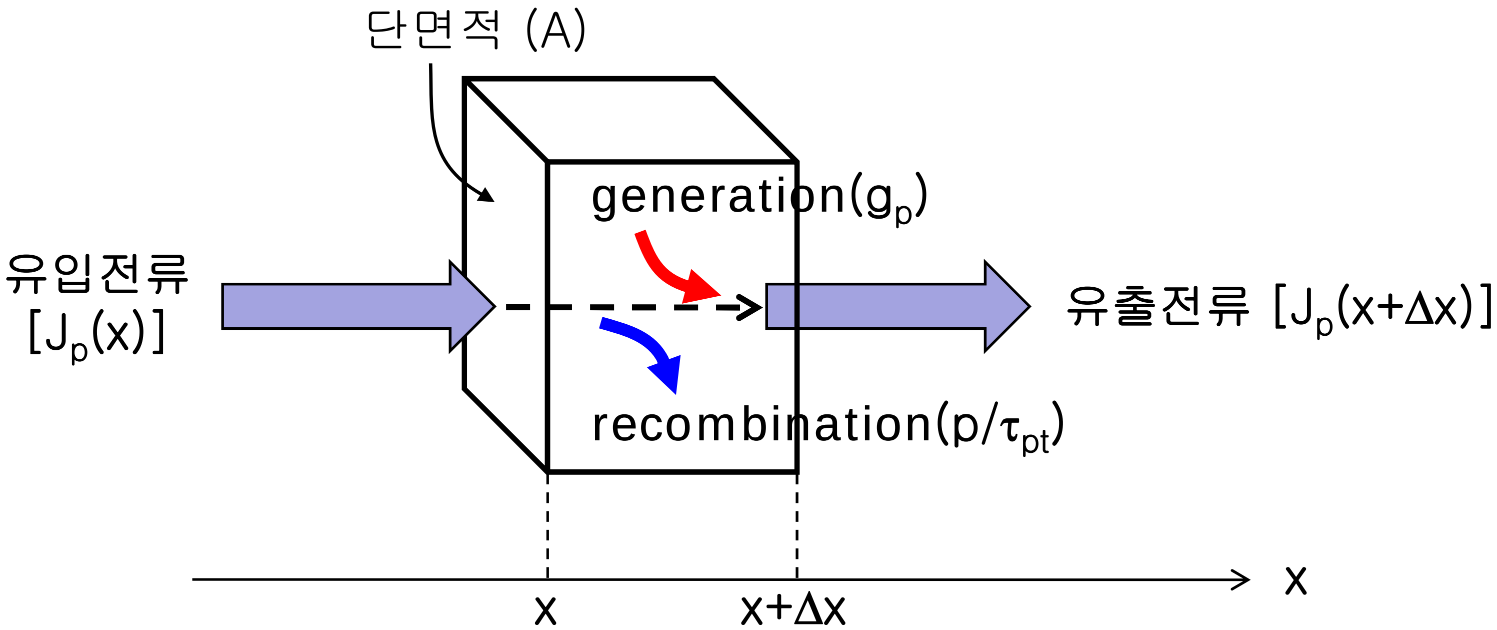
(예) n-type 반도체 시료의 경우

$$p_0 << \delta n(t) << n_0 \ , \quad p_0 << \delta p(t) << n_0$$

6.2 과잉 캐리어의 특성

6.2.1 연속 방정식(連續 방정식, continuity equation)

❖ hole에 대한 continuity equation 유도



-. x=x에서 유입되는 hole density : $\dfrac{J_p(x)}{e}\cdot A$

-. x=x+Δx 에서 유출되는 hole density : $\dfrac{J_p(x+\Delta x)}{e}\cdot A$

-. 단위 체적 당 유입, 유출되는 hole density의 차이 :

$$\frac{A}{e}\{J_p(x)-J_p(x+\Delta x)\}\div(A\cdot\Delta x)=\frac{1}{e}\frac{J_p(x)-J_p(x+\Delta x)}{\Delta x}$$

-. generation에 의해서 증가하는 hole density : g_p

-. recombination에 의해서 감소하는 hole density : $-\frac{p}{\tau_{pt}}$

-. 체적 A·Δx에서

$$\left.\frac{\partial p}{\partial t}\right|_{x\sim x+\Delta x}=\frac{1}{e}\frac{J_p(x)-J_p(x+\Delta x)}{\Delta x}+g_p-\frac{p}{\tau_{pt}}$$

-. Δx ➔ 0

$$\boxed{\frac{\partial p}{\partial t}=-\frac{1}{e}\frac{\partial J_p(x)}{\partial x}+g_p-\frac{p}{\tau_{pt}}}$$

❖ electron에 대한 continuity equation 유도

-. 같은 방법으로

$$\boxed{\frac{\partial n}{\partial t}=\frac{1}{e}\frac{\partial J_n(x)}{\partial x}+g_n-\frac{n}{\tau_{nt}}}$$

6.2.2 시간의존 확산 방정식(擴散 방정식, Diffusion Equation)

