

# 다결정 실리콘 n<sup>+</sup> -p 태양전지의 Computer Model (A Computer Model for Polycrystalline Silicon n<sup>+</sup> -p Solar Cells)

鄭 鎬 宣\*  
(Chung, Ho Sun)

## 요 약

두께가 30 $\mu$ m인 다결정 실리콘 p-n 접합 태양전지의 삼차원적인 반송자 분포, 양자효율 및 변환효율(AMI)을 계산하였다. 다결정 및 단결정 실리콘 태양전지의 양자효율이 비교되었다. Grain 크기가 각각 5 $\mu$ m, 100 $\mu$ m인 전지의 효율은 6%, 12%로 계산되었다.

## Abstract

Numerical calculations have been made of the effect of grain size on the three-dimensional carrier density, the quantum efficiency, and the AMI efficiency of 30 $\mu$ m polycrystalline silicon p-n junction solar cells. Quantum efficiencies calculated for the polycrystalline silicon solar cells are compared to the monocrystalline cases.

An efficiency of 12% can theoretically be obtained with grain size 100 $\mu$ m, and 6% for 5 $\mu$ m grains.

## 1. 서 론

값이 싼 태양전지를 개발하기 위해서 리본형의 단결정 실리콘<sup>[1]</sup>이나 다결정 실리콘에<sup>[2-4]</sup> 관한 많은 연구가 있었다. 다결정 소자들을 이용한 경우 화학적 순도가 충분하고, 각 grain들의 크기가 확산 길이 (diffusion length)보다 크다고 가정하면 단결정 소자들과 비교해서 거의 비슷한 효율을 얻을 수 있다. 또한 단결정을 얻기 위한 여러 공정들을 생략할 수 있다.

다결정 실리콘의 p-n 접합형 태양전지에 관해서 일차원<sup>[5]</sup> 혹은 이차원<sup>[1]</sup>적인 모델이 이용되어 각 grain<sup>[6]</sup>의 크기에 대한 효율이 계산되었다. 또한, C. LANZA 등은 다결정 Si, GaAs Schottky 적합 태양전지에 대

한 삼차원적인 효율을 계산하였다.

본 논문에서는 다결정 실리콘의 기본 이론을 설명하고 다결정 실리콘의 p-n 접합 태양전지의 효율을 계산하기 위하여 grain을 원기둥형의 model로 가정하고 삼차원적인 소수 반송자의 분포를 계산 하고자 한다. 이 반송자의 분포로부터 grain의 크기에 따른 양자효율 및 변환효율을 계산하고 단결정 태양전지의 결과와 비교, 검토하고자 한다.

## 2. 다결정 태양전지의 기본이론

다결정 반도체는 단결정과는 달리 grain과 grain들이 서로 연결 되어 있다. 만일 다결정 실리콘 p-n 접합이 그림 1과 같이 섬유조직 처럼 결정되어 있다면 grain 경계는 표면에 수직으로 되어 있고, 각 grain 내에서 소수 반송자들은 접합에 도달할 수 있다. 따라서, 이 접합형 태양전지는 각각의 작은 grain들이 병렬로 연결된 것처럼 생각할 수 있다. 이 작은 태양전

\* 正會員, 慶北大學校 工科大學 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Kyung-Pook National Univ.)  
接受日字: 1981年 11月 30日

지 (grain) 들은 단결정 태양전지처럼 동작하나 일부 소수 반송자는 grain 경계에서 재결합하며, 다수 반송자는 이 grain 경계를 통과 하는데 장애를 받는다. 다시 말하면, grain 경계는 다수 반송자에 대해서는 비선형 저항과 같고, 소수 반송자에 대해서는 재결합 center 가 된다. 따라서, 작은 grain 들에 대한 유효 확산거리는 다음 식으로 표시된다.<sup>9</sup>

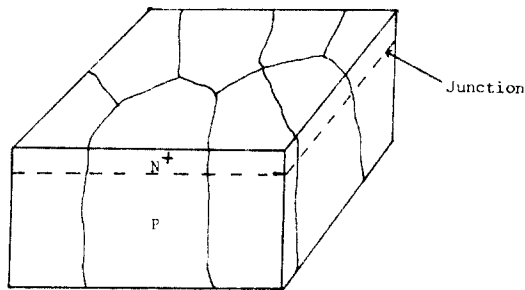
$$\frac{1}{L_n^*} = \frac{1}{L_n^2} + \frac{4\pi^2}{(W-2x)^2} \quad (1)$$

$L_n^*$  : 유효 확산거리

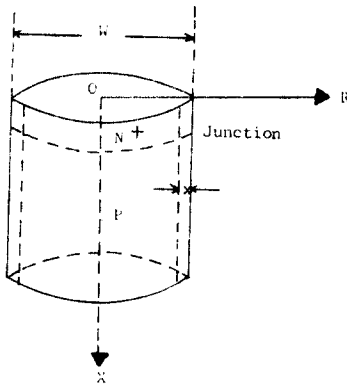
$L_n$  : 단결정에 대한 확산거리

$W$  : grain 의 크기

$x$  : grain 경계에서의 공간 전하 영역의 길이



(a)



(b)

그림 1. 섬유구조적으로 된 단결정 실리콘 태양전지

(a) 단결정 실리콘 전지

(b) 이론적인 model

Fig. 1. Polycrystalline silicon solar cell with fibrous orientation.

