

비평형 과잉 캐리어의 농도 변화와 이동

4장에서는 반도체가 열평형상태에 있을 때의 물성을 살펴보았고, 5장에서는 평형상태를 심하게 벗어나지 않는 비평형상태에서 캐리어의 표동과 확산에 의한 전류 전송을 살펴보았다. 6장에서는 외부에서 전압을 가하거나, 전류를 흘려주거나, 빛을 쬐어주거나 혹은 온도를 부분적으로 올려주거나 하는 등의 비평형상태에서 과잉 전자 및 과잉 정공의 농도 변화와 이동을 살펴보기로 한다.

비평형상태에서의 과잉 캐리어에 대한 현상을 해석하기 위해서는 과잉 캐리어의 생성과 재결합, 표동과 확산을 함께 기술하는 방정식을 구해야 한다. 5장에서 학습한 캐리어의 표동과 확산을 바탕으로 먼저 캐리어의 생성과 재결합을 살펴본 후, 비평형 반도체의 캐리어 농도를 전자 및 정공의 의사-페르미 에너지를 사용하여 표현하는 것을 학습한다. 전류의 연속방정식과 암비폴러 전송방정식을 살펴본 후, 암비폴러 전송방정식을 이용하여 몇 가지 중요 현상들에 대한 해답을 구해볼 것이다. 그리고 헤인즈-쇼클리 실험으로 소수캐리어의 이동도 μ 와 확산계수 D , 그리고 수명 τ 를 동시에 측정하는 것을 살펴본다.

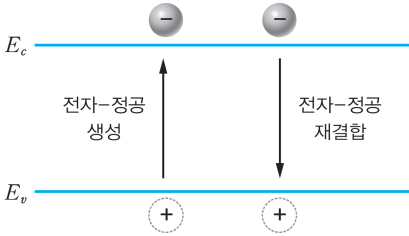
6.1 캐리어 생성과 재결합

열평형상태에서 전자와 정공의 생성과 재결합을 먼저 살펴본 후, 비평형상태에서 과잉 전자와 과잉 정공의 생성과 재결합, 그리고 과잉 소수캐리어의 수명을 살펴본다. 비평형상태에서 전자농도와 정공농도를 의사-페르미 에너지로 표현하는 방법을 다룬다.

6.1.1 열평형상태에서 캐리어의 생성과 재결합

열평형상태에서 전자와 정공의 생성률과 재결합률 간에는 어떤 관계가 있을까?

열평형상태에 있는 반도체에서 전도대역의 전자농도와 가전자대역의 정공농도는 시간에 의존하지 않고 일정하다. 그러나 전도대역에 생성된 전자와 가전자대역에 생성된 정공이 영원히 존재하는 것은 아니고, 재결합함으로써 소멸되기도 한다. 열에너지에 의한 전자와 정공의 생성 과정 및 재결합 과정을 [그림 6-1]에 나타내었다. 전자와 정공의 평균 생성률과 재결합률을 표현하는 기호와 정의는 [표 6-1]과 같이 표기하기로 한다.



[그림 6-1] 열평형상태에서 전자와 정공의 생성 및 재결합

[표 6-1] 열평형상태에서 생성률과 재결합률에 대한 기호와 정의

기호	정의
G_{n0}	열평형상태에서 전자 생성률
G_{p0}	열평형상태에서 정공 생성률
R_{n0}	열평형상태에서 전자 재결합률
R_{p0}	열평형상태에서 정공 재결합률

전자와 정공의 열 생성률은 ‘단위시간당 단위체적당 생성 발생 건수’로 정의하고, 재결합률은 ‘단위시간당 단위체적당 재결합 발생 건수’로 정의한다. 따라서 생성률과 재결합률의 단위는 모두 [$\#/cm^3 \cdot sec$]가 된다.

[그림 6-1]과 같이 가전자대역의 전자는 끊임없이 전도대역으로 열적 여기를 하면서 전자와 정공을 동시에 생성한다. 따라서 다음 식이 성립한다.

$$G_{n0} = G_{p0} \quad (6.1)$$

생성된 전자들은 전도대역 내의 결정 속을 무질서하게 움직이다가 가전자대역 내의 정공과 가깝게 접근하면, 정공의 빈 상태 속으로 떨어져 재결합하면서 전자와 정공 모두는 소멸된다. 이때 전자와 정공은 쌍으로 재결합되므로 다음 식이 성립한다.

$$R_{n0} = R_{p0} \quad (6.2)$$

이렇게 캐리어들이 생성과 재결합을 무수히 반복하는 가운데, 열평형상태에서 순수 캐리어 농도는 시간에 따라 변화하지 않고 일정해야 하므로, 결국 다음 식이 만족된다.

$$G_{n0} = G_{p0} = R_{n0} = R_{p0}$$

(6.3)

예제 6-1

전자의 열 생성률 G_{n0} 와 재결합률 R_{n0} 간의 대소 관계가 다음과 같다고 하면, 전자농도가 시간에 따라 어떻게 변하는지 그래프로 그려보라.

(a) $G_{n0} > R_{n0}$

(b) $G_{n0} = R_{n0}$

(c) $G_{n0} < R_{n0}$

풀이

열 생성률은 '단위시간당 단위체적당 생성 발생 건수'이므로, 전자농도의 시간 변화율을 $\frac{dn}{dt}$ 이라고 하면 $\frac{dn}{dt} = G_{n0}$ 가 된다. 재결합률은 '단위시간당 단위체적당 재결합 발생 건수'이므로, 전자농도의 시간 감소율은 재결합률과 같아 $-\frac{dn}{dt} = R_{n0}$ 이다.

(a) $G_{n0} > R_{n0}$ 이면 $\frac{dn}{dt} = G_{n0} - R_{n0}$ 이다. 이 식을 적분한 식 $\int_{n(0)}^{n(t)} dn = \int_0^t (G_{n0} - R_{n0}) dt$ 로부터 전자농도는 다음과 같이 되어, 시간이 지날수록 전자농도는 점점 증가한다.

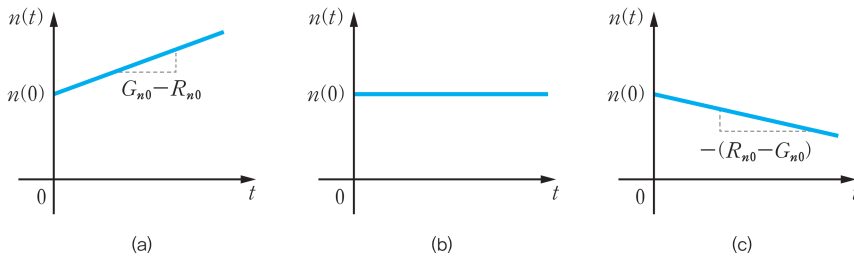
$$n(t) = n(0) + \int_0^t (G_{n0} - R_{n0}) dt = n(0) + (G_{n0} - R_{n0})t$$

(b) $G_{n0} = R_{n0}$ 이면 $\frac{dn}{dt} = G_{n0} - R_{n0} = 0$ 이 된다. 이 식을 적분하면 전자농도는 다음과 같이 되어, 일정한 전자농도를 유지한다.

$$n(t) = n(0) + \int_0^t (0) dt = n(0)$$

(c) 반대로 $G_{n0} < R_{n0}$ 이면 $\frac{dn}{dt} = -(R_{n0} - G_{n0})$ 가 된다. 이 식을 적분하면 전자농도는 다음과 같이 되어, 시간이 지날수록 전자농도는 점점 감소한다.

$$n(t) = n(0) - \int_0^t (R_{n0} - G_{n0}) dt = n(0) - (R_{n0} - G_{n0})t$$



[그림 6-2] (a) $G_{n0} > R_{n0}$, (b) $G_{n0} = R_{n0}$, (c) $G_{n0} < R_{n0}$ 일 때 전자농도의 시간 변화

6.1.2 과잉 캐리어 생성과 재결합

외부에서 전압을 가하거나, 전류를 흘려주거나, 빛을 쬐어주거나 해서 평형상태가 깨지게 되면 전자농도와 정공농도는 열평형상태에서의 농도로부터 크게 벗어나는 비평형상태가 된다. 이때 과잉 전자와 과잉 정공의 농도뿐 아니라, 과잉 전자와 과잉 정공의 생성률과 결합률, 그리고 과잉 소수캐리어의 수명까지 고려해야 한다. 이러한 개념들에 대해 이 장 전체에 걸쳐 사용되는 기호와 정의를 [표 6-2]와 같이 정리하여 사용하기로 하자.