(1) continuity equation의 재정리

-. hole 전류밀도 : $J_p = J_{p|drt} + J_{p|drf} = e\mu_p pE - eD_p \dfrac{dp}{dx}$

$$\therefore \quad \frac{\partial p}{\partial t} = -\mu_p \left(\frac{\partial p}{\partial x} E + p \frac{\partial E}{\partial x} \right) + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + g_p - \frac{p}{\tau_{pt}}$$

또한, 총 hole 농도는 평형상태의 hole 농도(p_o)와 과잉 hole 농도(δp)의 합이고

p_o 는 시간, 공간의 함수가 아닌 일정한 값이므로

$$\boxed{D_p \frac{\partial^2 \delta p}{\partial x^2} - \mu_p \left(\frac{\partial \delta p}{\partial x} E + p \frac{\partial E}{\partial x} \right) + g_p - \frac{p}{\tau_{pt}} = \frac{\partial \delta p}{\partial t}}$$

-. electron에 대해서도 같은 방법으로

$$\boxed{D_n \frac{\partial^2 \delta n}{\partial x^2} + \mu_n \left(\frac{\partial \delta n}{\partial x} E + n \frac{\partial E}{\partial x} \right) + g_n - \frac{n}{\tau_{nt}} = \frac{\partial \delta n}{\partial t}}$$

(2) diffusion equation

대부분의 경우, 반도체 소자를 흐르는 전류는 drift current 성분보다 주로 diffusion current 성분이 dominant 하므로

$$J_p = J_{p|drt} + J_{p|dif} \cong J_{p|dif}$$

또한,

$$J_{p|dif} = -eD_p \frac{dp}{dx} = -eD_p \frac{d\delta p}{dx}$$

이므로 앞에서 구한 hole에 관한 continuity eq.은

$$\boxed{D_p \frac{\partial^2 \delta p}{\partial x^2} + g_p - \frac{\delta p}{\tau_{pt}} = \frac{\partial \delta p}{\partial t}}$$

: ‘(hole) diffusion eq.’

electron에 대해서도 같은 방법으로

$$\boxed{D_n \frac{\partial^2 \delta n}{\partial x^2} + g_n - \frac{\delta n}{\tau_{nt}} = \frac{\partial \delta n}{\partial t}}$$

: ‘(electron) diffusion eq.’

(3) diffusion length(확산거리)

정상상태(steady-state)의 경우,

$$g_p = 0, \quad \frac{\partial \delta p}{\partial t} = 0$$

이므로, hole에 관한 diffusion eq.은

$$D_p \frac{d^2 \delta p}{dx^2} = \frac{\delta p}{\tau_{pt}}$$

여기서

$$\boxed{L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_{pt}} \quad [cm]}$$

: '(hole) diffusion length'

로 놓으면

$$\frac{d^2 \delta p}{dx^2} = \frac{\delta p}{L_p^2}$$

electron에 대해서도 같은 방법으로

$$\boxed{L_n \equiv \sqrt{D_n \tau_{nt}} \quad [cm]}$$

: ' (electron) diffusion length'

6.4 유사-Fermi (Quasi-Fermi) 에너지 준위

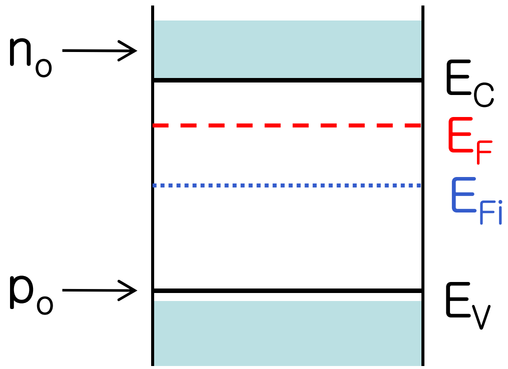
(1) 평형상태에서 불순물 농도, Fermi level, carrier 농도 간의 관계 ⇨ **Mass-Action Law**

가) n-type

$$\begin{cases} n_o = N_D & \cdots\cdots ① \\ p_o = \dfrac{n_i^2}{N_D} & \cdots\cdots ② \end{cases}$$

또는

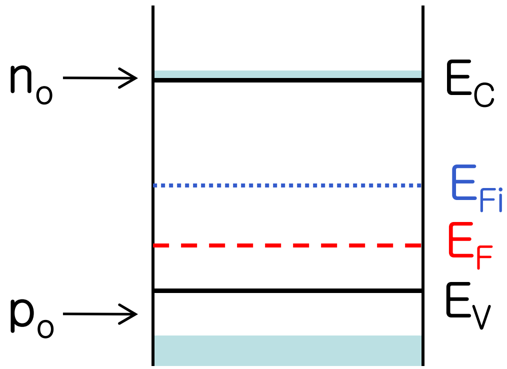
$$\begin{cases} n_o = n_i \exp\left(\dfrac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right) & \cdots\cdots\cdots ③ \\ p_o = n_i \exp\left(-\dfrac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right) & \cdots\cdots ④ \end{cases}$$



