

고 효율 실리콘 태양전지(Ⅱ) - 확산형 실리콘

태양전지에 대한 모의 실험

( High Efficiency Silicon Solar Cell (Ⅱ) -Computer Modeling on Diffused Silicon Solar Cell)

姜 鎭 榮 \*, 李 鍾 德 \*

(Kang, Chin Yung and Lee, Jong Duk)

要 約

N<sup>+</sup>P, N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> 형 태양전지를 제조하여 얻은 실험자료들을 근거로 실리콘 접합형 태양전지에 일반적으로 적용할 수 있는 컴퓨터 모의 실험 프로그램을 개발하고, 이의 유용성을 확인하였다. 이 모의 실험 프로그램은 N<sup>+</sup>P, P<sup>+</sup>N, N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup>, P<sup>+</sup>NN<sup>+</sup> 형의 실리콘 태양전지에 적용할 수 있는 것으로, 입사광은 AM1, 등강도 광원, 인공조명으로 많이 사용되는 GE-ELH 광원이고, AR 코팅은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 형과 투과도가 파장에 관계 없는 일정형 2 종류가 있으며, 프로그램에서 이들 전지의 구조, 광원, AR 코팅 종류에 대한 파장 특성분포도 쉽게 변화시킬 수 있도록 되어 있다. 이 모의 실험의 결과들을 토대로 N<sup>+</sup>와 P 영역에서의 평균도오핑농도와 전지의 두께, AM1 스펙트럼에 대한 집광도, 앞면 접합깊이에 대하여 효율이 최대가 되는 최적치들을 구하였으며, 앞면의 표면 재결합 속도, 접합부에서의 캐리어의 유효 수명, 누설저항에 대하여는 허용 한계치로, 기타 효율변화 인자로서 동작온도, 직렬저항과 전기장의 세기에 대하여는 효율의 변화율로서 파라미터들이 효율에 미치는 영향들을 분석하였다.

Abstract

A generally applicable computer simulation program for diffused silicon solar cells has been developed on the basis of the experimental results. The program can be easily used to obtain the spectral response and I-V characteristics for N<sup>+</sup>P, P<sup>+</sup>N, N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup>, P<sup>+</sup>NN<sup>+</sup> cells by changing various input parameters. The insolated spectra can be taken from AM1 and constant intensity and GE-ELH lamp light sources. The options for AR coating are Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> film and materials with constant reflectance including zero reflectance for ideal case. The computer simulation demonstrates successful results compared with the measured values for the short circuit current, open circuit voltage, efficiency, spectral response, quantum efficiency, I-V characteristics, etc. This program was used to optimize doping concentration, cell thickness, light concentration, junction depth, and to obtain the limit values for front surface recombination velocity, effective carrier life time in the depletion regions and shunt resistance, and also to drive the changing rate in conversion efficiency depending on operation temperature, series resistance and electric field strength in N<sup>+</sup> P<sup>+</sup> bulk regions.

\* 正會員, 韓國電子技術研究所  
(Korea Institute of Electronics Technology)

接受日字: 1981年 6月 20日

I. 序 論

이 프로그램은 실리콘 확산접합 태양전지에 “대”

하여 모의 실험을 하기 위하여 개발된 것으로 이의 제작된 전지에 대하여는 단락전류, 개방전압, 충실도, 변환효율, 다이오드 상수, 양자효율을 분광 반응분포등에 대하여 실험치와 비교함으로써 우리가 측정하기 어려운 표면재결합 속도와 접합부에서의 캐리어의 유효수명등에 대한 값을 추정하고, 앞으로 설계될 전지에 대하여 전기적 파라미터들을 예측하기 위하여 개발된 것으로서 포오트란 IV 언어로 짜여졌으며 작업은 PDP 11/70 형의 컴퓨터를 사용하였다.

이 프로그램은 태양전지들중 가장 정량적 해석이 용이하고 제작경험이 많은 확산접합형 전지에 대한 기본적인 이론을 바탕으로 하여 각 영역에서의 일정한 도오핑 농도와 일정한 세기의 전장을 전제로 하였으며 그 외의 동작 요소는 간단한 등가회로를 기초로 하였다.