[표 6-2] 비평형상태에서 캐리어 농도, 생성률, 재결합률, 수명에 대한 각종 기호와 정의

기호	정의
n_0, p_0	열평형상태의 전자농도 및 정공농도(시간과 위치에 독립)
n, p	전체 전자농도 및 정공농도(시간과 위치의 함수)
$\delta n = n - n_0$	과잉 전자농도(시간과 위치의 함수)
$\delta p = p - p_0$	과잉 정공농도(시간과 위치의 함수)
g_n', g_p'	과잉 전자 및 과잉 정공의 생성률[#/cm ³ ·sec]
R_n', R_p'	과잉 전자 및 과잉 정공의 재결합률[#/cm ³ ·sec]
τ_{n0}, τ_{p0}	과잉 소수캐리어 전자 및 정공의 수명

비평형상태에서 과잉 전자 생성률과 과잉 정공 생성률 간에는 어떤 관계가 있을까?

열평형상태에 있는 n형 반도체에 밴드갭 에너지 E_g 보다 큰 에너지를 갖는 빛을 쬐어주면, [그림 6-3]과 같이 가전자대역에 있는 전자가 이 빛에너지를 흡수하여 전도대역으로 올라가면서 자유전자와 정공이 동시에 생성된다. 이때 평형상태에 존재하던 전자농도 n_0 와 정공농도 p_0 에 추가해 부가적으로 더 생성된 전자와 정공은, 각각 **과잉 전자** excess electron와 **과잉 정공** excess hole이라고 부른다.

과잉 전자와 과잉 정공이 쌍으로 생성되므로 과잉 전자의 생성률 g_n' 과 과잉 정공의 생성률 g_p' 은 서로 같으며, 단위는 모두 [# / cm³ · sec]이다.

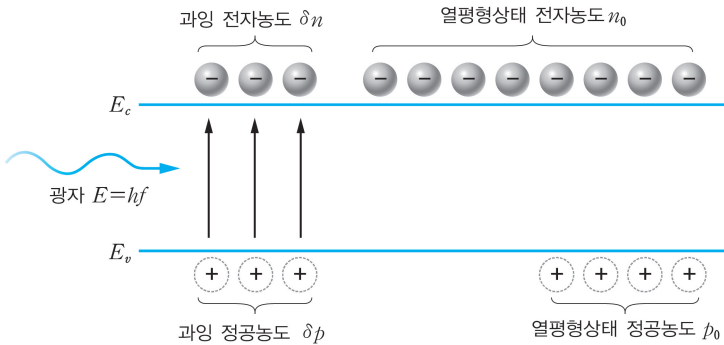
$$g_n' = g_p' \quad (6.4)$$

과잉 전자 δn 과 과잉 정공 δp 가 생성됨으로써 열평형이 깨지고 비평형상태가 되었을 때, 전도대역의 전자농도 n 과 가전자대역의 정공농도 p 는 각각의 열평형 값보다 증가하게 되며 다음과 같이 쓸 수 있다.

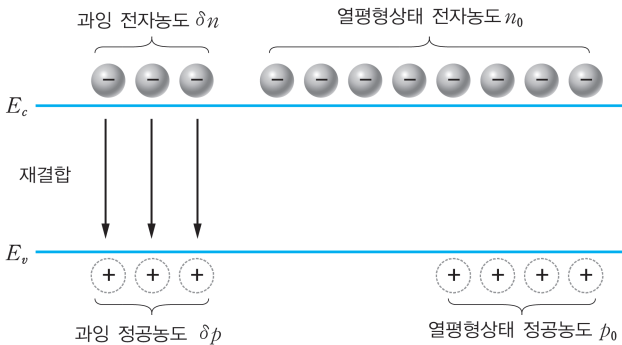
$$n = n_0 + \delta n \tag{6.5}$$

$$p = p_0 + \delta p \tag{6.6}$$

따라서 비평형상태에서 전자농도와 정공농도의 곱은 $np \neq n_0 p_0 (= n_i^2)$ 가 되고, 더 이상 질량작용의 법칙이 성립하지 않는다.



[그림 6-3] n형 반도체에서 광자에 의한 과잉 전자와 과잉 정공의 생성



[그림 6-4] 빛 제거 후 열평형을 이루기 위한 과잉 전자와 과잉 정공의 재결합

외부에서 쬐었던 빛을 제거하면 과잉 전자와 과잉 정공의 농도는 [그림 6-4]와 같이 전도대역에 있는 과잉 전자가 가전자대역으로 떨어지면서 과잉 정공과 재결합하기 때문에 점차 감소한다. 과잉 전자와 과잉 정공은 쌍으로 재결합하므로 과잉 전자들의 재결합률 R'_n 은 과잉 정공의 재결합률 R'_p 과 서로 같고, 단위는 모두 $[\#/cm^3 \cdot sec]$ 이다.

$$R'_n = R'_p \tag{6.7}$$

비평형상태에서 과잉 전자와 과잉 정공의 재결합률과 수명은 얼마일까?

전자가 재결합으로 사라지는 시간 변화율 $-\frac{dn(t)}{dt}$ 는 전자농도 $n(t)$ 에 비례하며, 또한 정공농도 $p(t)$ 에도 비례한다. 만약 전자의 재결합 상대인 정공이 없다면 재결합은 일어나지 않고, 전자농도는 감소하지 않을 것이다. 따라서 열평형상태에서 전자의 재결합률 R_{n0} 는 n_0 에도 비례하고 p_0 에도 비례한다. 이때 비례상수는 재결합계수 a_r 로 정의되며 다음 식이 성립한다.

$$R_{n0} = a_r n_0 p_0 = a_r n_i^2 \quad (6.8)$$

이 식은 식 (6.2)에 의해 정공의 재결합률 R_{p0} 와 같고, 또한 식 (6.3)에 따라 열평형상태에서 전자와 정공의 생성률은 다음과 같이 된다.

$$G_{n0} = G_{p0} = a_r n_i^2 \quad (6.9)$$

빛을 일정하게 계속 쬐어주는 비평형 정상상태에 있다가, $t=0$ 인 순간 갑자기 빛을 제거한 경우 전자농도의 시간 변화를 전자농도 증가요인과 감소요인으로 나누어 살펴보자.