(a) polycrystalline silicon cell

(b) model of the grain

그림 2 는 grain 경계에 대한 공간 전하영역의 N-energy diagram 을 보여 주고 있다. Grain 경계에서의 원자 배열은 불규칙적이어서 적자 결합들이 존재하여 interface state 가 존재한다. 이 경계 영역에서 재결합 속도와 재결합 전류는 다음 식으로 표시된다.

$$J_r = q S(O) (p(o) - \bar{p}) \quad (2)$$

$$\text{단, } S(O) = \frac{1}{2} N_{is} \sigma V_{th} (E_m - E_{fp})$$

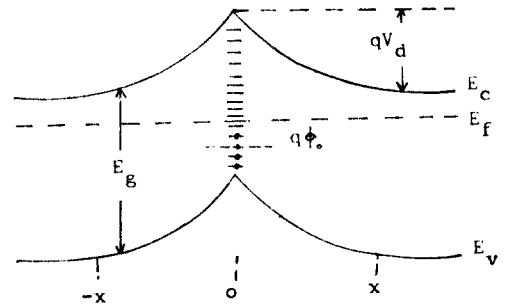
$S(O)$  : 재결합 속도

$N_{is}$  : interface state

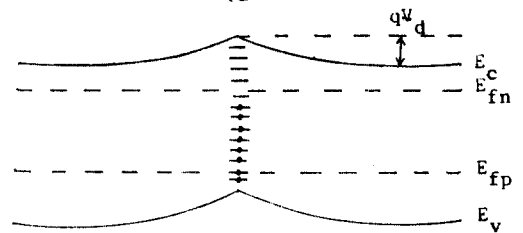
$\sigma$  : 전도도

$V_{th}$  : thermal velocity

$E_{fn}, E_{fp}$  : 준 페르미 에너지 준위



(a)



(b)

그림 2. Grain 경계에서의 energy diagram

(a) 빛을 쬐이지 않았을 경우

(b) 빛을 쬐었을 경우

Fig. 2. Energy diagram of the grain boundary.

(a) in dark

(b) in light

이 grain 경계의 영향으로 인해서 단결정 태양전지의 광전류 (photocurrent) 는 줄어 들고 암전류 (dark-current) 는 증가하며, 또한 병렬저항은 감소 되고, 직렬 저항은 증가하여 변환효율이 감소된다.

### 3. Simulation

다결정 실리콘의 p-n 접합형 태양전지의 변환효율을 계산하기 위해서 그림 3 과 같이 하나의 grain을 원통형으로 가정하고 emitter, base 및 공간 전하영역에서의 소수 반송자의 분포를 삼차원적으로 구하고자 한다.

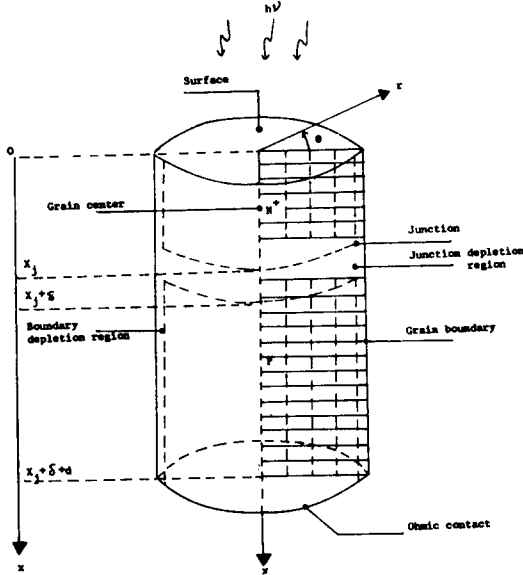


그림 3. 계산에 사용된 grain의 모델  
**Fig. 3.** Model of the grain used in the calculations.  
 (Emitter (N<sup>+</sup>)에서 소수 반송자의 공간 분포 계산)

Grain 내부를 단결정이라 하면 각도 방향성분은 일정하므로 원통형 grain의 emitter에서 소수 반송자의 밀도를 계산하기 위한 Laplace 방정식은 다음 식으로 표시된다.

$$\nabla \cdot J_p = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot J_r) + \frac{\partial J_x}{\partial x} \quad (3)$$

이때 반경 방향과 축 방향 성분의 전류밀도는 다음과 같다.

$$J_r = q(-D_p \frac{\partial p_n}{\partial r} + \mu_p E_r p_n) \quad (4)$$

$$J_x = q(-D_p \frac{\partial p_n}{\partial x} + \mu_p E_x p_n) \quad (5)$$

D<sub>p</sub> : 확산계수

μ<sub>p</sub> : 이동도

E<sub>x</sub>, E<sub>r</sub> : 축 방향과 동경 방향의 전계 성분

P<sub>n</sub> : 소수 반송자 밀도

전계 성분과 이동도가 거리에 따라 불변이라 하면 전류 연속방정식은 아래 식이 된다.