이 프로그램의 입력파라미터들은 전지의 두께와 앞, 뒤 영역에서의 접합깊이, 각 영역에서의 평균 도오핑 농도와 동작온도, 전지면적, 집광도, 직렬저항, 누설저항, 그리드 면적 점유율, GE-ELH lamp의 분광특성<sup>[1]</sup> Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> AR 코팅에 의한 광반사율 특성등의 측정값을 기본으로 하였으며, 그의 실리콘의 광흡수 특성<sup>[2,3]</sup>, AM1 스펙트럼<sup>[2,4,5]</sup>, 앞면과 뒷면에서의 캐리어의 표면재결합속도, 그리고 N<sup>+</sup>와 P<sup>+</sup> 확산층내에서의 평균전장에 대하여는 여러 문헌들<sup>[2,4,6]</sup>에서 자주 인용되는 값들을 사용하였다. 그의 각 영역에서의 캐리어의 이동도와 평균수명 및 확산거리는 도오핑 농도에 대하여 참고문헌들<sup>[2,7,8,9,10]</sup>에서 얻은 자료로 사용하였다. 그러나 측정이 곤란하면서도 계산결과에 무시하지 못할 정도로 영향을 미치는 앞표면 재결합속도와 N<sup>+</sup>P 접합부에서의 캐리어의 유효수명에 대하여는 실제 측정결과에 맞게 역으로 프로그램에서 도출하였다.

본 논문에서는 이 모의 실험을 N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup>형 전지에 대하여 행하였으며 여러 상이한 구조나 동작조건에 대하여도 보편적으로 통용될 수 있는 효율 최적치, 허용한계치 및 파라미터들의 변화에 따른 효율 증감율로서 정량적인 해석을 하였다.

II. 이론과 프로그래밍

확산접합형 태양전지의 모의 실험에서 전기적 파라미터들에 대한 정량적인 분석은 첫째 광전류의 계산과 둘째 암전류의 계산, 마지막으로 간단한 등가회로 분석을 이용한 전류-전압 특성곡선의 해석에 있다. 한 예로서 N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup>형 전지의 경우에 대하여 다음과 같은 해석을 할 수 있다.

1) 광전류의 계산

태양전지에서 광전류는 입사한 광에너지가 전자-정공의 쌍들을 생성시킬 때 이들 잉여캐리어가 전장에 의하여 서로 다른 방향으로 이끌리는 성질에 기인한 것이므로 열평형, 정상 상태에서 전지내의 각 영역에서 소수 캐리어에 대하여 다음과 같은 연속방정식이 만족된다.<sup>[2,4]</sup> 즉, N<sup>+</sup> 영역과 N<sup>+</sup>P 접합부에서는

$$D_p \frac{d^2 p}{dx^2} - \frac{d(\mu_p p E)}{dx} + T_r M \alpha e^{-\alpha x} Q_i - \frac{p}{\tau_p} = 0 \tag{1}$$

P 영역, PP<sup>+</sup> 접합부 및 P<sup>+</sup> 영역에서는

$$D_n \frac{d^2 n}{dx^2} + \frac{d(\mu_n n E)}{dx} + T_r M \alpha e^{-\alpha x} Q_i - \frac{n}{\tau_n} = 0 \tag{2}$$

이 만족되어야 한다. 여기서 T<sub>r</sub>, M, α는 각각 광투과율, 광자플럭스, 광흡수계수이다. Q<sub>i</sub>는 N<sup>+</sup> 영역에서는 1, N<sup>+</sup>P 접합부에서는 e<sup>-αa</sup>, P 영역에서는 e<sup>-α(a+d<sub>f</sub>)</sup>, pp<sup>+</sup> 접합부에서는 e<sup>-α(a+d<sub>f</sub>+b)</sup>, P<sup>+</sup> 영역에서는 e<sup>-α(a+d<sub>f</sub>+b+d<sub>b</sub>)</sup>이며 a, b, c는 각각 앞, 중간, 뒷영역의 폭이고 d<sub>f</sub>와 d<sub>b</sub>는 앞, 뒤 접합부의 폭이다. (그림 1 참조)

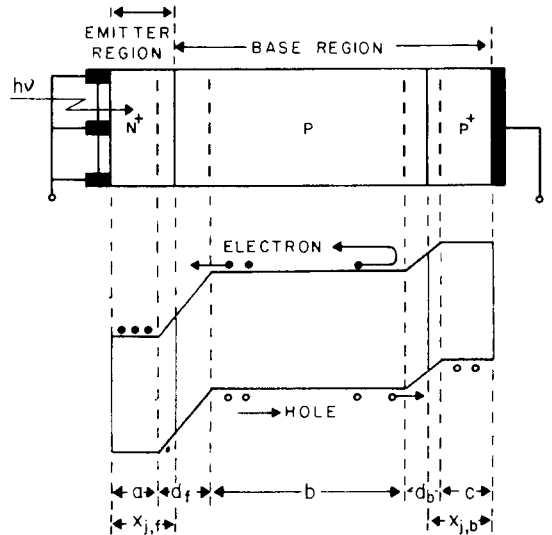


그림 1. N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> 태양전지의 구조와 에너지 밴드 그림

Fig. 1. Schematic demonstration & energy band diagram of a N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> solar cell.