전자농도 증가요인

시간에 따른 전자농도의 증가 $\frac{dn(t)}{dt}$ 는 빛이 제거된 상태이므로 과잉 전자와 과잉 정공의 생성은 존재하지 않고, [그림 6-1]과 같은 열평형상태에서 열에너지에 의한 열전자의 생성 메커니즘만 존재한다. 따라서 식 (6.9)에 의해 다음 식이 성립한다.

$$\frac{dn(t)}{dt} = G_{n0} = a_r n_i^2 \quad (6.10)$$

전자농도 감소요인

비평형상태에서 전자가 재결합으로 사라지는 시간 변화율 $-\frac{dn(t)}{dt}$ 는 전자농도 $n(t)$ 에 비례하며 또한 정공농도 $p(t)$ 에도 비례한다. 비례상수인 재결합계수 a_r 은 포획 단면적과 속도에 관계하는 변수로 식 (6.8)에서와 같다고 볼 수 있고, 다음 식이 성립한다.

$$\frac{dn(t)}{dt} = -a_r n(t)p(t) \quad (6.11)$$

따라서 증가요인과 감소요인을 함께 고려하여 전자농도의 시간 변화율을 정리하면, 식

(6.10)과 (6.11)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dn(t)}{dt} = a_r n_i^2 - a_r n(t)p(t) \quad (6.12)$$

여기서

$$n(t) = n_0 + \delta n(t) \quad (6.13)$$

$$p(t) = p_0 + \delta p(t) \quad (6.14)$$

이다. 과잉 전자와 과잉 정공이 쌍으로 생성되고 재결합되므로 $\delta n(t) = \delta p(t)$ 이고, 열평형 파라미터인 n_0 와 p_0 는 시간에 무관하므로 $\frac{dn_0}{dt} = 0$ 이며, $n_0 p_0 = n_i^2$ 임을 이용하면 식 (6.12)는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} &= \frac{d(\delta n(t))}{dt} = a_r [n_i^2 - (n_0 + \delta n(t))(p_0 + \delta p(t))] \\ &= -a_r \delta n(t) [(n_0 + p_0) + \delta n(t)] \end{aligned} \quad (6.15)$$

과잉 캐리어의 농도가 열평형상태의 다수캐리어 농도보다 아주 작은 것을 **저준위 주입** low-level injection이라고 하고, 과잉 캐리어 농도가 열평형상태의 다수캐리어 농도와 비슷하거나 더 클 때 **고준위 주입** high-level injection이라고 한다.

만약 **p형 물질** ($p_0 \gg n_0$)에서 **저준위 주입** ($p_0 \gg \delta n(t)$) 상태라면 식 (6.15)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{d(\delta n(t))}{dt} = -a_r p_0 \delta n(t) \quad (6.16)$$

이 방정식의 해는

$$\delta n(t) = \delta n(0) e^{-a_r p_0 t} = \delta n(0) e^{-t/\tau_{n0}} \quad (6.17)$$

가 된다. 여기서

$$\tau_{n0} = (a_r p_0)^{-1} \quad (6.18)$$

이고, 저준위 주입일 때 일정하다고 볼 수 있다. 이 τ_{n0} 를 과잉 소수캐리어인 **과잉 전자의 수명** excess minority carrier lifetime이라고 부른다.

과잉 소수캐리어인 전자의 재결합률 R'_n 은 식 (6.16)을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R'_n = \frac{-d(\delta n(t))}{dt} = a_r p_0 \delta n(t) = \frac{\delta n(t)}{\tau_{n0}} \quad (6.19)$$

과잉 전자와 과잉 정공은 동시에 쌍으로 재결합하므로, 과잉 다수캐리어인 정공의 재결합률 R'_p 은 과잉 소수캐리어인 전자의 재결합률 R'_n 과 같아서, p형 물질에서는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R'_p = R'_n = \frac{\delta n(t)}{\tau_{n0}} \quad (6.20)$$

빛을 쬐어주고 나서 제거하면 과잉 캐리어들이 차츰 사라지면서 열평형상태로 되돌아가는데, 평형상태로 복구되는 시간은 과잉 다수캐리어의 수명이 아니라 과잉 소수캐리어의 수명에 의해 결정된다는 사실에 유의해야 한다. 이때 과잉 소수캐리어의 수명은 재결합 상대인 다수캐리어 농도에 반비례한다. 즉 열평형상태에서 다수캐리어의 농도가 클수록 비평형상태에서 과잉 캐리어들이 사라지면서 평형상태로 복구되는 시간이 짧아진다.

만약 n형 물질($n_0 \gg p_0$)에서 저준위 주입($n_0 \gg \delta p(t)$) 상태라면 식 (6.15)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{d(\delta p(t))}{dt} = -a_r n_0 \delta p(t) \quad (6.21)$$

이 방정식의 해는 $\delta p(t) = \delta p(0)e^{-a_r n_0 t} = \delta p(0)e^{-t/\tau_{p0}}$ 이 된다. 여기서 $\tau_{p0} = (a_r n_0)^{-1}$ 은 과잉 소수캐리어인 정공의 수명을 나타낸다. 과잉 다수캐리어인 전자들의 재결합률 R'_n 은 과잉 소수캐리어인 정공의 재결합률 R'_p 과 같으므로, n형 물질에서는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R'_n = R'_p = \frac{\delta p(t)}{\tau_{p0}} \quad (6.22)$$

예제 6-2

$n_0 = 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 인 $T = 300 \text{K}$ 실리콘에서 빛을 쬐어주어 $\delta n(t) = \delta p(t) = 10^5 \text{cm}^{-3}$ 인 과잉 캐리어가 발생하였다. 재결합계수 $a_r = 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$ 일 때, 다음을 구하라.

- (a) 과잉 소수캐리어인 정공의 시간 변화와 수명
- (b) 과잉 다수캐리어인 전자의 시간 변화와 수명

풀이

(a) 과잉 소수캐리어인 정공의 수명은 $\tau_{p0} = \frac{1}{a_r n_0} = \frac{1}{(10^{-10})(10^{17})} = 10^{-7} \text{sec}$ 이다.

과잉 소수캐리어인 정공의 시간 변화는 다음과 같다.

$$\delta p(t) = \delta p(0)e^{-a_r n_0 t} = \delta p(0)e^{-t/\tau_{p0}} = 10^5 e^{-t/10^{-7}} \text{cm}^{-3}$$

(b) 과잉 다수캐리어인 전자의 시간 변화 및 수명은 과잉 소수캐리어인 정공의 시간 변화 및 수명과 동일하다. 즉 과잉 다수캐리어인 전자의 수명은 $\tau_{n0} = \tau_{p0} = 10^{-7} \text{sec}$ 이고, 과잉 다수캐리어인 전자의 시간 변화는 $\delta n(t) = \delta p(t) = 10^5 e^{-t/10^{-7}} \text{cm}^{-3}$ 이다.

6.1.3 의사-페르미 에너지 준위

페르미 에너지와 의사-페르미 에너지는 무엇이 다를까?

열평형상태에서 전자와 정공의 농도는 페르미 에너지 준위의 함수이며 그 식은 다음과 같다.

$$n_0 = n_i \exp\left[\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right] = N_c \exp\left[\frac{-(E_c - E_F)}{kT}\right] \quad (6.23)$$

$$p_0 = n_i \exp\left[\frac{E_{Fi} - E_F}{kT}\right] = N_v \exp\left[\frac{-(E_F - E_v)}{kT}\right] \quad (6.24)$$

여기서 E_F 와 E_{Fi} 는 각각 페르미 에너지와 진성 페르미 에너지를 나타내며, n_i 는 진성 캐리어 농도이다. [그림 4-10]에서와 같이 $E_c - E_F$ 의 크기가 작을수록 혹은 $E_F - E_{Fi}$ 의 크기가 클수록 전도대역의 전자농도가 크고, $E_F - E_v$ 의 크기가 작을수록 혹은 $E_{Fi} - E_F$ 의 크기가 클수록 가전자대역의 정공농도가 클 수 있다. 이와 같이 페르미 에너지는 열평형상태에서 캐리어 농도를 알려주기 때문에 매우 유용한 개념이다.

