論文 87-24-4-13

강한 도핑의 효과(Heavy Doping Effects)와 N^+-P 태양전지에의 응용

(Heavy Doping Effects and Their Application to N^+-P Solar Cells)

朴 成 鎬* 金 忠 源* 韓 百 亨*

(Seong Ho Park, Choong Won Kim and Baik Hyung Han)

要 約

본 논문에서는 강한 도핑의 효과를 이론적으로 조사하고, 이 효과를 나타내는 파라메터(heavy doping parameter)들을 도핑농도의 함수로서 modeling 하였다. 또한 강한 도핑 효과의 디바이스에 대한 응용으로써, 이 효과를 고려하여 n^+-p 태양전지를 해석해서, n^+영역(즉, 에미터)의 설계파라메터에 대한 개방전압의 관계를 조사했다.

본 논문에서 modeling한 heavy doping parameter들은 실험결과와 잘 일치하였고, 에미터의 특성화로부터 태양전지의 최대효율을 얻기위한 에미터의 조건이 밝혀졌다.

Abstract

In this paper, we investigate the heavy doping effects theoretically and model the heavy doping parameters as a function of doping concentration. To apply the heavy doping effects to devices, we also analyze n^+-p solar cells in consideration of these effects and investigate the dependence of open circuit voltage on the emitter design parameters.

The heavy doping parameters modeled in this paper are in good agreement with experimental results, and the condition of an emitter in the maximum efficiency of solar cells is obtained from the characterization of it.

I. 서 론

최근 반도체에 불순물을 강하게 도핑시켰을 때 나타나는 물리적인 현상과 이로 인한 디바이스에서의 performance limitation에 대해서 많은 연구가 진행되었다.[1,2] 그 결과로써 강한 불순물 도핑이 bipolar junction transistor의 에미터 주입효율과 태양전지의 개방전압에 각각 제한을 가한다는 사실이 밝혀졌고, 이 performance limitation은 강한 불순물도핑이 반도체에서의 캐리어전송에 미치는 영향으로부터 나타난다고알려지게 되었다.

강한 불순물도핑이 캐리어전송에 미치는 영향은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 먼저 에너지밴드의 구조를 변화시킨다. 강한 불순물 도핑으로 인하여 전도대와 가전자대의 edge는 이동하고, discrete한 donor level과 acceptor level은 각각 불순물밴드로 된다. 두 번째로는 캐리어간의 재결합할 확율을 증가시킨다. 즉, 강한 불순물도핑으로 다수캐리어의 수가 증가하고, 이는 캐리어간의 재결합할 확율을 증가시키기 때문에, 소수캐리어의 생존시간과 확산길이는 감소하게 된다. 마지막으로 캐리어를 기술하는 통계학을 변

*正會員, 漢陽大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Hanyang Univ.)

接受日字 : 1987年 1月 12日

화시킨다. 불순물이 강하게 도핑된 영역에서는 Fermi level이 전도대나 또는 가전자대에 인접하게 되어, Maxwell-Boltzman 통계학대신 Fermi-Dirac 통계학을 사용하여 캐리어들을 기술하여야 만 한다.

본 논문에서는 위에서 기술한 세 가지 영향을 고려하여 강하게 도핑된 n형 실리콘에서의 에너지갭 감소, 이동도, 재결합율과 생존시간(즉, heavy doping parameters)에 대해서 이론적으로 조사하고, 이들을 도핑농도의 함수로서 modeling하고자 한다. 이때 도핑농도는 $10^{17}-10^{20}/cm^3$으로, 온도는 300K로 제한했다. 또한, 강한 도핑의 효과를 디바이스에 응용하기 위해서, n^+-p실리콘 태양전지를 해석하여 에미터를 특성화하고자 한다. 이를 위해서 강한 도핑의 효과를 고려하여 n^+-p 태양전지의 에미터영역에서 소수캐리어 전송방정식을 유도한 후, 에미터의 설계파라메터를 변화시켜 가면서, 유도한 방정식을 주어진 경계조건에 따라 수치적 방법으로 풀어서 에미터 포화전류를 계산하여, 태양전지의 최대효율을 얻기 위한 에미터의 설계 파라메터를 결정할 것이다.

본 논문의 내용은 다음과 같다. Ⅱ절에서는 heavy doping parameter에 대한 이론적인 조사와 이들을 modeling하는 방법을 다룬다. Ⅲ절에서는 강한 도핑의 효과를 고려한 n^+-p태양전지의 해석을 자세하게 다루고, 이로부터 에미터를 특성화할 것이다. 끝으로 Ⅳ절에서는 본 연구로부터 얻은 결론과 이에 대한 검토가 제시될 것이다.

Ⅱ. Heavy Doping parameters

1. 에너지갭의 감소

반도체에 불순물을 강하게 도핑시킬 때, 도핑농도가 증가함에 따라서 반도체의 밴드구조는 그림 1 에서와 같이 교란된다. 이러한 현상은 근본적으로 강하게 도핑된 반도체내에서의 입자간의 상호작용과 불순물의 무질서한 분포에서 비롯된다. 먼저, 입자간의 상호작용으로서 전도대에 존재하는 전자들간의 공간적인 배타는 전자들의 반발에너지를 감소시키고, 이로 인하여 전도대는 하향이동(downward shift)하게 된다. 또한 가전자대에 존재하는 정공들의 potential energy는 전자들에 의한 차폐효과(screening effect)에 의해 감소되어 가전자대는 상향이동(upward shift)하게 된다. 전도대의 하향이동과 가전자대의 상향이동을 각각 $\triangle E_c^{mb}$와 $\triangle E_v^{mb}$라 하면, Lee와 Fossum[13]으로 부터

$$\triangle E_c^{mb}=\frac{q^2}{4\pi^2\varepsilon_s}\alpha k_{Feff}, \qquad (1)$$

$$\triangle E_v^{mb}=\frac{33[meV]}{\gamma_s^{3/4}}\left(\frac{m_e^*}{m_{pc}^*}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (2)$$