식 (1), 식 (2)는 전제조건과 경계조건을 다음과 같이 가정하면 해석적인 이해를 얻을 수 있다.<sup>[4]</sup>

전제조건 ;

(a) 확산계수 ( $D_p, D_n$ ) 캐리어의 이동도 ( $\mu_p, \mu_n$ ) 캐리어의 평균수명 ( $\tau_n, \tau_p$ ), 광흡수 계수 ( $\alpha$ ) 는 상수이다.

(b)  $N^+, P, P^+$  영역에서의 평균전장 ( $E_a, E_b, E_c$ ) 는 상수이다.

(c)  $N^+P, PP^+$  접합부에서의 캐리어의 재결합( $P/\tau_p, n/\tau_n$ )는 무시한다.

경계조건 :  $N^+$  영역,  $N^+P$  접합부,  $P$  영역,  $PP^+$  접합부,  $P^+$  영역에서 각각 식 (3)~ 식 (7) 까지 나타낼 수 있다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dx} \Big|_{x=0} = (S_a/D_p + 2\mu_p E/D_p) p \Big|_{x=0} \\ P(a) = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -D_p \frac{dP}{dx} \Big|_{x=0} + \mu_p p E \Big|_{x=0} = 0 \\ p/\tau_p = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dn}{dx} \Big|_{x=b} = -(S_b/D_n + 2\mu_n E/D_n) n \Big|_{x=b} \\ n(0) = 0 \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D_n \frac{dn}{dx} \Big|_{x=0} + \mu_n n E \Big|_{x=0} = 0 \\ n/\tau_n = 0 \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dn}{dx} \Big|_{x=c} = -(S_c/D_n + 2\mu_n E/D_n) n \Big|_{x=c} \\ n(0) = 0 \end{array} \right. \quad (7)$$

여기서  $S_a, S_b, S_c$  는 앞,  $PP^+$  접합면, 뒷면에서의 표면재결합 속도이다. 이 경계조건에서는 전장이 큰 접합부에서 소수 캐리어가 흡수되고, 캐리어 농도가 높은 경계면에서는 표면 재결합에 의하여 캐리어의 이동이 지배된다는 것을 전제로 하고 있다. 이 결과의 특수해를 광전류로 근사하면 각 영역에서 생성된 광전류는  $N^+$  영역,  $N^+P$  접합부,  $P$  영역,  $PP^+$  접합부 및  $P^+$  영역에 대하여 식 (8)에서 (12)와 같이 표시 된다.

$$I_{ph, N^+} = S_q T_r Mm \left( \frac{\alpha}{\alpha^2 + 2U_{1a}\alpha - U_{0a}^2} \right) \times$$

$$\left[ U_{2a} \frac{(SD_a + 2U_{1a} + \alpha) eU_{1a}a - \{U_{2a} \sinh(U_{2a}a) + (SD_a + U_{1a}) \cosh(U_{2a}a)\} e^{-\alpha a}}{U_{2a} \cosh(U_{2a}a) + (SD_a U_{1a}) \sinh(U_{2a}a)} - (\alpha + U_{1a}) e^{-\alpha a} \right] \quad (8)$$

$$I_{ph, N^+P} = S_q T_r Mm e^{-\alpha a} (1 - e^{-\alpha d_f}) \quad (9)$$

$$I_{ph, P} = S_q T_r Mm \left( \frac{\alpha e^{-\alpha(a+d_f)}}{\alpha^2 - 2U_{1b}\alpha - U_{0b}^2} \right) \times \left[ -U_{2b} \frac{(\alpha - SD_b - 2U_{1b}) e^{-(\alpha - U_{1b})b}}{U_{2b} \cosh(U_{2b}b) + (SD_b + U_{1b}) \cosh(U_{2b}b) + U_{2b} \sinh(U_{2b}b)} - U_{1b} + \alpha \right] \quad (10)$$