만약 어떤 반도체 내에 빛을 쬐어 주거나 전류를 흘리는 등, 과잉 캐리어가 생성된다면 그때는 이미 열평형상태가 아니며, 페르미 에너지는 명확하게 정의할 수 없는 개념이 된다. 그러나 이러한 비평형상태에서도 열평형상태의 페르미 에너지처럼 캐리어 농도와 연관된 어떤 기준이 있다면 매우 유용할 것이다. 이와 같은 목적으로 전자에 대한 의사(유사)quasi-페르미 준위와 정공에 대한 의사-페르미 준위를 정의할 수 있다. 만약 δn 과 δp 가 각각 과잉 전자와 과잉 정공의 농도라면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$n = n_0 + \delta n = n_i \exp\left[\frac{E_{Fn} - E_{Fi}}{kT}\right] = N_c \exp\left[\frac{-(E_c - E_{Fn})}{kT}\right] \quad (6.25)$$

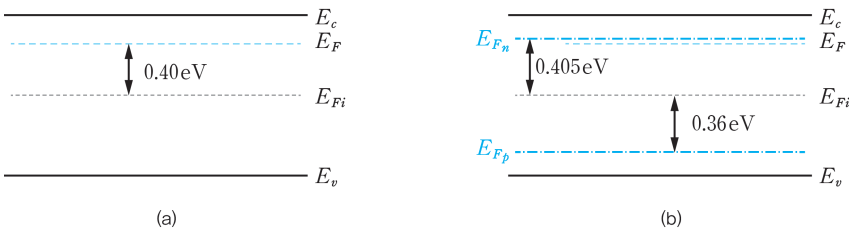
$$p = p_0 + \delta p = n_i \exp\left[\frac{E_{Fi} - E_{Fp}}{kT}\right] = N_v \exp\left[\frac{-(E_{Fp} - E_v)}{kT}\right] \quad (6.26)$$

여기서 E_{Fn} 과 E_{Fp} 는 각각 전자와 정공에 대한 **의사-페르미 에너지 준위** Quasi-Fermi energy level이다. 열평형상태와 유사하게 비평형상태에서도 $E_c - E_{Fn}$ 의 크기가 작을수록 혹은 $E_{Fn} - E_{Fi}$ 의 크기가 클수록 전도대역의 전자농도가 크고, $E_{Fp} - E_v$ 의 크기가 작을수록 혹은 $E_{Fi} - E_{Fp}$ 의 크기가 클수록 가전자대역의 정공농도가 큼을 알 수 있다. 따라서 **의사-페르미 에너지**는 비평형상태에서 캐리어 농도를 알려주는 **유용한 개념**이다. 다음 장에서 pn 접합의 동작을 이해할 때 의사-페르미 에너지를 활용할 것이다.

예제 6-3

[그림 6-5(a)]는 $T = 300\text{K}$ 에서 열평형상태일 때 실리콘 반도체의 에너지밴드 다이어그램을 보여준다. [그림 6-5(b)]는 동일한 반도체에 대한 비평형 조건 하에서의 에너지밴드 다이어그램이다. 다음 물음에 답하라.

- 열평형상태일 때 전자농도와 정공농도를 구하라.
- 비평형상태일 때 전자농도와 정공농도를 구하라.



[그림 6-5] 실리콘 반도체의 에너지밴드 다이어그램. (a) $T = 300\text{K}$ 인 열평형상태일 때, (b) 비평형상태일 때

풀이

$T = 300\text{K}$ 에서 실리콘 반도체의 특성 파라미터 값은 $N_c = 2.8 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$,
 $N_v = 1.04 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$, $n_i = 1.5 \times 10^{10}\text{cm}^{-3}$, $E_g = 1.12\text{eV}$ 이고, $kT = 0.0259\text{eV}$ 이다.

(a) 열평형상태일 때 전자농도는 다음과 같고,

$$n_0 = n_i \exp\left[\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right] = (1.5 \times 10^{10}) \exp\left[\frac{0.4}{0.0259}\right] = 7.644 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$$

열평형상태일 때 정공농도는 다음과 같다.

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{7.644 \times 10^{16}} = 2943\text{cm}^{-3} \quad \text{혹은}$$

$$p_0 = n_i \exp\left[\frac{-(E_F - E_{Fi})}{kT}\right] = (1.5 \times 10^{10}) \exp\left[\frac{-0.4}{0.0259}\right] = 2943\text{cm}^{-3}$$

(b) 비평형상태일 때 전자농도는 다음과 같고,

$$n = n_i \exp\left[\frac{E_{Fn} - E_{Fi}}{kT}\right] = (1.5 \times 10^{10}) \exp\left[\frac{0.405}{0.0259}\right] = 9.272 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$$

비평형상태일 때 정공농도는 다음과 같다.

$$p = n_i \exp\left[\frac{E_{Fi} - E_{Fp}}{kT}\right] = (1.5 \times 10^{10}) \exp\left[\frac{0.36}{0.0259}\right] = 1.632 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$$

$E_{Fn} - E_{Fi}$ 의 크기가 열평형상태인 0.40eV 에서 비평형상태인 0.405eV 로 커질 때 전자의 농도는 $7.644 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 에서 $9.272 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 으로 $1.628 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 만큼 증가하였다. $E_{Fi} - E_{Fp}$ 의 크기는 열평형상태인 -0.40eV 에서 비평형상태인 0.36eV 로 커질 때, 정공의 농도는 2943cm^{-3} 에서 $1.632 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 으로 약 $1.632 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 만큼 증가하였다. 즉 과잉 정공과 과잉 전자의 농도가 약 $1.6 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 증가할 때 다수캐리어인 전자에 대한 페르미 에너지의 변화는 0.05eV 에 불과하지만, 소수캐리어인 정공에 대한 페르미 에너지의 변화는 0.76eV 로 매우 크다는 것을 알 수 있다.

6.2 과잉 캐리어의 농도 분포와 이동 해석

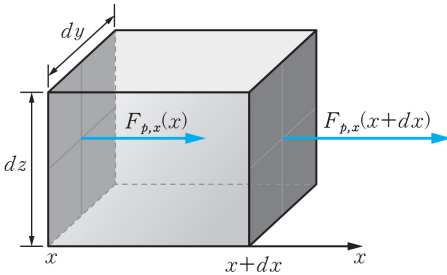
과잉 캐리어의 생성과 재결합, 표동과 확산을 함께 기술하는 방정식을 구하면 과잉 캐리어의 농도 분포와 이동을 해석할 수 있다. 먼저 전류의 연속방정식으로부터 앰비폴

러 전송방정식을 살펴본 후, 반도체 소자에서 발생하는 여러 가지 중요 현상들에 대해 해석해보자.

6.2.1 캐리어의 연속방정식

전자와 정공의 흐름을 지배하는 연속방정식이란 무엇일까?

[그림 6-6]과 같은 미소체적을 고려한다. 이 미소체적 $dx dy dz$ 내에 ‘단위시간당 증가하는 정공의 수’를 유발시키는 요인 두 가지를 고려해보자.



[그림 6-6] 미소체적에서 정공의 흐름

1 왼쪽 x 지점에서 미소체적의 내부로 흘러들어가는 정공 유속

유속이란 ‘단위시간당 단위면적당 지나가는 입자 수’이고, 단위는 $[\#/cm^2 \cdot sec]$ 이다. 이러한 유속, 즉 입자의 흐름에 의해 미소체적 내에 입자 수가 증가하기도 하고 감소하기도 한다. 즉 $F_{p,x}$ 를 x 지점에서 정공입자의 유속이라고 하면, 이로 인해 미소체적 내에 정공이 증가하게 된다. 왼쪽 x 지점의 단면적 $dy dz$ 를 통해 단위시간당 미소체적 $dx dy dz$ 내로 흘러들어가는 정공의 개수는 ‘정공 유속’에 ‘단면적’을 곱하여 $F_{p,x}(x) dy dz$ 가 된다.