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot J_p + \frac{p_n - \bar{p}_n}{\tau_p} = G_e(\lambda, x) \quad (6)$$

$$G_e(\lambda, x) = \int_0^{\lambda_g} \alpha(\lambda) \phi_0(\lambda) (1 - R(\lambda)) \text{EXP}(-\alpha(\lambda)x) d\lambda$$

φ<sub>0</sub> : 반도체 표면을 투과한 photon flux

R(λ) : 반사계수

α(λ) : 흡수계수

또는

$$-D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial r^2} + \mu_p E_x \frac{\partial p_n}{\partial x} + (\mu_p E_r - \frac{D_p}{r}) \frac{\partial p_n}{\partial r} + (\frac{1}{r} \mu_p E_r + \frac{1}{\tau_p}) p_n = G_e(\lambda, x) + \frac{\bar{p}_n}{\tau_p} \quad (7)$$

A) Grain 내부 (경계 조건을 제외한 점들)

식 (7)에 부록의 식 (A6 ~ A-9)을 대입하면 한 점 (J, K)에서의 소수 반송자의 밀도는 이웃하고 있는 가장 가까운 네 점의 밀도와 관계로부터 아래 식으로 주어진다.

$$B_{j,k} p_{n,j,k-1} + D_{j,k} p_{n,j-1,k} + E_{j,k} p_{n,j,k} + F_{j,k} p_{n,j+1,k}$$

$$H_{j,k} p_{n,j,k+1} = G_{e,j,k} + \frac{\bar{p}_n}{\tau_p} \quad (8)$$

$$B_{j,k} = \frac{D_p}{\Delta r^2} (\frac{1}{2(k-1)} - 1) - \frac{\mu_p E_r}{2 \Delta r}$$

$$D_{j,k} = -\frac{\mu_p E_x}{2 \Delta x} - \frac{D_p}{\Delta x^2}$$

$$E_{j,k} = 2 D_p (\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta r^2}) + \frac{\mu_p E_r}{(k-1) \Delta r} + \frac{1}{\tau_p}$$

$$F_{j,k} = \frac{\mu_p E_x}{2 \Delta x} - \frac{D_p}{\Delta x^2}$$

$$H_{j,k} = -\frac{D_p}{\Delta r^2} (\frac{1}{2(k-1)} + 1) + \frac{\mu_p E_r}{2 \Delta r}$$

위 식은 grain 내부의 반송자 분포에 대한 식이고 경계면, 즉 표면, grain 경계, 접합면, grain 중심에 대한 반송자 분포는 경계 조건을 이용하여 계산할 수 있다.

B) 경계조건

단결정의 경우와 같이 보통 사용되는 경계 조건으로써 표면과 grain 경계에서 재결합 속도를 S<sub>p</sub>, S<sub>g</sub>라 가정하면 경계 조건은 아래 식이 된다.

$$\text{표면} : -D_p \frac{\partial p_n}{\partial x} + \mu_p E_x p_n = -S_p (p_n - \bar{p}_n) \quad (9)$$

$$\text{grain 경계} : -D_p \frac{\partial p_n}{\partial r} + \mu_p E_r p_n = S_g (p_n - \bar{p}_n) \quad (10)$$

$$\text{grain center} : -D_p \frac{\partial p_n}{\partial r} + \mu_p E_r p_n = 0 \quad (11)$$

$$\text{접합면} : P_n = \bar{P}_n \quad (12)$$

식 (7)에 경계 조건을 대입하고 부록의 식들을 이용하면 각 점들에 대한 식들은 다음과 같이 된다.

C) 전지 표면 ( $r=0$ ,  $r=R$ 인 점을 제외)

$$B_{j,k} P_{n,j,k-1} + E'_{j,k} P_{n,j,k} + F'_{j,k} P_{n,j+1,k} + H_{j,k} P_{n,j,k+1} = Ge_{j,k} + \left(\frac{1}{\tau_p} - D_{j,k} \frac{2 \Delta x S_p}{D_p}\right) \bar{P}_n \quad (13)$$

$$B_{j,k} = \frac{D_p}{\Delta r^2} \left(\frac{1}{2(k-1)} - 1\right) - \frac{\mu_p E_r}{2 \Delta r}$$

$$E'_{j,k} = E_{j,k} - \frac{2 \Delta x}{D_p} (\mu_p E_x + S_p) D_{j,k}$$

$$F'_{j,k} = F_{j,k} + D_{j,k}$$

$$H_{j,k} = -\frac{D_p}{\Delta r^2} \left(\frac{1}{2(k-1)} + 1\right) + \frac{\mu_p E_r}{2 \Delta r}$$