(1)에서 q는 전자의 전하량, ε_s는 반도체의 유전율, α는 실리콘에서의 전자의 실효질량의 이방성을 고려하기 위한 요소를 나타내고, k_{Feff}는 effective Fermi wave vector로서

$$k_{Feff}=(3\pi^2 n_0)^{\frac{1}{3}}\left|\frac{2m_e^*(E_F-E_C)}{\hbar^2}\right|^{\frac{1}{2}}$$

이때 n_0는 전자의 균일한 농도, m_e^*는 전자의 실효질량, E_F는 Fermi level, E_c는 전도대의 edge, $\hbar$는 reduced Plank 상수이다. 또한 (2)에서 $r_s\equiv(3/4\pi n_0 a_B^3)^{1/3}$ a_B는 effective Bohr radius로서 $a_B\equiv 4\pi\varepsilon_s\hbar^2/q^2m_e^*$로 정의되고, m_{pc}^*는 정공의 전도도 실효질량(conductivity effective mass)을 나타낸다. 그런데 입자간의 상호작용으로 부터 얻은 (1)과 (2)는 입자들이 균일하게 분포되어 있다는 가정으로부터 유도되었고, (1)과 (2)의 합은 주로 빛의 광학적인 흡수나 방출에 영향을 미치므로 이를 광학적인 에너지갭의 감소(optical energy-gap narrowing)라고 한다.[13] 이를 $\triangle E_g^{op}$라 하면,

$$\triangle E_g^{op}=\triangle E_c^{mb}+\triangle E_v^{mb} \qquad (3)$$

이는 곧 (3)이 빛의 흡수계수 측정으로부터 추출한 에너지갭의 감소와 같다는 것을 의미한다.

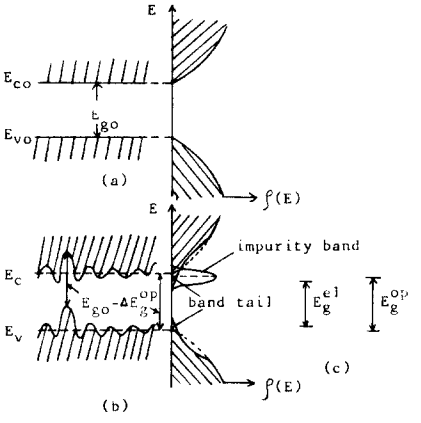

그림 1. 에너지밴드 다이어그램
(a) 도핑농도가 낮을 때의 에너지밴드 다이어그램과 상태밀도
(b) 강한 불순물도핑으로 인하여 교란된 에너지밴드 다이어그램과 상태밀도
(c) 광학적, 전기적 에너지갭

Fig. 1. Energy Band Diagram.
(a) Energy Band Diagram and Density of States at low Doping Concentrations.
(b) Perturbed Energy Band Diagram and Density of States at High Doping Concentrations.

불순물이 강하게 도핑된 반도체에서의 불순물의 분포는 사실상 무질서하다. 이러한 불순물의 무질서한 분포는 local potential의 유동을 일으켜서 상태밀도를 변화시킨다. 이 결과로써 상태밀도는 더 이상 parabolic form을 갖지 않고, 에너지갭내에 band tail을 나타낸다(그림1).

이 band tail을 고려한 전도대와 가전자대의 상태밀도는 Kane[14]에 의하면,

$$\rho(E_{e,n}) = \frac{(m_{nP}^*)^{\frac{3}{2}}(2^{\frac{3}{2}}\sigma)^{\frac{1}{2}}}{\pi\hbar^3} y\left(\frac{E_{e,n}}{2^{\frac{1}{2}}\sigma}\right) \quad (4)$$

여기서 m_n^*는 전도대의 6개의 subband를 모두 고려한 전자의 상태밀도 실효질량을, m_P^*는 가전자대의 split-off subband와 2개의 축퇴된 subband를 고려한 정공의 상태밀도 실효질량을 나타내고, σ는 potential energy 분포함수의 표준이율(standard deviation)로서

$$\sigma = q^2\left(\frac{n_o\lambda}{8\pi\varepsilon_s^2}\right)^{\frac{1}{2}},$$

함수 y(x)는 아래와 같이 정의된다.

$$y(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\sqrt{x-z}\ \exp(-z^2)dz$$

또한 λ는 차폐거리(screening length)로서 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$\lambda = \frac{1}{q}\left\{\varepsilon_s/\left(\left|\frac{\partial n_o}{\partial E_{fn}}\right| + \left|\frac{\partial p_o}{\partial E_{fp}}\right|\right)\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

이 식에서 E_{fn}와 E_{fp}는 각각 전자와 정공의 유사 Fermi level을 나타내고, 열평형 상태에서는 $E_{fn}=E_{fp}=E_F$이다.

다른 불순물을 강하게 도핑시켰을 때에는 불순물원자간의 간격이 작아져서, 구속된 불순물상태에 존재하는 전자들의 파동함수가 서로 겹치게 되어 불순물밴드가 형성된다(그림1). 또한, 불순물의 무질서한 분포로 야기되는 potential의 유동도 불순물밴드 형성의 한 요인이 된다. 이러한 불순물밴드의 상태밀도는 Morgan[15]에 의해서 다음과 같이 유도되었다.

$$\rho_{d,a}(E) = \frac{2N_d}{\sqrt{\pi}\sigma_{DA}}\exp\left(-\frac{(E-E_{d,a})^2}{\sigma_{DA}^2}\right) \quad (6)$$

(6)식에서 N_d는 donor의 농도, $E_{d,a}$는 불순물의 이온화 에너지, 첨자d와 a는 불순물이 각각 donor와 acceptor일 때를 나타내고, σ_{DA}는 다음과 같다.

$$\sigma_{DA} = 1.0344\frac{q^2}{\varepsilon_s}\left[\frac{(N_d+N_a)\lambda}{4\pi}\right]^{\frac{1}{2}}\exp\left(-\frac{1}{\sqrt{11.3206\pi(N_d+N_a)\cdot\lambda^3}}\right)$$