2 미소체적 내부에서 열에너지로 생성되는 정공 생성

입자의 열 생성률은 ‘단위시간당 단위체적당 생성된 개수’로 정의되고, 정공의 생성률을 g_p 라고 하면 g_p 의 단위는 $[\#/cm^3 \cdot sec]$ 이다. 미소체적 $dx dy dz$ 내에서 열에너지에 의해 생성되는 단위시간당 정공의 개수는 ‘정공의 생성률’에 ‘체적’을 곱하여 $g_p dx dy dz$ 가 된다.

마찬가지로 미소체적 $dx dy dz$ 내에 ‘단위시간당 감소되는 정공의 수’를 유발시키는 요인 두 가지를 고려해보자.

③ 오른쪽 $x + dx$ 지점에서 미소체적의 외부로 흘러나가는 정공 유속

$F_{p,x}(x + dx)$ 를 $x + dx$ 지점에서의 정공입자의 유속이라고 하면, 이로 인해 미소체적 내에 정공이 감소하게 된다. $x + dx$ 지점의 단면적 $dydz$ 를 통해, 단위시간당 미소체적 $dx dy dz$ 에서 밖으로 흘러나간 정공의 개수는 ‘정공 유속’에 ‘단면적’을 곱하여 $F_{p,x}(x + dx)dydz$ 가 된다.

④ 미소체적 내부에서 재결합으로 사라지는 정공 소멸

입자의 재결합률은 ‘단위시간당 단위체적당 재결합한 개수’로 정의되고, 정공의 재결합률을 R_p 라고 하면 R_p 의 단위는 $[\#/cm^3 \cdot sec]$ 이다. 정공의 재결합률은 현재의 정공의 농도 p 를 정공의 수명 τ_{pt} 로 나누어 $R_p = \frac{p}{\tau_{pt}}$ 와 같이 표현할 수 있다. 미소체적 $dx dy dz$ 내 정공의 재결합에 의해 사라지는 단위시간당 정공의 개수는 ‘정공의 재결합률 $\frac{p}{\tau_{pt}}$ ’에 ‘체적’을 곱하여 $\frac{p}{\tau_{pt}}dx dy dz$ 가 된다. 여기서 τ_{pt} 에는 열평형 캐리어 수명과 과잉 캐리어 수명이 포함되어 있다.

미소체적 $dx dy dz$ 내에 ‘단위시간당 순증가한 정공의 수’는 ‘단위시간당 정공농도의 증가율인 $\frac{\partial p}{\partial t}$ ’에 ‘체적 $dx dy dz$ ’를 곱하여 $\frac{\partial p}{\partial t}dx dy dz$ 가 되며, 이는 위의 네 가지 요소를 고려하면 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial p}{\partial t}dx dy dz = \textcircled{1} - \textcircled{3} + \textcircled{2} - \textcircled{4} = -\frac{\partial F_p}{\partial x}dx dy dz + g_p dx dy dz - \frac{p}{\tau_{pt}}dx dy dz \quad (6.27)$$

여기서 $\textcircled{1} - \textcircled{3} = -[F_{p,x}(x + dx) - F_{p,x}(x)]dydz = -\frac{\partial F_p}{\partial x}dx dy dz$ 를 적용하였다. 식 (6.27)의 양변을 미소체적 $dx dy dz$ 로 나누면 단위시간당 정공농도의 순증가는 다음과 같다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial F_p}{\partial x} + g_p - \frac{p}{\tau_{pt}} \quad (6.28)$$

이 식은 정공의 연속방정식 continuity equation이다.

마찬가지로 전자에 대한 일차원적 연속방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial F_n}{\partial x} + g_n - \frac{n}{\tau_{nt}} \quad (6.29)$$

여기서 F_n 은 전자입자의 유속[#/cm²·sec]이고, g_n 은 전자의 생성률[#/cm³·sec]이며, τ_{nt} 는 전자의 수명이다.

예제 6-4

[그림 6-6]과 같은 미소체적에서 단면적이 5cm²이고, 10sec 동안 왼쪽 단면을 통과하는 전자의 개수가 $N(x) = 10^{10}$ 개이다. $dx = 2$ cm 이고, 10sec 동안 오른쪽 단면을 통과하는 전자의 개수가 $N(x+dx) = 10^9$ 개이다. 다음 물음에 답하라.

- (a) 전자의 유속 $F_n(x)$ 와 $F_n(x+dx)$
- (b) 미소체적에서 단위시간당 증가하는 전자의 농도

풀이

(a) 전자의 유속 $F_n(x) = \frac{10^{10} \text{ 개}}{(5 \text{ cm}^2)(10 \text{ sec})} = 2 \times 10^8 \text{ 개/cm}^2\text{s}$ 이다.

전자의 유속 $F_n(x+dx) = \frac{10^9 \text{ 개}}{(5 \text{ cm}^2)(10 \text{ sec})} = 2 \times 10^7 \text{ 개/cm}^2\text{s}$ 이다.

- (b) 단위시간당 미소 체적소 내부에서 증가하는 전자의 개수는

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = A[F_n(x) - F_n(x+dx)] = 5 \cdot [(2 \times 10^8) - (2 \times 10^7)] = 9 \times 10^7 \text{ 개/s}$$

이고, 미소 체적소의 체적은 $\Delta V = A dx = 5 \cdot 2 = 10 \text{ cm}^3$ 이므로, 미소체적에서 단위시간당 증가하는 전자의 농도는 다음과 같다.

$$\frac{\Delta N}{\Delta t \Delta V} = \frac{A[F_n(x) - F_n(x+dx)]}{A dx} = \frac{9 \times 10^7}{10} = 9 \times 10^6 \text{ 개/cm}^3\text{s}$$

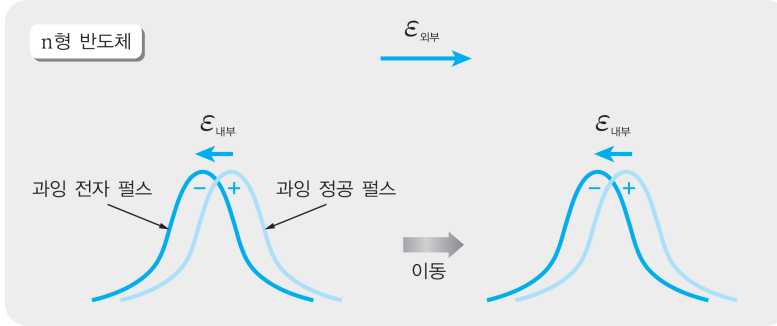
$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial F_n}{\partial x}$ 에서 $-\frac{\partial F_n}{\partial x} = -\frac{(2 \times 10^7) - (2 \times 10^8)}{2} = 9 \times 10^6 \text{ 개/cm}^3\text{s}$ 와 같이 계산할 수도 있다.

6.2.2 캐리어의 앰비폴러 전송방정식

과잉 캐리어에 대한 앰비폴러 전송방정식이란 무엇일까?