D) Grain 경계

$$B'_{j,k} P_{n,j,k-1} + D_{j,k} P_{n,j-1,k} + E'_{j,k} P_{n,j,k} + F_{j,k} P_{n,j+1,k} = Ge_{j,k} + \left(\frac{1}{\tau_p} - H_{j,k} \frac{2 \Delta r S_g}{D_p}\right) \bar{P}_n \quad (14)$$

$$B'_{j,k} = B_{j,k} + H_{j,k}$$

$$E'_{j,k} = E_{j,k} + H_{j,k} (\mu_p E_r - S_g) \frac{2 \Delta r}{D_p}$$

E) Grain center

$$D_{j,k} P_{n,j-1,k} + E''_{j,k} P_{n,j,k} + F_{j,k} P_{n,j+1,k} + H''_{j,k} P_{n,j,k+1} = Ge_{j,k} + \frac{\bar{P}_n}{\tau_p} \quad (15)$$

$$E''_{j,k} = E'_{j,k} - B'_{j,k} \frac{2 \Delta r \mu_p E_r}{D_p}$$

$$H''_{j,k} = H'_{j,k} + B'_{j,k}$$

$$B'_{j,k} = -\frac{D_p}{\Delta r^2} - \frac{\mu_p E_r}{2 \Delta r}$$

$$E'_{j,k} = 2 D_p \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta r^2}\right) + \frac{1}{\tau_p}$$

$$H'_{j,k} = -\frac{D_p}{\Delta r^2} + \frac{\mu_p E_r}{2 \Delta r}$$

F)  $x=0$ ,  $r=0$ 인 점

$$E''_{j,k} P_{n,j,k} + F'_{j,k} P_{n,j+1,k} + E'_{j,k} P_{n,j,k+1} = Ge_{j,k} + \left(\frac{1}{\tau_p} - D_{j,k} \frac{2 \Delta x S_p}{D_p}\right) \bar{P}_n \quad (16)$$

$$E''_{j,k} = E'_{j,k} - B_{j,k} \frac{2 \Delta r \mu_p E_r}{D_p}$$

$$F'_{j,k} = F_{j,k} + D_{j,k}$$

$$H'_{j,k} = H_{j,k} + B_{j,k}$$

G)  $x=0$ ,  $r=R$ 인 점

$$B'_{j,k} P_{n,j,k-1} + E''_{j,k} P_{n,j,k} + F'_{j,k} P_{n,j+1,k} = Ge_{j,k}$$

$$+ \bar{P}_n \left(\frac{1}{\tau_p} - D_{j,k} \frac{2 \Delta x S_p}{D_p} - H_{j,k} \frac{2 \Delta r S_g}{D_p}\right) \quad (17)$$

$$B'_{j,k} = B_{j,k} + H_{j,k}$$

$$E''_{j,k} = E'_{j,k} + H_{j,k} \frac{2 \Delta r}{D_p} (\mu_p E_r - S_g)$$

$$F'_{j,k} = F_{j,k} + D_{j,k}$$

Base 영역 (p)에서 소수 반송자의 공간 분포의 계산도 emitter 영역 ( $N^+$ )의 경우와 같이 전류 연속방정식과 경계 조건으로부터 계산할 수 있다. 또한, 변환효율을 계산하기 위해서는 전지의 암전류 성분도 emitter와 base에 대해서 각각 구해야 하며 경계 조건들만 다음에 표시하겠다.

H) Base (p)에서 소수 반송자의 경계 조건

$$\text{접합면 : } \bar{n}_p = \bar{n}_p \quad (18)$$

$$\text{grain 경계 : } D_n \frac{\partial n_p}{\partial r} + \mu_n E_r n_p = -S_g (n_p - \bar{n}_p) \quad (19)$$

$$\text{grain center : } D_n \frac{\partial n_p}{\partial r} + \mu_n E_r n_p = 0 \quad (20)$$

$$\text{저항성 접촉면 : } n_p = \bar{n}_p \quad (21)$$

I) 전지에 빛을 쬐이지 않았을 때 emitter ( $N^+$ )에서 다수 반송자의 경계 조건

$$\text{표면 : } -D_p \frac{\partial}{\partial x} (p_n - \bar{p}_n) + \mu_p E_x p_n = -S_r (p_n - \bar{p}_n) \quad (22)$$

$$\text{grain 경계 : } -D_p \frac{\partial}{\partial r} (p_n - \bar{p}_n) + \mu_p E_r p_n = S_g (p_n - \bar{p}_n) \quad (23)$$

$$\text{grain center : } -D_p \frac{\partial}{\partial r} (p_n - \bar{p}_n) + \mu_p E_r p_n = 0 \quad (24)$$