$$I_{ph, PP^+} = S_q T_r Mm e^{-\alpha(a+d_f+b)} (1 - e^{-\alpha d_b}) \quad (11)$$

$$I_{ph, P^+} = S_q T_r Mm \left( \frac{\alpha e^{-\alpha(a+d_f+b+d_b)}}{\alpha^2 - 2U_{1c}\alpha - U_{0c}^2} \right) \times \left[ -U_{2c} \frac{(\alpha - SD_c - 2U_{1c}) e^{-(\alpha - U_{1c})c}}{U_{2c} \cosh(U_{2c}c) + (SD_c + U_{1c}) \cosh(U_{2c}c) + U_{2c} \sinh(U_{2c}c)} - U_{1c} + \alpha \right] \quad (12)$$

여기서  $S, m$ 은 각각 전지의 면적, 그리드면적 점유율이고,  $\mu_{1a}, \mu_{1a}, \mu_{2a}$  등은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$U_{0a} = 1/L_a, U_{1a} = U_a E_a / (2D_a), U_{2a} = (U_{1a}^2 + U_{0a}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

광전류  $I_{ph}$  는 각 영역에서 생성된 광전류의 합이므로 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$I_{ph} = I_{ph, N^+} + I_{ph, N^+P} + I_{ph, P} + I_{ph, PP^+} + I_{ph, P^+} \quad (14)$$

그리고 양자효율  $Q(\nu)$ 과 내적양자효율  $Q_0(\nu)$ , 분광반응  $R(\nu)$ 는  $I_{ph}(\nu)$ 와는 각각 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned}
 Q(\nu) &= I_{ph}(\nu) / (S q M(\nu)) \\
 Q_0(\nu) &= I_{ph}(\nu) / (S q M(\nu) T_r(\nu)) \quad (15) \\
 R(\nu) &= I_{ph}(\nu) / (S \times 1 \text{ w/cm}^2) \text{ [A/watt]}
 \end{aligned}$$

2) 암전류의 계산

암전류는 N<sup>+</sup>P 접합과 PP<sup>+</sup> 접합의 직렬결합에 의한 순방향 다이오드 특성을 갖는다. 그러나 P 영역의 폭 *b* 가 이 영역에서 소수 캐리어의 확산거리 이상 떨어지면 이 두 접합간의 상호 영향은 없어지고 암전류는 거의 N<sup>+</sup>P 접합에 의하여 좌우된다. 이 프로그램에서는 P<sup>+</sup> 영역에서의 캐리어의 짧은 수명을 고려하여 암전류를 N<sup>+</sup>P 접합의 전류-전압 특성과 PP<sup>+</sup> 접합 경계면에서의 표면 재결합으로 단순화하였다. 이 결과 암전류는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_D &= S q n_i^2 \left( e^{\frac{q V_j}{k T}} - 1 \right) \times \\
 \frac{D_a}{N_a} & \frac{U_{2a} S D_a \cosh(U_{2a} a) + (U_{2a}^2 - U_{1a} S D_a - U_{1a}^2)}{U_{2a} \cosh(U_{2a} a) + (S D_a + U_{1a})} \\
 & \times \frac{\sinh(U_{2a} a)}{\sinh(U_{2a} a)} +
 \end{aligned}$$

$$\left\{ \frac{D_b}{N_b} \frac{U_{2b} S D_b \cosh(U_{2b} b) + U_{2b}^2 \sinh(U_{2b} b)}{U_{2b} \cosh(U_{2b} b) + S D_b \sinh(U_{2b} b)} + \frac{d_f}{2 n_i \tau_{01} \left( e^{\frac{q V_j}{2 k T}} + 1 \right)} \right\} \quad (16)$$

여기서  $\tau_{01}$ 는 N<sup>+</sup>P 접합부에서 재결합되는 캐리어에 대한 평균수명이고,  $N_a$ ,  $N_b$ 는 각각 그 영역에서의 다수 캐리어 농도이며  $S D_a$ ,  $S D_b$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$S D_a = S_a / D_a, \quad S D_b = S_b / D_b \quad (17)$$