반도체 내의 어느 한 지점에 과잉 전자 펄스와 과잉 정공 펄스가 생성되었을 때, 만약 전계가 인가된다면 서로 다른 전하량을 갖는 과잉 정공과 과잉 전자는 서로 반대되는

방향으로 전송될 것이다. 그러나 과잉 전자와 과잉 정공의 공간적 분리는 전자와 정공이 서로 반대 전하량을 가지고 있기 때문에 두 입자들 사이에 내부전계를 발생시키고, 이 내부전계는 전자들과 정공들 간에 서로 끌어당기는 힘을 제공하기 때문에 과잉 전자들과 과잉 정공들의 펄스를 서로 붙잡고 있게 만들 것이다.



[그림 6-7] n형 반도체 내에 과잉 정공 펄스와 과잉 전자 펄스의 앰비폴러 전송

예를 들어 n형 반도체 내에 [그림 6-7]과 같이 과잉 전자 펄스와 과잉 정공 펄스가 생성되면, 외부전계 $\mathcal{E}_{\text{외부}}$ 에 의해 이 두 펄스는 서로 다른 방향으로 갈라지다가 유도된 내부전계 $\mathcal{E}_{\text{내부}}$ 에 의해 과잉 정공과 전자는 서로 붙어서 움직인다. 이때 이 두 펄스가 함께 움직이는 방향은 과잉 소수캐리어인 과잉 정공 펄스가 움직이는 방향인 오른쪽 방향이 된다는 점에 유의하자(연습문제 6.1). 이런 현상은 앰비폴러 방정식 (6.31)과 (6.32)에서 앰비폴러 확산계수, 앰비폴러 이동도, 재결합 파라미터가 모두 과잉 소수캐리어의 확산계수, 이동도, 캐리어 수명이라는 것을 의미하며, 이 사실은 매우 중요하다. 과잉 전자 펄스와 과잉 정공 펄스는 조금만 분리되어 약간의 농도차가 발생하더라도 두 펄스가 함께 확산과 표동을 하게 만들 정도의 충분한 내부전계를 유발할 수 있으며, 이때 생성된 내부전계의 크기는 외부전계에 비교하여 매우 작다고 볼 수 있다.

$$|\mathcal{E}_{\text{내부}}| \ll |\mathcal{E}_{\text{외부}}| \quad (6.30)$$

따라서 과잉 전자들과 과잉 정공들이 서로 거의 전하중성을 이루면서, 단일의 유효 이동도와 유효 확산계수를 갖고 함께 표동 혹은 확산을 하는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 현상을 앰비폴러 전송(ambipolar transport)이라고 한다.¹ 이때의 유효 이동도를 앰비폴러 이동도라 하고, 유효 확산계수를 앰비폴러 확산계수라고 부른다. 이 유효 파라미터들이 저준위 주입의 경우 과잉 소수캐리어의 파라미터가 되는 것이다(연습문제 6.3).

¹ ambipolar는 ‘동시 이극성’의 의미이다.

$p_0 \gg n_0$ 인 p형 반도체인 경우, 과잉 캐리어 농도가 열평형 다수캐리어 농도보다 아주 작은 저준위 주입을 가정하면 $p_0 \gg \delta n$ 이 되며, 이때 p형 반도체에 대한 앰비플러 방정식은 다음과 같다.

$$D_n \frac{\partial^2(\delta n)}{\partial x^2} + \mu_n \mathcal{E} \frac{\partial(\delta n)}{\partial x} + g' - \frac{\delta n}{\tau_{n0}} = \frac{\partial(\delta n)}{\partial t} \quad (6.31)$$

여기서 δn 은 과잉 소수캐리어인 전자의 농도이고, 전하중성 조건 $\delta p \approx \delta n$ 을 사용하면 과잉 정공의 농도도 된다. g' 은 과잉 캐리어의 생성률이고, τ_{n0} 는 저준위 주입 하의 과잉 소수캐리어의 수명으로 저준위 주입 조건 내에서는 다수캐리어의 수가 거의 변동이 없다고 볼 수 있어 일정하다고 할 수 있다.

마찬가지로 저준위 주입 하의 n형 반도체인 경우에는 다음과 같은 과잉 소수캐리어인 정공에 대한 앰비플러 방정식을 얻는다.

$$D_p \frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} - \mu_p \mathcal{E} \frac{\partial(\delta p)}{\partial x} + g' - \frac{\delta p}{\tau_{p0}} = \frac{\partial(\delta p)}{\partial t} \quad (6.32)$$

여기서 δp 는 과잉 소수캐리어인 정공의 농도이고, 전하중성 조건 $\delta n \approx \delta p$ 를 사용하면 과잉 전자의 농도도 된다. τ_{p0} 는 저준위 주입 하의 과잉 소수캐리어인 정공의 수명이다.

앞에서도 설명했듯이 식 (6.31)과 (6.32)의 앰비플러 확산계수와 앰비플러 이동도, 그리고 재결합 파라미터가 소수캐리어의 확산계수와 이동도, 캐리어 수명이라는 사실은 매우 중요하다. 전하중성 조건은 과잉 소수캐리어의 농도와 과잉 다수캐리어의 농도가 같음을 의미한다. 따라서 과잉 다수캐리어는 과잉 소수캐리어와 함께 확산과 표동을 하게 되고, 중요한 것은 이때 과잉 다수캐리어의 움직임이 과잉 소수캐리어의 파라미터에 의해 결정된다는 것이다. 이러한 앰비플러 현상은 반도체 물성을 이해하는 데 매우 중요한 개념이다.

6.3 과잉 캐리어의 변동과 이동

앰비플러 전송방정식을 비평형상태에 있는 반도체 소자의 동작 중에서 몇 가지 중요한 특정 상황에 대하여 적용함으로써 해를 구해보자. 이때 대개의 경우 앰비플러 전송방정

식에서 몇 개의 항만 고려하여 계산하면 된다. 앰비폴러 전송방정식 (6.31)과 (6.32)에 총 5개의 항이 존재하는데, [표 6-3]에는 이 각 항을 하나씩 제거할 수 있는 조건을 정리하여 방정식이 어떤 상황에서 어떻게 간소화될 수 있는지를 나타내었다.

[표 6-3] 앰비폴러 전송방정식의 간소화 상황

항	과잉 전자	과잉 정공	간소화 상황
① 농도 공간 변화	$D_n \frac{\partial^2(\delta n)}{\partial x^2} = 0$	$D_p \frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} = 0$	과잉 캐리어의 균일 분포(균일한 생성률)
② 전계	$\mathcal{E} \frac{\partial(\delta n)}{\partial x} = 0$	$\mathcal{E} \frac{\partial(\delta p)}{\partial x} = 0$	전계가 존재하지 않음
③ 생성	$g' = 0$		과잉 캐리어가 생성되지 않음
④ 재결합	$\frac{\delta n}{\tau_{n0}} = 0$	$\frac{\delta p}{\tau_{p0}} = 0$	과잉 캐리어가 재결합되지 않음(무한 수명)
⑤ 농도 시간 변화	$\frac{\partial(\delta n)}{\partial t} = 0$	$\frac{\partial(\delta p)}{\partial t} = 0$	시간 변화가 없는 정상상태

비평형상태에 있는 반도체 소자의 동작 중에서 몇 가지 중요한 현상으로 다음과 같은 상황을 생각해볼 수 있다. 편의상 비평형상태를 유발하는 원인으로 빛을 쬐어주는 것으로 가정한다.