$$\text{접합면 : } p_n = \bar{p}_n \text{ EXP}(V_j/U_T) \quad (25)$$

J) 전지에 빛을 쬐이지 않았을 때 base (p)에서 다수 반송자의 경계 조건

$$\text{접합면 : } n_p = \bar{n}_p \text{ EXP}(V_j/U_T) \quad (26)$$

$$\text{grain 경계 : } D_n \frac{\partial}{\partial r} (n_p - \bar{n}_p) + \mu_n E_r n_p = -S_g (n_p - \bar{n}_p) \quad (27)$$

$$\text{grain center : } D_n \frac{\partial}{\partial r} (n_p - \bar{n}_p) + \mu_n E_r n_p = 0 \quad (28)$$

$$\text{저항성 접촉면 : } n_p = \bar{n}_p \quad (29)$$

Emitter와 base에서 광전류와 암전류는 각 영역에서 반송자들의 공간 분포를 구한 다음 미분하면 구하여진다. 예를 들어 emitter에서 광전류를 구하기 위

한 소수 반송자에 대한 식은 부록의 그림 8에 표시한 바와 같이 행렬 형태의 식이 된다. 동경 방향의 전류 밀도 성분  $J_r$ 은 p-n 접합면을 지나지 않으므로 손실항이 되며 단지 축방향 전류 밀도 성분  $J_x$ 만이 변환효율에 기여한다.

p-n 접합 공간 전하영역의 광전류와 암전류는 이 영역에서 전계 성분이 커서 단결정의 경우<sup>[7]</sup>에서 처럼 구하였다.

#### 4. 계산 및 결과

Emitter(N<sup>+</sup>)에서와 base(p) 영역에서 소수 반송자 밀도와 전류밀도를 계산하고 grain의 크기에 따른 변환효율을 계산하기 위해 접합깊이(junction depth), 태양 전지의 두께, 도우핑의 농도및 소수 반송자의 수명(life time)에 대한 최적 조건은 이미 단결정 태양 전지에서 계산된 값<sup>[7]</sup>들이 사용되었다. 실리콘의 흡수 계수<sup>[11]</sup>와 분광 분포[AM1]<sup>[12]</sup>는 0.4 $\mu$ m~0.6 $\mu$ m 범위에서 67개의 값들이 취해졌다.

계산 시간을 절약하기 위해 base 영역에서 grain의 동경 방향으로 5개의 점(emitter에서는 4개의 점), 축방향으로는 20개의 점(emitter에서는 6개의 점)을 취하였다. 흡수 계수로 인한 소수 반송자의 생성 변화율이 축방향에 따라 급격하게 변화하므로 좀더 점을 미세하게 취하여야 하지만 이 경우 행렬의 차원이 커져서 계산 시간이 길어진다. 계산에 사용된 프로그램 구성도를 부록(II)의 그림 9에 나타냈다.

##### 4. 1. 소수 반송자의 공간분포

원통형 grain의 emitter와 base에서 계산된 소수 반송자의 공간분포는 그림 4와 같다. 이 계산에 사용된 계수의 값들은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{emitter : } N_D &= 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}, L_p = 2.2 \mu\text{m} \\ S_p &= S_g = 10^{16} \text{ cm/sec}, X_j = 0.3 \mu\text{m} \\ \text{base : } N_A &= 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}, L_n = 96 \mu\text{m} \\ S_n &= 10^6 \text{ cm/sec}, X' = 30 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Emitter와 base에서 소수 반송자 값의 크기는 같은 눈금의 아니고 base에서 소수 반송자 밀도의 값이 커