여기서  $S_b$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 S_b &= N_b \frac{D_c}{N_c} \left\{ \frac{U_{2c} S D_c \cosh(U_{2c} c) + (U_{2c}^2 - U_{1c} S D_c - U_{1c}^2)}{U_{2c} \cosh(U_{2c} c) + (S D_c + U_{1c})} \right. \\
 & \left. \frac{U_{1c}^2 \sinh(U_{2c} c)}{\sinh(U_{2c} c)} \right\} + \frac{d_b}{\tau_{02}} \quad (18)
 \end{aligned}$$

공핍층에서 일어나는 소수 캐리어의 유효수명  $S D_c$ 는  $S_c / D_c$ 이다. 암전류에 대한 결과식인 식 (16)과 식 (18)은 H. J. Hovel<sup>[4]</sup>이 유도한 식과 유사하나 전장이

포함된 더욱 일반적인 것이다.

3) 전류-전압 특성 해석

전류-전압 특성은 그림 2의 간단한 등가회로를 모형으로 하면 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_L &= \frac{R_{ID} // R_{sh}}{(R_{ID} // R_{sh}) + (R_s + R_L)} I_{ph} = \frac{R_{sh}}{R_{sh} + R_s} \\
 & \times \left( I_{ph} - \frac{V_L}{R_{sh}} - I_D \right) \quad (19)
 \end{aligned}$$

여기서  $I_L$ ,  $V_L$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $R_{ID}$ 는 각각 부하전류, 부하전압, 직렬저항, 누설저항 그리고 암저항이다. 이 전압-전류 특성곡선에 의하여 최대전력점과 최대효율치

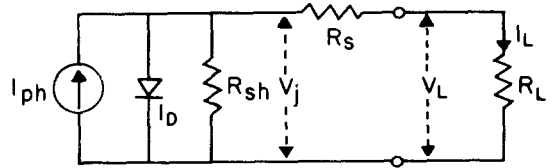


그림 2. 태양전지의 등가회로도

Fig. 2. An equivalent circuit of a solar cell.

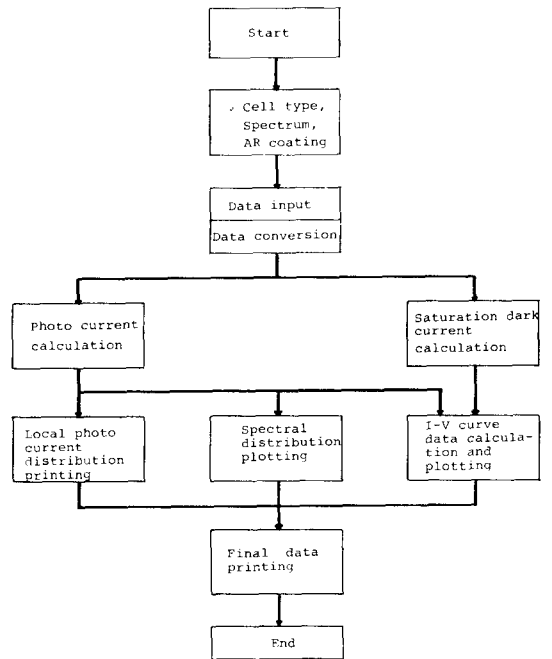


그림 3. 프로그램의 기본 구성도

Fig. 3. Algorithm for the computer program.

를 구하게 되는데, 이때 전력 파라미터인 단락 전류 ( $I_{sc}$ ), 충전도 (FF), 효율 ( $\eta$ ) 등은 다음과 같은 관계가 있다.

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (20)$$

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{H_i \cdot S} \times 100 \quad (21)$$

여기서  $I_m$ ,  $V_m$ 은 최대전력점에서의 부하전류, 부하전압이고  $H_i$ 는 입사광의 강도이다. 효율 ( $\eta$ )는 보통 전면적 효율 ( $\eta_T$ )을 의미하나 경우에 따라서는 수광

면적효율 ( $\eta_A$ )과 명확히 구분하여 사용하는 것이 필요할 때가 있다.

4) 프로그래밍

2절 1) ~ 5) 항까지의 이론적인 배경을 이용하여 그림 3에 나타낸 기본구성을 가지는 프로그램을 만들었다. 이 프로그램으로 각 영역에서의 광전류 ( $I_{ph}$ ), 양자효율 (Q), 광자플럭스 (M), 일사강도 스펙트럼 ( $H_i$ )의 상대적인 크기를 나타낸 것이 그림 4에 예시되었으며 외부 부하가 변할때의 전류 (\*), 전력 (P), 전압 (V) 및 부하저항의 역수 (C)는 그림5에서 보였다.