- ① 균일한 세기로 빛을 계속 쬐어주어 과잉 캐리어의 농도가 정상상태에 도달했다가, 갑자기 빛을 제거하면 시간이 흐르면서 재결합이 발생되고 과잉 캐리어 농도가 줄어든다. 이때 시간에 따른 과잉 캐리어 농도의 변화.
 - ➔ 농도 공간 변화, 전계, 생성 항은 없고, 재결합, 농도 시간 변화 항만 존재
- ② 빛이 없다가 균일세기의 빛을 계속 쬐어주면, 정상상태에 도달하기까지 과잉 캐리어들이 시간이 흐르면서 점점 증가한다. 이때 시간에 따른 과잉 캐리어 농도의 변화.
 - ➔ 농도 공간 변화, 전계 항은 없고, 생성, 재결합, 농도 시간 변화 항만 존재
- ③ 균일세기의 빛을 특정 지점에 계속 쬐어주면 이 특정 위치에 생성된 과잉 캐리어가 확산과 재결합을 계속하며, 정상상태에 이를 때까지 퍼져나간다. 이때 공간에 따른 과잉 캐리어 농도의 변화.
 - ➔ 전계, 생성, 농도 시간 변화 항은 없고, 농도 공간 변화, 재결합 항만 존재
- ④ 균일세기의 빛을 샘플 전체에 계속 쬐어주는 상태에서, 한 쪽 끝 특정 지점에 캐리어 싱크가 존재할 때 정상상태에서 과잉 캐리어들이 캐리어 싱크로 계속 빨

려 들어간다. 이때 공간에 따른 과잉 캐리어 농도의 변화.

➔ 전계, 농도 시간 변화 항은 없고, 농도 공간 변화, 생성, 재결합 항만 존재

⑤ 전계가 인가된 상태에서 순간적으로 특정 지점에 빛을 쬐어 과잉 캐리어를 생성시킨 후 빛을 제거하면, 생성된 과잉 캐리어가 전계에 의해 표동하면서 확산과 재결합이 함께 동반된다. 이때 시간과 공간에 따른 과잉 캐리어 농도의 변화.

➔ 생성 항만 없고, 농도 공간 변화, 전계, 재결합, 농도 시간 변화 항은 존재

이 다섯 가지 각각의 경우에 대하여, 앰비폴러 전송방정식 (6.31)과 (6.32)의 총 5개의 항 중에서 어떤 항이 삭제되는지를 정리한 것이 [표 6-4]이다. 표에서 ‘성립’은 왼쪽의 항이 ‘0’이 되는 조건을 만족시켜 삭제되는 것을 의미하며, 빈칸인 항만 방정식에 포함시켜 방정식을 풀어 해를 구하면 된다.

[표 6-4] 5가지 서로 다른 상황에 대한 앰비폴러 전송방정식의 간소화

항	과잉 전자	과잉 정공	①	②	③	④	⑤
①	$D_n \frac{\partial^2(\delta n)}{\partial x^2} = 0$	$D_p \frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} = 0$	성립	성립			
②	$\mathcal{E} \frac{\partial(\delta n)}{\partial x} = 0$	$\mathcal{E} \frac{\partial(\delta p)}{\partial x} = 0$	성립	성립	성립	성립	
③	$g' = 0$		성립		성립		성립
④	$\frac{\delta n}{\tau_{n0}} = 0$	$\frac{\delta p}{\tau_{p0}} = 0$					
⑤	$\frac{\partial(\delta n)}{\partial t} = 0$	$\frac{\partial(\delta p)}{\partial t} = 0$			성립	성립	

지금부터 이 다섯 가지 경우에 대하여 각각 그 해를 구해보자.

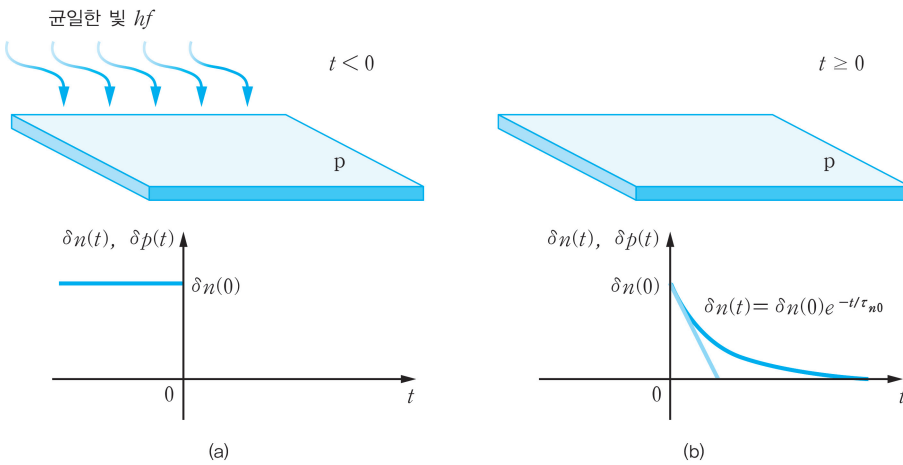
6.3.1 과잉 캐리어 재결합 소멸과정과 농도의 시간 변화

빛을 계속 쬐다가 갑자기 제거한 샘플 내에서 과잉 캐리어 농도는 시간에 따라 어떻게 변화할까?

균일한 세기로 빛을 계속 쬐어주어 과잉 캐리어의 농도가 정상상태에 도달한 상태에서, $t = 0$ 인 순간 갑자기 빛을 제거하면 과잉 캐리어의 재결합이 발생하고 시간이 흐르면서 과잉 캐리어 농도가 점차 줄어든다. 이때 시간에 따른 과잉 캐리어 농도의 변화를 다음 예를 통해 살펴보자.

[그림 6-8]과 같이 넓은 판의 p형 균일 반도체에 전계가 인가되지 않은 상태로, $t=0$ 이전에 계속 일정한 세기의 빛을 전체 샘플에 균일하게 쬐어주다가 $t=0$ 인 순간에 빛을 제거한다. $t=0$ 이전에 쬐어준 빛에 의해 생성된 과잉 캐리어의 농도가 열평형 정공농도보다 아주 작다고 가정하고, $t \geq 0$ 일 때의 과잉 캐리어 농도를 시간의 함수로 계산해보자. p형 반도체이므로 과잉 캐리어의 움직임이 소수캐리어인 과잉 전자에 의해 결정된다. 즉 p형 반도체 내에서 과잉 전자와 과잉 정공은 과잉 소수캐리어인 전자의 수명에 의해 결정된 비율로 재결합한다.

주어진 조건으로부터 암비폴러 전송방정식을 간소화하고, 그때 얻어진 방정식의 해를 정리하여 [표 6-5]에 나타내었다.



[그림 6-8] (a) $t < 0$ 동안 빛을 쬐었을 때의 과잉 캐리어 농도, (b) $t \geq 0$ 동안 빛을 제거했을 때의 과잉 캐리어 농도 변화

[표 6-5] 간소화된 암비폴러 전송방정식과 해

항	과잉 전자	①의 성립 이유	방정식의 간소화 및 해
①	$D_n \frac{\partial^2(\delta n)}{\partial x^2} = 0$	과잉 정공의 농도가 일정	$D_n \frac{\partial^2(\delta n)}{\partial x^2} + \mu_n \mathcal{E} \frac{\partial(\delta n)}{\partial x} + g' - \frac{\delta n}{\tau_{n0}} = \frac{\partial(\delta n)}{\partial t}$ 에서 $\frac{d(\delta n)}{dt} = -\frac{\delta n}{\tau_{n0}}$: 방정식
②	$\mathcal{E} \frac{\partial(\delta n)}{\partial x} = 0$	전계가 없음	
③	$g' = 0$	빛을 제거해 생성되지 않음	$\delta n(t) = \delta n(0)e^{-t/\tau_{n0}}$: 과잉 전자변화 $\delta p(t) = \delta n(0)e^{-t/\tau_{n0}}$: 과잉 정공변화 $\tau_{n0} = (a_r p_0)^{-1}$
④	$\frac{\delta n}{\tau_{n0}} = 0$		
⑤	$\frac{\partial(\delta n)}{\partial t} = 0$		

저준위 주입일 때, 소수캐리어 전자의 수명 τ_{n0} 는 일정하다고 볼 수 있으므로 식

6.1 전계를 가한 상태에서 p형 반도체 내에 과잉 정공 펄스와 과잉 전자 펄스가 생성되었을 때, [그림 6-7]과 같은 앰비폴러 전송 그림을 그려보라.