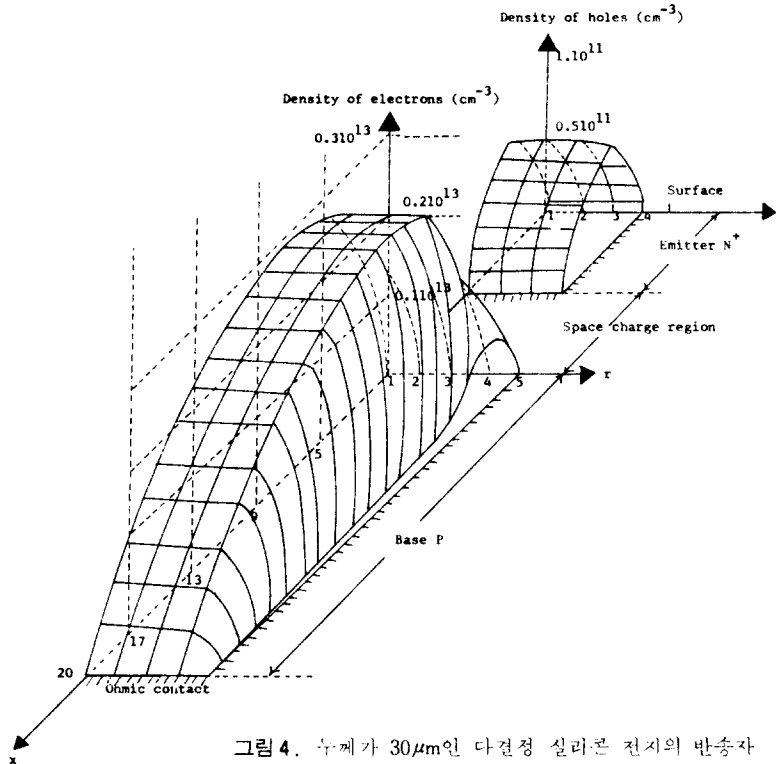


그림 4. 두께가 30 $\mu$ m인 다결정 실리콘 전지의 반송자 분포

Fig. 4. Carrier density versus position in a 30 $\mu$ m thick grain of poly-si.

서 효율에 주로 관계됨을 알 수 있다.

4. 2. 양자 효율에 대한 grain 크기의 영향  
 제안된 계산 model을 시험하기 위해 단결정 실리콘 태양 전지와 다결정 실리콘 태양 전지의 양자효율의 변화를 각 파장에 대하여 그림 5에 비교하였다. 파장이 긴 영역에서는 두개의 양자 효율의 변화가 잘 일치됨을 보여 주지만 파장이 짧은 영역( $\lambda=0.4\mu\text{m}$ )에서 일치되지 않는 이유는 base에서 특히 축방향으로 점간격이 충분히 작지 않기 때문이다. 즉, 흡수 계수로 인한 소수 반송자 생성율의 급격한 변화에 기인한다. Grain 크기가 커짐에 따라 효율은 증가해서 grain의 크기가 확산 길이 정도( $100\mu\text{m}$ )가 되면 포화됨을 알 수 있다.

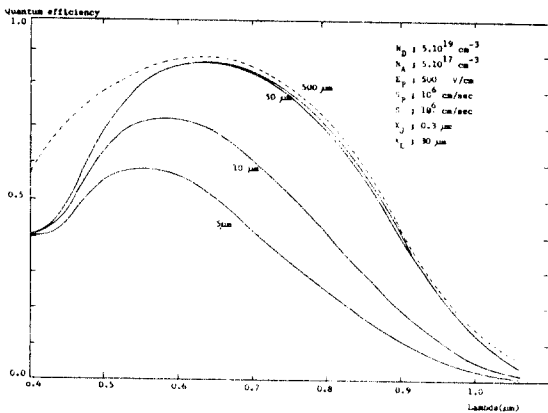


그림 5. 다결정 실리콘(실선)과 단결정 실리콘(점선) 전지의 양자효율  
 Fig. 5. Quantum efficiencies of poly-Si(solid) and mono-Si(dashed) cells.

4 - 3. Grain의 크기에 대한 변환 효율의 영향

그림 6, 7에서는 각각 grain의 크기에 따른 변환 효율의 값과 단락전류(short circuit current), 충실도(fill factor) 및 개방전압(open circuit voltage)의 계산된 결과를 보였다. Grain의 크기가  $0.1\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$ 의 범위에서는 변환 효율의 변화가 크다. 그러나,  $100\mu\text{m}$  이상에서는 효율의 변화는 적다. 또한, 단락전류, 충실도 및 개방전압도 grain의 크기가 증가함에 따라 변환효율과 잘 일치하고 있다.

이 계산에서 base와 emitter에 대한 확산거리는 각각  $96\mu\text{m}$ 과  $2.2\mu\text{m}$ 의 값을 취했는데, 즉 grain의 크기가 확산 거리 정도가 되면 단결정과 비교했을 때 변

환효율의 큰 차이가 없음을 보여 준다.

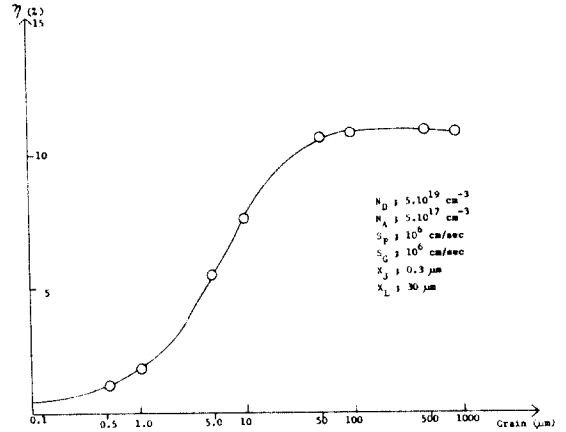


그림 6. 두께가  $30\mu\text{m}$ 인 다결정 실리콘  $n^+ - p$  접합 태양전지의 AM1 효율  
 Fig. 6. AM1 efficiencies of  $30\mu\text{m}$  thick polycrystalline silicon  $n^+ - p$  solar cells.