5) 도오핑 농도와 수송파라미터들의 결정

본 모의 실험에서 사용된 평균 도오핑 농도는 측정된

THE SPECTRAL DISTRIBUTION OF PHOTO CURRENT (SPAN= 0.025 UM)

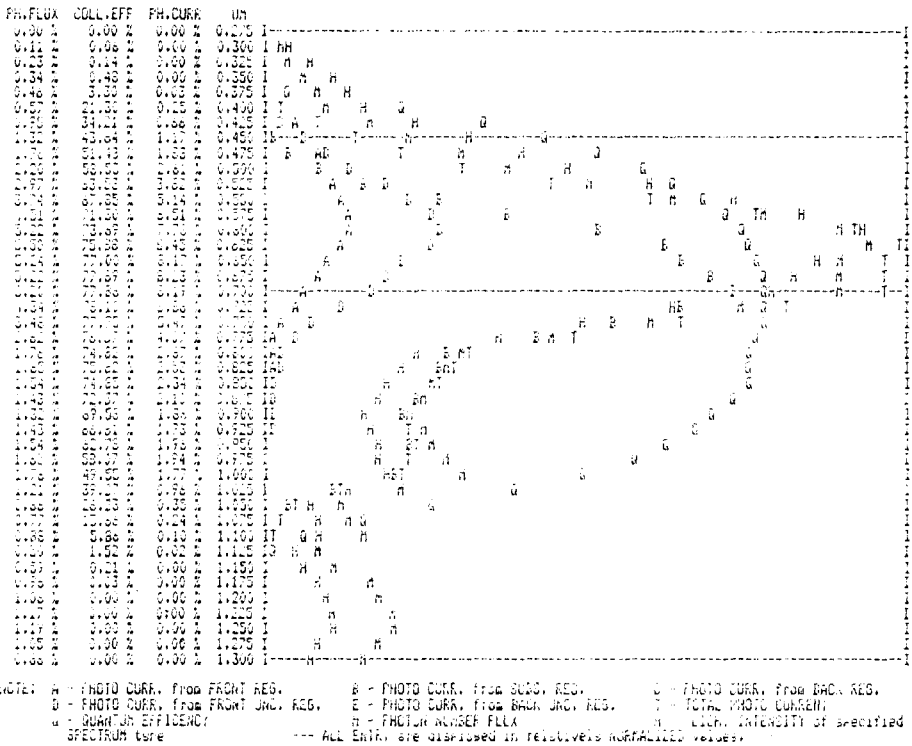
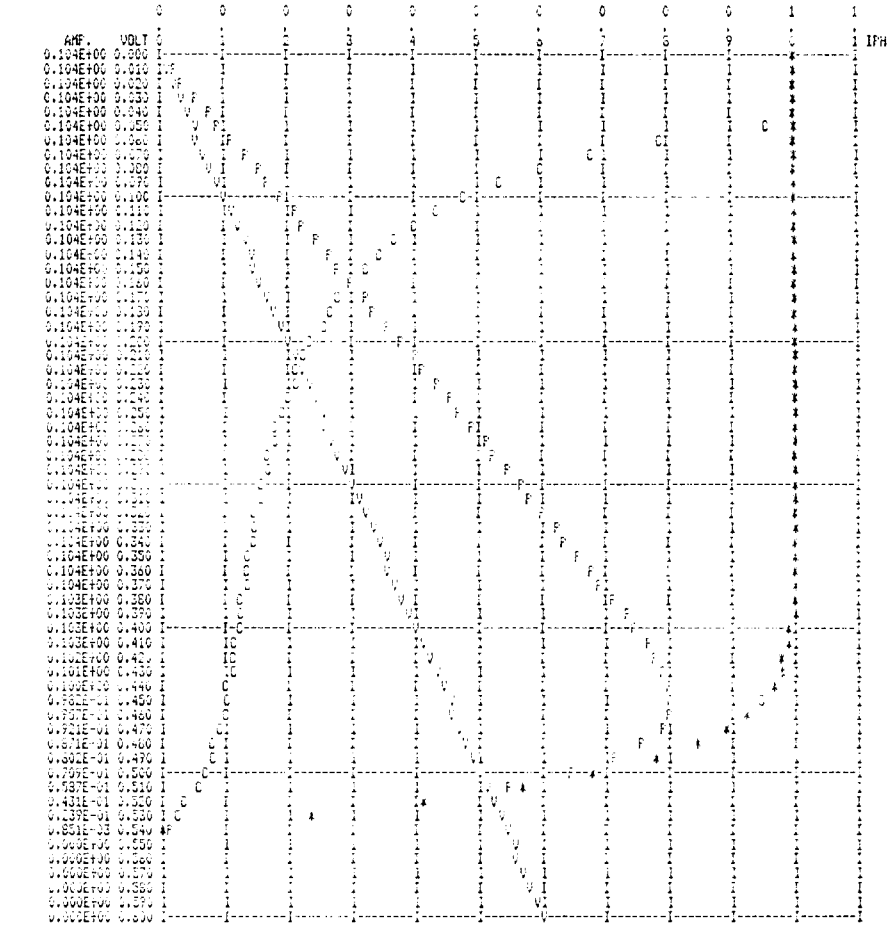