6.2 앰비폴러 전송방정식을 구하는 중간 과정인 과잉 캐리어 확산방정식을 구하려고 한다. 다음 물음에 답하라.

(a) 5장에서 다룬 [표 5-3]의 정공과 전자의 전류밀도는 다음과 같다. 이로부터 정공과 전자의 유속을 계산하라.

$$J_n = J_{n,drift} + J_{n,diff} = en\mu_n \mathcal{E}_x + eD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = J_{p,drift} + J_{p,diff} = ep\mu_p \mathcal{E}_x - eD_p \frac{dp}{dx}$$

(b) (a)에서 구한 유속을 식 (6.28)과 (6.29)에 대입하여, 다음과 같은 과잉 캐리어에 대한 시간의존 확산방정식을 유도하라(이 식들은 과잉농도 δn 과 δp 뿐만 아니라, 전체 농도인 n 과 p 를 함께 가지고 있음에 유의해야 한다).

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

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

6.3 [연습문제 6.2]의 두 식에 전하중성 조건 $\delta n \approx \delta p$ 를 적용하고, 두 식을 연립하여 $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x}$ 항을 제거한 후, $g = g_n = g_p$ 와 $R = R_n = \frac{n}{\tau_{nt}} = R_p = \frac{p}{\tau_{pt}}$ 를 적용하면 다음과 같은 앰비폴러 전송방정식을 얻을 수 있다.

$$D' \frac{\partial^2(\delta n)}{\partial x^2} + \mu' \mathcal{E} \frac{\partial(\delta n)}{\partial x} + g - R = \frac{\partial(\delta n)}{\partial t}$$

여기서 D' 은 앰비폴러 확산계수로 $D' = \frac{\mu_n n D_p + \mu_p p D_n}{\mu_n n + \mu_p p}$ 이고, μ' 은 앰비폴러 이동도로 $\mu' = \frac{\mu_n \mu_p (p - n)}{\mu_n n + \mu_p p}$ 이다. $p_0 \gg n_0$ 인 p형 반도체인 경우에 대하여, 과잉 캐리어 농도가 열평형 다수캐리어 농도보다 아주 작아 $p_0 \gg \delta n$ 인 저준위 주입을 가정하고, 다음 물음에 답하라.

(a) $D' = \frac{\mu_n n D_p + \mu_p p D_n}{\mu_n n + \mu_p p} = D_n$ 이 됨을 보여라.

(b) $\mu' = \frac{\mu_n \mu_p (p - n)}{\mu_n n + \mu_p p} = \mu_n$ 이 됨을 보여라.

(c) $g - R = g' - \frac{\delta n}{\tau_{n0}}$ 이 됨을 보여라(g' 은 과잉 캐리어의 생성률). 결과적으로 과잉 소수캐리어인 전자에 대한 앰비폴러 전송방정식 (6.31)을 얻을 수 있다.

6.4 [그림 6-8]과 같이 전계가 인가되지 않은 상태에서, 단일 불순물로 도핑된 넓은 판의 균일 반도체에 $t = 0$ 이전에 계속 일정한 세기의 빛을 쬐어주다가 $t = 0$ 일순간에 빛을 제거하였다. $t \geq 0$ 일 때의 과잉 캐리어 농도를 시간의 함수로 측정 한 결과가 [그림 6-18]과 같다. $t = 0$ 이전에 쬐여준 빛에 의해 생성된 과잉 캐리어의 농도가 다수캐리어 농도보다 아주 작다고 가정하고, 다음 물음에 답하라.

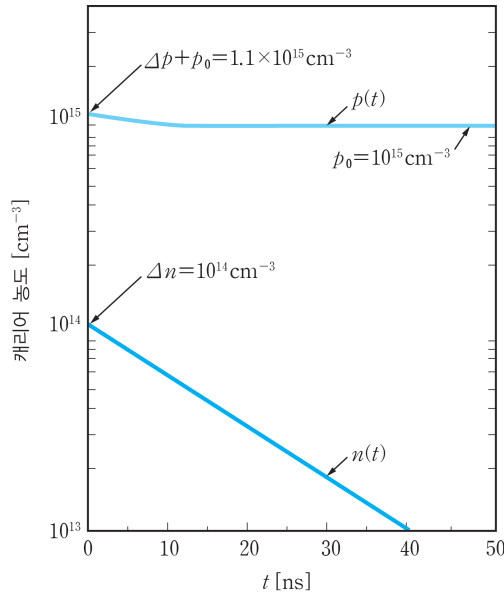
(a) $T = 300\text{ K}$ 에서 도펀트가 모두 이온화되었다고 할 때, 이 반도체의 도펀트는 도너인지 억셉터인지 판단하고, 농도를 구하라.

(b) 과잉 소수캐리어 변화가 그림과 같이 직선으로 변화하고, t 축 절편이 45 ns 라고 할 때, 소수캐리어의 수명을 구하라.

(c) $t = 0$ 인 순간의 과잉 캐리어가 초깃값의 e^{-1} 인 값으로 감소하기까지 소요되는 시간을 구하라.

(d) 전자와 정공의 재결합계수 a_r 을 계산하라.

(e) 이 반도체가 GaAs라고 하면, 열평형상태에서 소수캐리어의 농도는 얼마인가? GaAs는 $T = 300\text{ K}$ 에서 $n_i = 1.8 \times 10^6\text{ cm}^{-3}$ 이다.



[그림 6-18] 캐리어 농도의 시간 변화를 그린 세미-로그 그래프

6.5 $T = 300\text{ K}$ 에서 $N_a = 5 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 으로 도핑된 p형 반도체에 대하여, [그림 6-9(a)]와 같이 $t = 0$ 이전에는 어떠한 빛도 쬐어주지 않다가, $t = 0$ 인 순간부터 일정한 세기의 빛을 일관되게 전체 샘플에 쬐어주었다. 저준위 주입을 가정하고 $\tau_{n0} = 10^{-8}\text{ sec}$, $g' = 10^{21}\text{ cm}^{-3}\text{ sec}^{-1}$ 이라고 할 때, $t \geq 0$ 일 때의 시간에 따른 과잉 캐리어 농도 변화를 계산하라.

6.6 $T = 300\text{ K}$ 이고 $N_a = 5 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 으로 도핑된 p형 균일 반도체인 무한크기의 얇은 판이 $x-y$ 평면상에 놓여있다고 하자. [그림 6-10(a)]와 같이 $x = 0$ 인 직선 부분에 일정한 세기의 빛을 지속적으로 쬐어줄 때, 반도체 판이 충분히 얇아서 이 평면상에 생성된 과잉 캐리어의 농도가 균일하게 생성되며, 저준위 주입 조건이 성립한다고 가정하자. 정상상태에 도달하였을 때 공간적인 과잉 캐리어 분포를 계산하라. $\tau_{n0} = 10^{-8}\text{ sec}$, $D_n = 35\text{ cm}^2/\text{sec}$, $\delta n(0) = 10^{14}\text{ cm}^{-3}$ 이라고 가정한다.