이렇게 형성된 band tail과 불순물밴드는 불순물이 강하게 도핑된 반도체에서의 캐리어전송에 상당한 영향을 미치게 된다. 그러므로 이를 고려하기 위하여, Lee와 Fossum의 방법[3]과 같이 parabolic conduction band와 valence band 각각의 effective rigid shift를 정의해서 다음과 같은 방법으로 계산하였다; 즉, 불순물이 완전히 이온화된다는 가정하에서 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$N_d \cong n_o = \int_{cb}\frac{\rho_c(E)\,dE}{1+\exp\left(\frac{E-E_F}{K_BT}\right)}, \quad (7)$$

$$p_o = \int_{vb}\frac{\rho_v(E)\,dE}{1+\exp\left(\frac{E_F-E}{K_BT}\right)} \quad (8)$$

이때 K_B는 Boltzmann 상수, T는 절대온도를 나타내고, $\rho_c(E)$와 $\rho_v(E)$는 불순물밴드를 고려하지 않았을 때에는 각각 (4)로 표현된 전도대와 가전자대의 상태밀도이고, 불순물밴드를 고려했을 때에는 (4)와 (6)의 envelope으로 취한다. 한편 불순물이 강하게 도핑된 반도체에서의 rigid parabolic band model[16]로 부터 n^+형 반도체에서의 전자와 정공의 농도는 각각 다음과 같다.

$$n_o = N_C F_{\frac{1}{2}}\left(\frac{E_F-E_c}{K_BT}\right) \quad (9)$$

$$p_o = N_v\exp\left(\frac{E_v-E_F}{K_BT}\right) \quad (10)$$

(9) 식에서 $F_{\frac{1}{2}}$은 order가 1/2인 Fermi-Dirac 적분을 나타낸다. 이때, (7)과 (9)로 부터 구한 E_c는 effective parabolic band edge $E_{c,eff}$로 정의되어, 전도대의 effective rigid shift는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\triangle E_c^{eff} = E_{co} - E_{c,eff} \quad (11)$$

여기서, E_{co}는 교란되지 않은 conduction band edge를 나타낸다. 같은 방법으로 (8)과 (10)으로부터 effective parabolic valence band edge를 얻을 수 있고, 가전자대의 effective rigid shift는 다음과 같은 식으로 된다.

$$\triangle E_V^{eff} = E_{v,eff} - E_{vo} \quad (12)$$

(12)에서의 E_{vo}는 교란되지 않은 가전자대의 edge를 나타낸다. 그러나 이와같은 방법으로 얻은 $\triangle E_c^{eff}$와 $\triangle E_v^{eff}$는 전도대와 가전자대의 실질적인 이동이 아니라, 불순물의 무질서한 분포에 의해서 생기는 band distortion의 수학적인 표현에 불과하다.

그런데 불순물이 강하게 도핑된 반도체에서의 캐리어전송을 기술할 때에는 사실상 rigid parabolic band model을 사용하고, 디바이스에서의 p-n적이나 전류값을 측정해서 에너지갭의 감소를 결정할 때에도 이 모델로부터의 관계식을 사용하므로, 이렇게 추출한 에너지갭의 감소는 실효값(effective value)으로 볼 수 있다. 그러므로, 이를 실효 에너지갭의 감소(effective energy-gap narrowing) 또는 전기적 에너지갭의 감소(electrical energy-gap narrowing)라고 한다.[3] 여기에는 앞서서 기술한 입자들간의 상호작용에 의한 에

너지갭의 감소가 포함되어 나타나기 때문에[3,7] 전기적 에너지갭의 감소는 다음과 같이 된다.

$$\triangle E_g^{el} = \triangle E_c^{mb} + \triangle E_v^{mb} + \triangle E_c^{eff} + \triangle E_v^{eff} \quad (13)$$

위의 방법에 의한 계산시, 불순물밴드의 효과를 고려했을 때의 전기적 에너지갭의 감소가 이를 무시했을 때의 값과 별 차이가 없었다. 또한 불순물밴드의 효과를 고려하면 도핑농도가 증가함에 따라서 Fermi level이 에너지갭내에서 포화되고 고려치 않았을 때에는 가전자대로 들어갔는데, 불순물밴드를 고려할 때 Fermi level이 포화되는 이유는 상태밀도를 앞서서 기술한 것처럼 자유캐리어의 상태밀도와 불순물밴드의 상태밀도의 envelope으로 취해서 국소화된 불순물밴드의 상태들이 마치 비국소화된 상태처럼 전자에 의해서 차지되는 것으로 해석되기 때문이다. 이는 실험적으로 알려진 사실과 일치하지 않는다. 실험으로부터 알려진 사실은 불순물이 강하게 도핑된 반도체에서 대부분의 전자들은 비국소화되어 불순물밴드의 국소화된 상태들을 차지하지 않는다는 것을 나타내고 있다. 위의 두 가지 사실을 고려하면, Lee와 Fossum이 주장한 것처럼 불순물밴드의 효과를 무시해도 좋으리라고 생각된다.

$\triangle E_g^{el}$의 계산과정시, $E_{c_{eff}}$와 $E_{v_{eff}}$는 그림2의 흐름도와 같이 self-consistent method에 의해서 계산하였다. 이러한 방법으로 modeling한 결과는 그림3에 제시되어 있다. 이 그림에서 곡선(A)는 계산결과를 least square method에 의해서 (14)와 같은 식으로 fitting한 것이다.

$$\triangle E_g^{el} = 12.445[\text{meV}] \times (N_d/10^{17})^{0.38424} \quad (14)$$

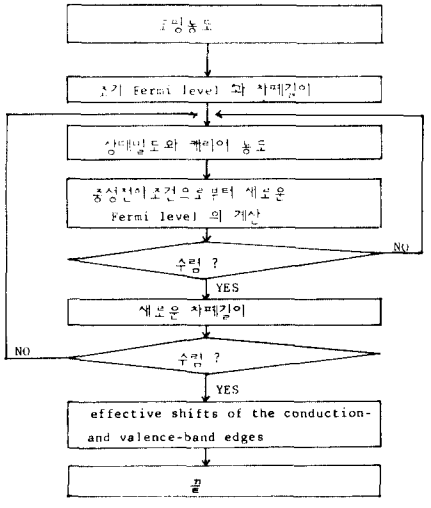

그림 2. Self-consistent Method에 의해서 $E_{c_{eff}}$와 $E_{v_{eff}}$를 계산하는 흐름도

Fig. 2. Flow Chart to Calculate $E_{c_{eff}}$ and $E_{v_{eff}}$ by Self-consistent method.