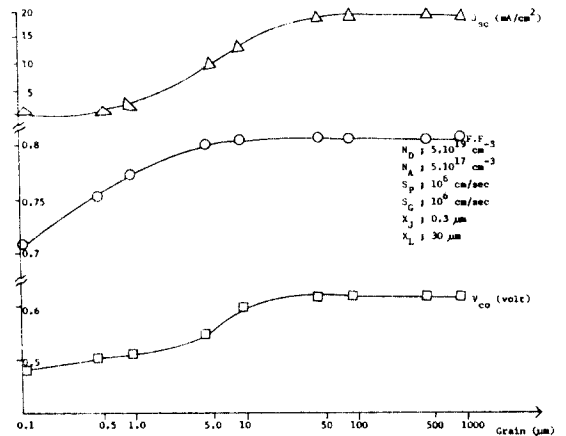


그림 7. 두께가  $30\mu\text{m}$ 인 다결정 실리콘  $n^+ - p$  접합 태양전지의 단락전류, 충실도, 개방전압  
 Fig. 7. Short-circuit current, fill factor, and open circuit voltage of  $30\mu\text{m}$  poly silicon  $n^+ - p$  solar cells.

5. 결 론

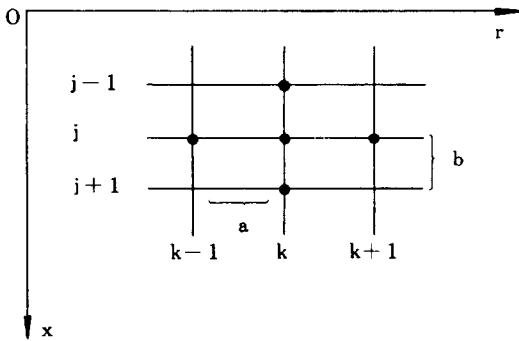
본 연구에서는 다결정 실리콘 p-n 접합 태양 전지의 변환효율을 계산하기 위해 grain을 원통형으로 가

정하여 소수 반송자의 분포로부터 grain의 크기에 따른 양자효율, 단락전류, 개방전압 및 변환효율의 값들을 계산하였다. 양자효율의 계산은 축방향의 거리에 대해서 소수 반송자 생성율의 급격한 변화로 빛의 파장이 짧은 영역(0.4μm) 부근에서 다결정의 결과와 잘 일치하지 않았다. 이 영역에 (0.4μm) 대한 계산 오차를 줄이기 위해 특히 축방향으로 점 간격을 줄이든가, 점 간격을 비선형적으로 취할 수 있을 것으로 사료된다.

Grain이 충분히 커서 확산 거리보다 크면 다결정 실리콘의 태양 전지는 단결정과 유사한 변환 효율을 얻을 수 있다는 결과를 얻었으며 두께가 30μm인 전지의 최대 변환 효율은 12%(AM1) 정도였다. 본 계산의 model 은 Schottky, M. I. S, 및 heterojunction 태양 전지에 대해서도 쉽게 응용할 수 있다.

부 록 I.

면 x, r에서, x방향으로 간격 b, r방향으로 간격 a로 하여 아래 그림과 같이 쪼개어 일점(J, K)의 밀도를 그 이웃 네 점을 취하여 계산할 수 있다.



원통형 grain에서 emitter의 소수 반송자 밀도를 계산하기 위해 Taylor 급수 전개를 하면 다음 식이 된다.

$$p_n(x, r) = p_n(x_0, r_0) + (x-x_0) \frac{\partial p_n}{\partial x} + (r-r_0) \frac{\partial p_n}{\partial r} + \frac{(x-x_0)^2}{2} \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + (x-x_0)(r-r_0) \frac{\partial^2 p_n}{\partial x \partial r} + \frac{(r-r_0)^2}{2} \frac{\partial^2 p_n}{\partial r^2} \quad (A-1)$$

점(J, K)와 이웃하고 있는 네 점에 대한 식은 다음과 같다.

$$p_{n,j+1,k} = p_{n,j,k} + a \frac{\partial p_n}{\partial x} + \frac{a^2}{2} \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} \quad (A-2)$$

$$p_{n,j-1,k} = p_{n,j,k} - a \frac{\partial p_n}{\partial x} + \frac{a^2}{2} \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} \quad (A-3)$$

$$p_{n,j,k+1} = p_{n,j,k} + b \frac{\partial p_n}{\partial r} + \frac{b^2}{2} \frac{\partial^2 p_n}{\partial r^2} \quad (A-4)$$

$$p_{n,j,k-1} = p_{n,j,k} - b \frac{\partial p_n}{\partial r} + \frac{b^2}{2} \frac{\partial^2 p_n}{\partial r^2} \quad (A-5)$$

이때 a, b는 간격이다.