나) p-type

$$\begin{cases} p_o = N_A & \cdots\cdots ⑤ \\ n_o = \dfrac{n_i^2}{N_A} & \cdots\cdots ⑥ \end{cases}$$

$$\begin{cases} p_o = n_i \exp\left(\dfrac{E_{Fi} - E_F}{kT}\right) & \cdots\cdots\cdots ⑦ \\ n_o = n_i \exp\left(-\dfrac{E_{Fi} - E_F}{kT}\right) & \cdots\cdots ⑧ \end{cases}$$



(2) Steady-state carrier generation의 경우 : 비평형상태 ⇨ Mass-Action Law 불성립

✓ steady-state하게 excess carrier가 주입되는 경우에는

$n \neq n_o, \quad p \neq p_o$ 가 되어 비평형상태가 됨

$$\therefore \quad np \neq n_o p_o = n_i^2$$

즉, Mass-Action Law가 성립되지 않음

✓ quasi-Fermi level (또는 imref)의 개념

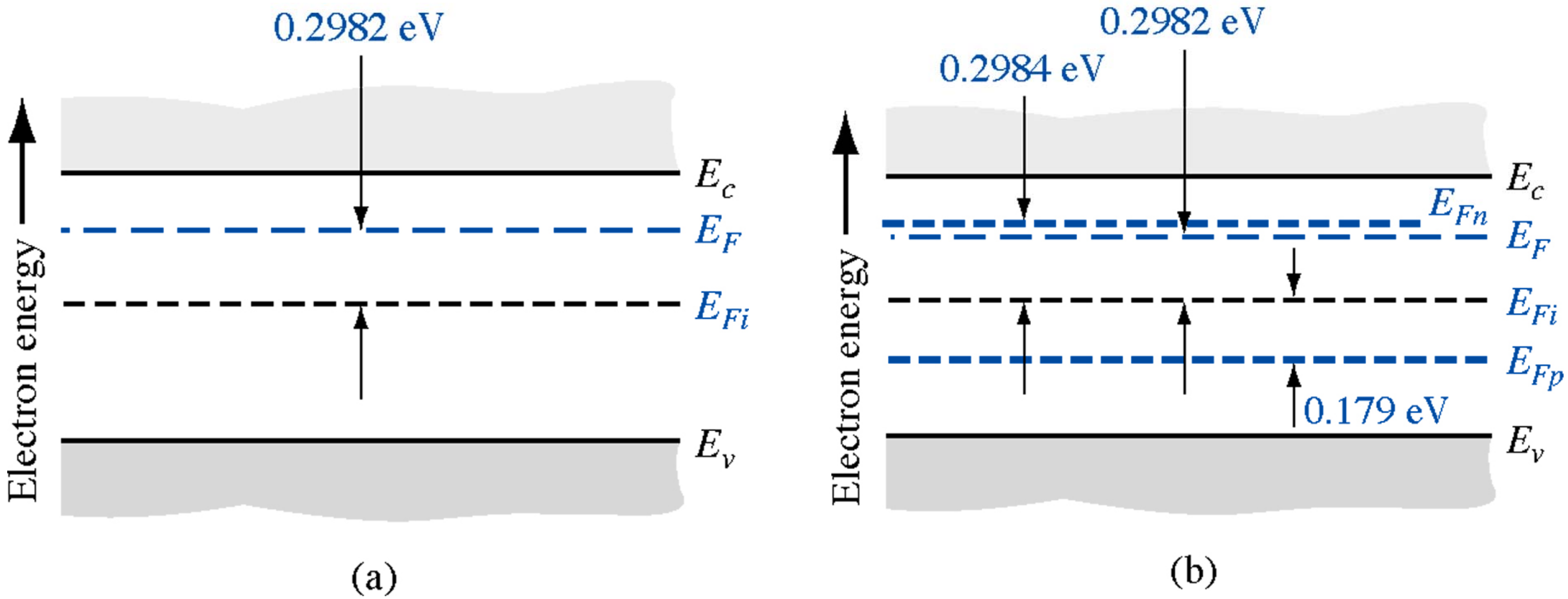
평형상태의 식 ③, ⑦에 비추어 볼 때, 비평형상태에서는

$$\begin{cases} n = n_i \exp\left(\dfrac{E_{Fn} - E_{Fi}}{kT}\right) \\ p = n_i \exp\left(\dfrac{E_{Fi} - E_{Fp}}{kT}\right) \end{cases}$$

로 놓을 수 있고,

이 때 E_{Fn}, E_{Fp}를 각각 electron과 hole의 '**quasi-Fermi level**', '**imref**'라고 함

* (예) $N_D=10^{15}\ cm^{-3}$ 도핑된 반도체의 에너지 밴드 다이어그램



(a) 열평형 상태 (b) $10^{13}\ cm^{-3}$ 의 과잉 캐리어들이 존재할 때