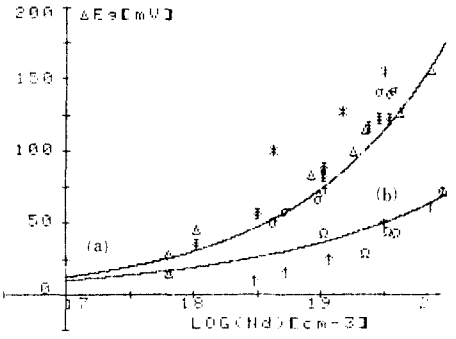

그림 3. 에너지갭의 감소
(a)와 (b)는 각각 전기적 에너지갭의 감소와 광학적 에너지갭의 감소를 modeling한 결과이다. 각각의 실험값은 Lee와 Fossum의 논문에서 인용한 것이다. Neugroschel, Etc. (*), Van Meerbergen, etc. (∧), Mertens, Etc. (σ), Lanyon, Etc. (Φ), Tang(△)은 전기적으로 측정된 에너지갭의 감소이고, Schmid (↑)와 Balkanski, etc. (Ω)은 광학적으로 측정된 에너지갭의 감소이다.

Fig. 3. Energy Gap Narrowing (a) and (b) Represent the Modeling Results of the Electrical and Optical Energy Gap Narrowings. Experimental Results are Referenced to Lee and Fossum's Paper. They are the Electrically Measured Energy Gap Narrowings; Neugroschel, Ect. (*), Van Meerbergen, Etc. (∧), Mertens, Etc. (σ), Lanyon, Etc, (Φ), and Tang(△) and the Optically Measured Energy Gap Narrowings; Schmid(↑) and Balkanski, Etc. (Ω).

2. 이동도

이동도는 불순물 도핑농도와 전계 및 온도의 함수이다. 이동도에 영향을 미치는 산란체계(scattering mechanism)에는 격자산란, 이온화된 불순물산란, 중성 불순물산란과 캐리어-캐리어 산란등이 있다. 불순물을 강하게 도핑시켰을 때에는 이들 산란체계중에서 이온화된 불순물산란과 캐리어-캐리어 산란이 이동도의 변화에 많은 영향을 준다는 것은 쉽게 알아낼 수 있는 사실이다.

불순물을 강하게 도핑시킨 경우에 위와 같은 사실을 고려한 다수캐리어 이동도에 대해서는 많은 모델들이 제시되어 있다.[8,9] 그러므로 본 논문에서는 소수캐리어 이동도 모델만을 취급하기로 하고, 특히 통상의 devic simulation시의 가정에 대한 논의에 주안점을 두겠다.

불순물의 도핑농도가 낮은 경우를 취급하는 통상의 device simulation에서는 다수캐리어 이동도(예를 들면, p형 반도체에서의 정공의 이동도)와 소수캐리어

이동도(예를 들면, n형 반도체에서의 정공의 이동도)는 같다고 가정된다. 그러나 이러한 가정은 불순물의 도핑농도가 큰 경우에서는 타당하지 않다. 이 사실에 대한 이유로써 아래와 같은 두 가지의 물리적인 현상을 들 수 있다.

(a) 캐리어와 불순물 이온간의 산란

정공과 불순물이온과의 산란시, p형 silicon 에서는 attractive potential이 작용하지만, n형 silicon에서는 크기는 같지만 방향이 반대인 repulsive potential이 작용한다. 일반적으로 repulsive potential이 같은 크기의 attractive potential보다 캐리어를 덜 산란시키므로, 이러한 경우에서는 다수캐리어일 때의 정공의 이동도가 소수캐리어일 때의 정공의 이동도보다 더 작게 된다.

(b) Band tail의 trapping center로서의 역할

Fermi level의 위치를 고려해 보면, 다수캐리어들은 band tail에 의해서 심각하게 영향을 받지 않지만, 소수캐리어들은 상당한 영향을 받는다.[10] 이 band tail은 소수캐리어에 대한 trapping center로서 작용할 수 있으므로, 이러한 경우에서는 소수캐리어일 때의 정공의 이동도가 다수캐리어일 때의 정공의 이동도보다 더 작게 된다.

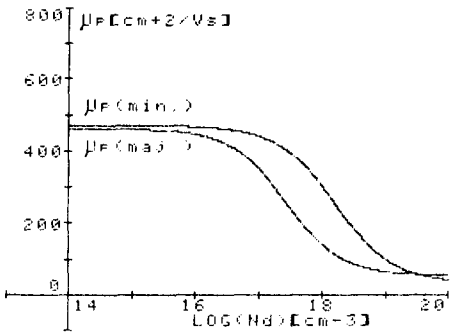

그림 4. 정공의 이동도 μ_P(maj.)와 μ_P(min.)는 각각 다수캐리어일 때와 소수 캐리어일 때의 정공의 이동도를 나타낸다.

Fig. 4. Hole Mobility μ_P(maj.) and μ_P(min.) Represents the Majority and Minority Hole Mobility, Respectively.

소수캐리어일 때의 정공의 이동도를 modeling하기 위해서는 위에서 기술한 두 가지 현상이 이동도에 얼마나 영향을 미치는가를 정량적으로 밝혀주는 이론이 필요하다. 그러나 이러한 이론은 아직까지 제시되지 못했고, 다만 알려진 사실은 도핑농도가 증가함에 따라서 처음에는 (a)의 현상이 우세하고 그 다음에는 (b)의 현상이 우세하게 된다는 것이다. 그래서 본 논문에서는 Burk와 de la Torre[11]가 실험결과를 fitting해서 얻은 이동도 모델을 사용할 것을 제안한다. 이 모델을 택한 이유는 그림 4 로 부터 알 수 있는 것과 같이 다수캐리어일 때의 정공의 이동도를 나타내는 Arora 등의 모델[8]과 비교했을 때, 이 모델이 (a)와 (b)의 현상을 잘 나타내주기 때문이다. 이 모델을 사용한 소수캐리어일 때의 정공의 이동도는 불순물 도핑농도의 함수로써 다음과 같다.

$$\mu_{P(min.)}=33.04+\frac{(470.5-33.04)}{1+\left(\frac{N_a}{1.63\times10^{18}}\right)^{0.9994}}-\frac{4775}{1+\left(\frac{1.29\times10^{23}}{N_a}\right)^{0.7473}} \tag{14}$$

그림 4 에서는 (14)식의 결과와 Arora등이 제시한 다수캐리어일 때의 정공의 이동도가 비교되어 있다. 이 그림에서 교차점의 N_a는 약 $3\times10^{19}/cm^3$이고, 이는 반도체가 축퇴되기 시작하는 농도이다. 이 값을 경계로 (a)와 (b)의 현상이 나타남을 알 수 있고, 이 비교로부터 위에서 언급한 가정은 불순물을 강하게 도핑시킨 device의 simulation 시에는 타당치 못함이 다시 확증된다.