위의 네 식으로부터 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\partial p_n}{\partial x} = \frac{1}{2a} (p_{n,j+1,k} - p_{n,j-1,k}) \quad (A-6)$$

$$\frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} = \frac{1}{a^2} (p_{n,j+1,k} + p_{n,j-1,k} - 2 p_{n,j,k}) \quad (A-7)$$

$$\frac{\partial p_n}{\partial r} = \frac{1}{2b} (p_{n,j,k+1} - p_{n,j,k-1}) \quad (A-8)$$

$$\frac{\partial^2 p_n}{\partial r^2} = \frac{1}{b^2} (p_{n,j,k+1} + p_{n,j,k-1} - 2 p_{n,j,k}) \quad (A-9)$$

부 록 II.

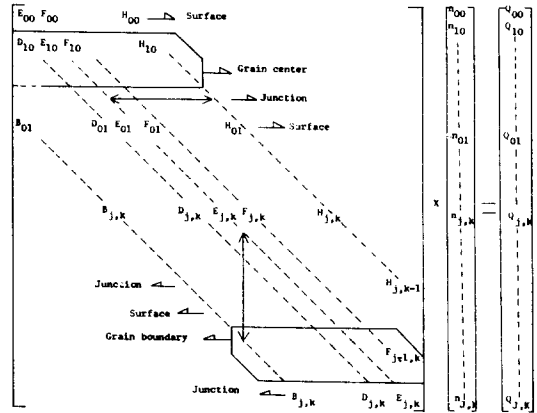


그림 8. 반송자 밀도에 대한 matrix 형태의 방정식  
Fig. 8. Expression of simultaneous equations for the carrier density.

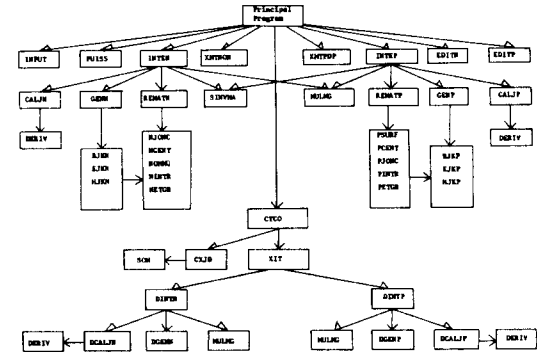


그림 9. 다결정 실리콘 n<sup>+</sup>-p 태양전지에 대한 program 구성도  
Fig. 9. Organigram of programmes for poly-silicon N<sup>+</sup>-p solar cells.

參 考 文 獻

1. Harold J. Hovel, "Semiconductors and Semimetals Vol. 11, Solar cells," pp. 181-185, New York, 1976.
2. D. Bielle-Daspet, G. Gasset and A. Johan, "Propriétés Electriques de Couches de Silicium Polycristallin Type P Réalisées sur Substrats de Graphite," Photovoltaic Solar Energy Conference, Luxembourg, pp. 920-929, 1977.
3. Howard C. Card and W. Hwang, "On the Transport Theory of Schottky Barriers to Polycrystalline Silicon Thin Films," IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-27, pp. 700-705, 1980.
4. T. H. Distefano and J. J. Cuomo, "Reduction of Grain Boundary Recombination in polycrystalline Silicon Solar Sells," Applied physics Letters, Vol. 30, No. 7, pp. 351-353, 1977.
5. S. I. Soclof and P. A. Iles, "Grain Boundary and Impurity Effects in low cost Solar Cells," Conf. Rec. 11th PVSC, May, Scottsdale, AZ, pp. 56-61, 1975.
6. C. Lanza and H. J. Hovel, "Efficiency Calculations for Thin-Film Polycrystalline Semiconductor Schottky Barrier Solar Cells," IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-24, pp. 392-395, 1977.
7. Hosun Chung, "Contribution a l'Etude des Cellules Solaires au Silicium Polycristallin," Thèse de Docteur Ingenieur, 1980.
8. H. Ficher and W. Psehunder, "Low-cost Solar Cells Based on Large Area Unconventional Silicon," IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-24, pp. 438-441, 1977.
9. J. G. Fossum and F. A. Lindholm, "Theory of Grain Boundary and Inter-grain Recombination Currents in Polysilicon p-n Junction Solar Cells," IEEE, Trans. on Electron Devices, Vol. ED-27, pp. 692-699, 1980.
10. H. C. Card and E. S. Yang, "Electronic Processes at Grain Boundaries in Polycrystalline Semiconductors Under Optical Illumination," IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-24, pp. 397-402, 1977.
11. W. C. Dash and R. Newman, "Intrinsic Optical Absorption in Single-Crystal Germanium and Silicon at 77°K and 300°K," Physical Review, Vol. 99, No. 4, pp. 1151-1155, 1955.
12. P. T. Landsberg and J. R. Mallinson, "Thermodynamic Constraints, Effective Temperatures," Photovoltaic Solar Energy Conference, Toulouse, pp. 27-42, 1976.