3. 재결합율과 생존시간

불순물의 도핑농도가 낮은 경우를 취급하는 기존의 반도체이론에서는 SRH(Shockley-Read-Hall) 재결합 모델을 사용하여 디바이스를 해석하였지만, 불순물의 도핑농도가 큰 경우에서는 방출된 에너지를 다른 자유캐리어에게 전달하는 재결합과정인 Auger 재결합이 우세하므로 이를 고려하여 device를 해석하여야만 한다.

SRH 재결합모델에 의하면 재결합율은

$$R_{SRH}=\frac{(pn-n_i^2)}{\tau_P^{SRH}(n+n_1)+\tau_n^{SRH}(p+p_1)} \tag{15}$$

(15)에서 전자와 정공의 생존시간 τ_n^{SRH}와 τ_P^{SRH}는 각각

$$\tau_n^{SRH}=\frac{1}{\sigma_n V_{th} N_t},\qquad \tau_P^{SRH}=\frac{1}{\sigma_P V_{th} N_t} \tag{16}$$

(16)에서 σ_n과 σ_P는 각각 전자와 정공의 capture cross-section, V_{th}는 thermal velocity, N_t는 trap의 농도를 나타낸다. (16)식에서 N_t가 도핑농도의 함수가 아니라면, τ_n^{SRH}와 τ_P^{SRH}도 역시 도핑농도의 함수가 아니다. 그러나 도핑농도가 커짐에 따라서 불순물에 의한 또 다른 recombination center가 생길 수 있고, 이를 고려하면 생존시간은 각각 아래와 같이 된다.[12]

$$\tau_n^{SRH}=\frac{\tau_{n0}}{1+\frac{N_d+N_a}{N_n^{ref}}},\quad \tau_P^{SRH}=\frac{\tau_{P0}}{1+\frac{N_d+N_a}{N_P^{ref}}} \tag{17}$$

여기서 τ_{n0}, τ_{P0}, N_n^{ref}와 N_P^{ref}는 각각 상수로서[12]로부

터 취했다.

불순물이 강하게 도핑된 경우의 Auger 생존시간에 대해서는 Dziewior와 Schmid[13]의 측정결과로 부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\tau_n^{AU} = \frac{1}{C_{ehh} N_a^2}, \quad \tau_P^{AU} = \frac{1}{C_{eeh} N_d^2} \tag{18}$$

여기서 C_{eeh}와 C_{ehh}는 Auger 계수를 나타내고, 표 1에 주어져 있다. 한편 이때의 Auger 재결합율은 다음과 같다.

$$R_{AU} = (pn - n_i^2)[C_{eeh} \cdot n + C_{ehh} \cdot p]$$

표 1. Auger 계수[13]
Table 1. Auger Coefficients[13]

온도[K]	:	C_{ehh}[cm^{6}s^{-1}]	:	C_{eeh}[cm^{6}s^{-1}]
77	:	7.8×10^{-32}	:	2.3×10^{-31}
300	:	9.9×10^{-32}	:	2.8×10^{-31}
400	:	1.2×10^{-31}	:	2.8×10^{-31}

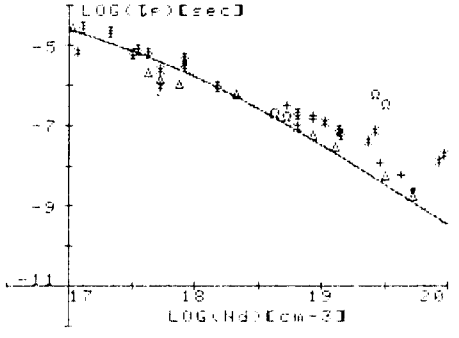

그림 5. 정공의 생존시간 곡선은 모델링한 결과이고, 실험값은 Fossum과 Mertens 등의 논문[14]에서 인용했다: Dziewior and Schmid(△), Beck and Conradt(Φ), Wieder(+), Iles, etc. (*), Mertens, Etc. (Ω)

Fig. 5. Hole Lifetime The Curve is the Modeling Result, and Experimental Results are Referenced to the Paper of Fossum and Mertens, Etc.[14];Dziewior and Schmid(△), Beck and Conradt(Φ), Wieder(+), Iles, Etc.(*), Mertens, Etc. (Ω).

본 논문에서는 SRH 재결합과 Auger 재결합을 모두 고려하여, 불순물이 강하게 도핑된 반도체에서의 재결합율과 생존시간에 대해서 다음과 같은 모델을 제시한다. 전자와 정공에 대한 생존시간을 각각 τ_n과 τ_P라 하면,

$$\tau_n^{-1} = (\tau_n^{SRH})^{-1} + (\tau_n^{AU})^{-1}, \quad \tau_P^{-1} = (\tau_P^{SRH})^{-1} + (\tau_P^{AU})^{-1} \tag{20}$$

또한 재결합율 R은

$$R = R_{SRH} + R_{AU} = (pn - n_{ie}^2)\left[\frac{1}{\tau_P(n+n_1) + \tau_n(p+p_1)} + C_{eeh} \cdot n + C_{ehh} \cdot p\right] \tag{21}$$

(21)식에서 n_{ie}는 실효 진성농도(effective intrinsic concentration)로서 에너지갭의 감소와 Fermi-Dirac 통계학을 고려한 평형상태에서의 전자와 정공의 농도의 곱을 나타낸다.[3] 즉,

$$n_{ie}^2 \equiv n_o p_o = n_i^2 \exp\left(\frac{\triangle E_g^{el}}{K_B T}\right)\left|\frac{F_{\frac{1}{2}}\left(\frac{E_F - E_C}{K_B T}\right)}{\exp\left(\frac{E_F - E_C}{K_B T}\right)}\right| \tag{22}$$

여기서 n_i은 진성 캐리어농도, $\triangle E_g^{el}$는 (13)의 전기적 에너지갭의 감소이다. 그림 5 에서는 본 논문에서 modeling 한 정공의 생존시간이 나타나 있는데 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다.

Ⅲ. 강한 불순물 도핑효과의 N$^+$-P 태양전지에의 응용

1. 에미터(n$^+$영역)에서의 소수캐리어 전송방정식의 유도와 경계조건

디바이스를 해석하는데 사용하는 기본적인 정공의 방정식들은 다음과 같다.

- 정공의 전류방정식

$$J_P = -q\mu_P p \frac{d\phi_P}{dx}, \tag{23}$$

- 정공의 연속방정식

$$\frac{dJ_P}{dx} = q(G - R), \tag{24}$$

- 정공의 농도관계식

$$p = p_o \exp\left(\frac{q\phi_P}{K_B T}\right) \tag{25}$$

(23)-(25)에서 ϕ_P는 전자의 quasi-Fermi level을 0으로 했을 때의 정공의 quasi-Fermi level, p_o는 평형상태의 정공의 농도, G는 정공의 생성율(generation rate), R은 정공의 재결합율을 나타낸다.

Quasi-neutrality 조건과 불순물이 완전히 이온화된다는 가정하에서 평형상태에서의 전자와 정공의 농도의 곱은 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$n_{ie}^2(x) \equiv p_o(x) \cdot n_o(x) = p_o(x)\, N_d(x) \tag{26}$$

여기에서 effective doping concentration을 $N_{deff} \equiv (n_i^2/n_{ie}^2) N_d$로 정의하면 다음식을 얻는다.

$$p_o(x)\, N_{deff}(x) = n_i^2 \tag{27}$$

(25)와 (27)을 함께 풀어서 미분하면,

$$\frac{d(pN_{deff})}{dx} = pN_{deff} \frac{q}{K_B T} \cdot \frac{d\phi_P}{dx} \tag{28}$$

(28)을 (23)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$J_P = -\frac{qD_P}{N_{deff}} \cdot \frac{d(pN_{deff})}{dx} \quad (29)$$

Low-level injection하에서 (24)는 아래와 같은 식으로 줄여 쓸 수 있다.

$$\frac{dJ_P}{dx} = q\left(G - \frac{p-p_o}{\tau_P}\right) \quad (30)$$

다시 임의의 변수y를 $y=(p-p_o)\,N_{deff}$로 정의하여 사용하면 (29)와 (30)은 각각 다음과 같은 식으로 된다.

$$J_P = -\frac{qD_P}{N_{deff}}\frac{dy}{dx} \quad (31)$$

$$\frac{dJ_P}{dx} = q\left(G - \frac{y}{\tau_P N_{deff}}\right) \quad (32)$$

이때 (31)을 (32)에 대입하면 아래와 같은 비선형의 이차 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{d}{dx}\left[\ln\left(\frac{D_P}{N_{deff}}\right)\right]\frac{dy}{dx} - \frac{y}{\tau_P D_P} = -G\left(\frac{N_{deff}}{D_P}\right) \quad (33)$$

(33)은 결국 n^+영역(에미터)에서의 강한 도핑의 효과를 고려한 정공의 전송방정식을 나타낸다.

경계조건으로서 먼저 에미터의 표면($x=W_E$)에서는

$$D_P\frac{dy}{dx}\Big|_{x=W_E} + S_P y(W_E) = 0 \quad (34)$$

여기서 D_P는 정공의 확산계수이고, S_P는 정공의 표면재결합속도, w_E는 에미터의 폭을 나타낸다. 한편 에미터 접합($x=0$)에서는

$$y(0) = n_i^2\left[\exp\left(\frac{qV}{K_BT}\right) - 1\right] \quad (35)$$

이때 V는 인가한 전압을 나타낸다. 식(33)을 푸는 목적은 역방향포화전류를 얻기 위한 것이므로 본 논문에서는 생성율G를 zero로 가정하였다.

2. 에미터 설계파라메터에 대한 정공의 포화전류밀도 계산

에미터 설계파라메터를 입력으로 해서, 앞에서 유도한 정공의 전송방정식 (33)을 경계조건 (34)와 (35)에 따라서 수치적 방법으로 계산함으로써, 에미터 설계파라메터에 대한 정공의 포화전류밀도의 관계를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 에미터설계 파라메터로서 에미터 표면에서의 불순물농도(N_S)와 재결합속도(S_P) 및 에미터의 폭(W_E)을 사용했다. 이때 해석하고자 하는 n^+-p 태양전지의 구조는 그림6에 나타나 있다. 에미터에서의 불순물 doping profile은 아래와 같은 식으로 가정하였고

$$N_d(x) = N_s\exp\left[-\left(\frac{W_E-x}{2L}\right)^2\right] \quad (36)$$

Base 영역은 균일하게 도핑($N_B=5\times10^{17}/cm^3$) 되었다고 가정하였다. 여기에서 L은 donor 확산길이의 1/2이다.

에미터설계에 있어서의 변화가 베이스의 포화전류에 미치는 영향은 작고 단락전류에도 크게 영향을 미치지 않기 때문에,[15] 에미터에서의 정공의 포화전류밀도 만 알 수 있다면 에미터 설계 파라메터에 대한 개방전압의 관계는 쉽게 알 수 있다. 이때 개방전압의 관계식은

$$V_{oc} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{J_{sc}}{J_{p_o}+J_{n_o}} + 1\right) \quad (37)$$

계산을 간단히 하기 위해서, 단락전류 밀도 J_{sc}는 실험값($J_{sc}=23mA/cm^2$)[16] 을 사용하였고, base에서의 포화전류밀도 J_{no}는 long-base diode theory에 의한 다음과 같은 관계식으로부터 구했다.

$$J_{no} = (qn_i^2/N_B)\,(\bar{D}_n/\bar{\tau}_n)^{\frac{1}{2}} \quad (38)$$

$\bar{D}_n=9.7cm^2/sec$, $\bar{\tau}_n=5.5\mu sec$를 사용했을 때 (38)에 의해서 계산된 J_{no} 값은 $9.574\times10^{-14}\,A/cm^2$이다.

에미터에서의 포화전류밀도(즉, 개방전압)를 계산하기 위해서 경계조건 (34)와 (35)에 따라서 (33)의 해를 수치적 방법으로 구했다. 이를 위하여 본 논문에서 작성한 컴퓨터 프로그램의 흐름도는 그림7과 같다.

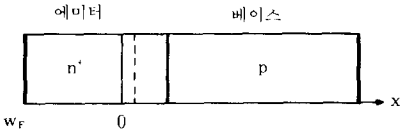

그림 6. n^+-p태양전지의 구조
Fig. 6. Device Structure of n^+-p Solar cell.

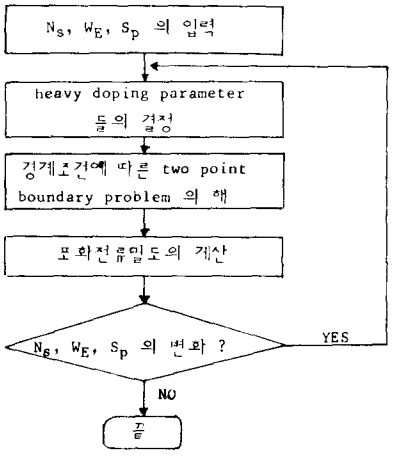

그림 7. 에미터의 포화전류밀도를 계산하기 위한 흐름도
Fig. 7. Flow Chart to Calculate the Emitter Saturation Current.

3. 결과의 해석

(1) W_E에 대한 V_{oc}의 관계

그림 8 은 $N_s=10^{19}/cm^3$일 때 S_P를 파라메터로 사용해서 계산한 W_E에 대한 V_{oc}의 관계를 보여주고 있다. $W_E<0.4\mu m$일 때 V_{oc}는 S_P의 값에 따라서 상당히 민감하게 변화함을 알 수 있는데, 이러한 결과는 이 조건하에서 에미터에 주입된 소수캐리어가 대부분이 에미터표면에 도달해서 표면재결합을 하게 됨을 나타낸다. 그러나 $W_E>0.5\mu m$일 때는 V_{oc}가 S_P에 따라서 별로 변하지 않고, 이것은 W_E가 클 때는 소수캐리어가 대부분 에미터내에서 재결합한다는 사실과 일치한다. 그림 8 에서 얻을 수 있는 중요한 결과는 V_{oc}를 크게 하려면 S_P를 작게 해야한다는 것이다.

(2) N_s에 대한 V_{oc}의 관계

S_P를 파라메터로 사용해서 N_s에 대한 V_{oc}의 계산된 결과는 그림 9 와 같다. 결과적으로 V_{oc}는 N_s가 작고 S_P가 작을 때 가장 크다. 또한 N_s가 작을 때 V_{oc}는 S_P에 따라서 많이 변하는데, 이것은 N_s가 작을 때 캐리어의 생존시간이 길어져서 표면재결합에 의해서 V_{oc}가 결정되기 때문이다.

(3) S_P에 대한 V_{oc}의 관계

그림10에는 일정한 W_E와 N_s에 대하여 S_P에 대한 V_{oc}의 관계가 나타나 있다. $S_P<10^3$cm/sec 일 때 V_{oc}는 거의 변하지 않고, $S_P>10^3$cm/sec 일때는 S_P가 증가함에 따라서 V_{oc}는 감소하다가 거의 변하지 않게 된다. 한편 이와같은 조건에 대해서 강한도핑의 효과를 고려하지 않고 Moll과 Ross[17]의 모델을 사용해서 계산한 V_{oc}의 값은 672.8mV(이때, $\bar{D}_P=1\,cm^2/sec$)이다. 이와 같은 결과로써 강한 도핑의 효과를 고려하면 이 효과를 고려하지 않았을 때보다 V_{oc}가 약 10~13% 작게되어, 강한 불순물도핑의 효과가 태양전지의 효율에 제한을 가한다는 사실을 입증할 수 있다.

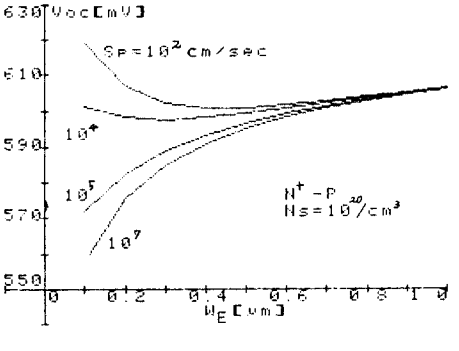

그림 8. W_E에 대한 V_{oc}의 관계
Fig. 8. The Dependence of V_{oc} on W_E.

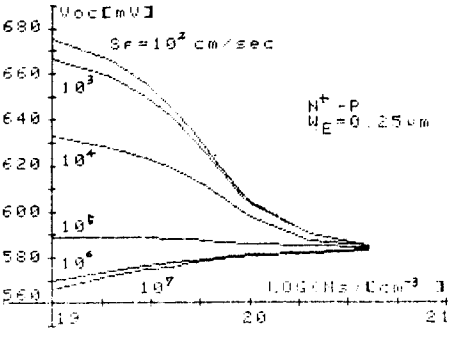

그림 9. N_s에 대한 V_{oc}의 관계
Fig. 9. The Dependence of V_{oc} on N_s.

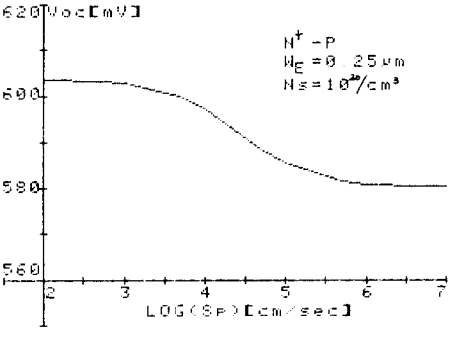

그림10. S_P에 대한 V_{oc}의 관계
Fig. 10. The Dependence of V_{oc} on S_P.

4. 실험결과와의 비교

현재 사용하고 있는 대부분의 태양전지는 N_s가 $10^{19}/cm^3$이상, W_E가 $1\mu m$ 보다도 작은 강하게 도핑된 n^+영역을 가지고 있다. 이러한 태양전지로부터 측정한 실험결과는 표 2 에 제시되어 있다.

표 2 로부터 에미터표면에 SiO_2의 얇은 막을 입히면 V_{oc}가 증가함을 알 수 있는데, 이는 SiO_2로 인하여 에미터 표면의 재결합속도가 감소되기 때문이다. 이 측정결과는 그림 4, 5, 6 의 계산결과와 잘 일치한다. 또한 측정된 V_{oc}의 범위는 앞서서 제시한 계산결과의 범위와 일치함을 알 수 있다.

표 2. V_{oc}의 실험결과[16]
Table 2. The Experimental Result[16].

디바이스 구조	(V_{oc}) without SiO_2	(V_{oc}) with SiO_2
n^+-p(diffused)	596 [mV]	605 [mV]
n^+-n-p HLE	599	619
n^+-p(implanted)	625	644
n^+-n-p BSF	594	626

Ⅳ. 결론 및 검토

본 논문에서는 실리콘에 불순물을 강하게 도핑시켰을 때 일어나는 현상인 강한 도핑의 효과를 조사하였고, 이를 n^+-p 태양전지에 응용하여 에미터의 설계파라메터에 대한 개방전압의 관계를 연구하였다.

먼저 강한 도핑의 효과를 고려하여 heavy doping parameter들을 도핑농도의 함수로써 modeling한 결과 실험값과 잘 일치하는 모델을 얻을 수 있었는데, 이 모델들은 다른 실리콘 디바이스의 simulation시에도 사용할 수 있으리라고 생각된다. 그리고 강한 도핑효과의 디바이스에 대한 응용으로써, 강한 도핑의 효과를 고려하여 에미터에서의 소수캐리어 전송방정식을 유도한 후, 이 식을 수치적으로 풀어서, 에미터의 설계파라메터와 개방전압과의 관계를 조사하였다.

이 연구의 결과로써 에미터표면의 재결합속도가 개방전압에 상당한 영향을 미친다는 것이 밝혀졌는데, 이 사실은 실험적인 결과와 잘 일치하였다. 결과적으로 표면 재결합속도를 작게 함으로써 태양전지의 개방전압 즉, 효율을 크게 할 수 있다. 본 논문에서 계산한 개방전압의 최대값은 에미터폭이 0.25μm, 표면농도가 10^{19} /cm^3, 표면 재결합속도가 100cm/sec 일 때의 675mV이다. 또한 강한도핑의 효과로 인하여 개방전압이 이 효과를 고려하지 않았을 때의 값보다 10~13% 감소해서, 강한 도핑효과가 태양전지의 개방전압에 제한을 가한다는 사실을 입증할 수 있었다.

參 考 文 獻

[1] R.A. Aram, G.J. Rees, and B.L.H. Wilson, "Heavily doped semiconductors and devices," *Adv. in Phys.*, vol. 27, pp. 799-892, 1978.

[2] R.P. Merters, R.J. van Overstraeten, and H.J. deMan, "Heavy doping effects in Silicon," *Adv. in Electronics and Electron Physics,* vol. 55, pp. 77-118, 1980.

[3] D.S. Lee and J.G. Fossum, "Energy-band distortion in highly doped silicon," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-30, pp. 626-634, 1983.

[4] E.O. Kane, "Thomas-Fermi approach to impure semiconductor band structure," *Phys. Rev.*, vol. 131, pp. 79-88, 1963.

[5] T.N. Morgan, "Broadening of impurity bands in heavily doped semiconductors," *Phys. Rev.*, vol. 139, pp. A343-A348, 1965.

[6] A.H. Marshak, M.A. Shibib, J.G. Fossum, and F.A. Lindholm, "Rigid band analysis of heavily doped semiconductor devices," *IEEE Trans. Electron Devices* vol. ED-28, pp. 298-298, 1981.

[7] J.A. del Alamo, R.M. Swanson, and A. Lietoila, "The discrepancy between optical and electrical measurement," *Solid-State Electron.*, vol. 26, pp. 483-489, 1983.

[8] N.D. Arora, J.R. Hauser, and D.J. Roulston, "Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature," *IEEE Trans. Electron Devices,* vol. ED-29, pp. 292-295, 1982.

[9] S.S. Li and W.R. Thurber, "The dopant density and temperature dependence of electron mobility and resistivity in n-type silicon," Solid-State Electron., vol. 20, pp. 609-616, 1977.

[10] A. Neugroschel and F.A. Lindholm, "Evidence for low diffusivity and mobility of minority carriers in highly doped Si and interpretation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 42, pp. 176-178, 1983.

[11] D.E. Burk and V. de la Torre, "A empirical fit to minority hole mobilities," *IEEE Trans. Electron Devices Lett.*, vol. EDL-5, pp. 231-233, 1984.

[12] J.G. Fossum, "Computer-aided numerical analysis of silicon solar cells," *Solid-State Electron.*, vol. 19, pp. 289-277, 1976.

[13] J. Dziewior and W. Schmid, "Auger coefficients for highly doped and highly excited silicon," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 31, pp. 346-348, 1977.

[14] J.G. Fossum, R.P. Mertens, D.S. Lee and J.F. Nijs, "Carrier recombination and lifetime in highly doped silicon," *Solid-State Electron.*, vol. 26, pp. 569-576, 1983.

[15] M.A. Shibib, "Device physics for engineering design of heavily doped regions in pn-junction silicon solar cells," Ph.D. diesertation University of Florida, *Gainesville,* 1979.

[16] J.G. Fossum, F.A. Lindholm, and M.A. Shibib, "The importance of surface recombination and energy-gap narrowing in p-n junction silicon solar cells," *IEEE Trans. Electron Devices,* vol. ED-26, pp. 1294-1298, 1979.

[17] J.L. Moll and I.M. Ross, "The dependence of transistor parameters on the distribution of base layer resistivity," *Proc. of the IRE,* vol., pp. 72-78, 1956. *