그림 4. 광전류의 분광특성. A,D,B는 각각  $N^+$  영역  $N^+P$  접합부,  $P^+$  영역에서 생성된 광전류를 나타내고, T, Q, M, H는 각각 전체 광전류, 양자효율, 광자플럭스, 일사강도의 스펙트럼을 나타낸다.

Fig. 4. Spectral characteristics of photo current. A, D, B indicate the photo current generated from the  $N^+$ ,  $N^+P$  junction, and  $P^+$  area respectively. T, Q, M, H are total photo current, quantum efficiency, photon flux, and insolated energy spectrum.

I - V CURVE OF SOLAR CELL



NOTE: \* - load CURRENT    I - generated POWER from cell    V - VOLTAGE across load    C - CONDUCTANCE of load resistor  
 --- ALL ENTRY are displayed in relatively NORMALIZED values. ---

SHORT CIRCUIT CURRENT= 0.104E+00 AMP.    OPEN CIRCUIT VOLTAGE= 0.540 VOLT    P MAX= 0.442E-01 WATT  
 I MAX= 0.852E-01 AMP.    V MAX= 0.450 VOLT    FF= 0.788    EFFICIECY= 13.16 %  
 TOT COLL.EFF= 47.42 %    IS= 0.41E-09 AMP.    I001= 0.87E-10 AMP.    I002= 0.32E-07 AMP.  
 SHMNA= 1.294    RS= 0.15 OHM    RSH= 35000.0 OHM    T= 300.0 KELVIN DEGREE  
 NI= 0.1000E+01 WATT/M\*CM    CUM= 0.555    SA= 0.100E+08 M/SEC    SB= 0.100E+03 M/SEC  
 SD= 0.100E+11 M/SEC    E-FIELD/FR= 0.100E+06 V/M    E-FIELD/RSUB= 0.000E+00 V/M  
 E-FIELD/EN= 0.100E+06 V/M    T/FE: NPP/PWM CELL    (AR COATED CELL)

그림 5. I - V 특성곡선의 예, \*, P, V, C 는 각각 외부 부하가 변할때의 전류, 전력, 전압과 부하저항값의 역수를 나타낸다.

Fig. 5. An example of I-V characteristics, \*, P, V and C stand for current, power, voltage drop and inverse of the load resistance respectively.

시이트 저항과 접합 길이로부터 "전기전도도에 대한 평균값"으로 특징지을 수 있다. 즉, 확산층의 평균 비저항  $\langle \rho \rangle$  는 다음과 같이 정해진다.

$$\langle \rho \rangle = x_j / q \int_0^{x_j} \mu \cdot N \cdot dx = R_{\square} \cdot x_j \quad (23)$$

이 프로그램에서는 평균비 저항으로부터 산출된 평균 도오핑 농도를 사용했으며 기타 이동도나 확산계수는 주어진 도오핑 농도에 따라, 다른 문헌들<sup>[2,7,8,9,10]</sup>에서 발표된 데이터들을 참고하였다. 그리고 전장은 N<sup>+</sup> 층과 P<sup>+</sup> 층 내에서는 일정하다고 보고 크기를 0 ~

10000 v/cm 의 범위에서 변화시켰다.

6) 실측치와의 비교를 통한 입력파라미터들의 조정

이 프로그램의 입력파라미터들 중 직접적인 측정이 매우 어려운 파라미터인 앞, 뒷면에서의 표면 재결합 속도 ( $S_a, S_c$ ) 와  $N^+P, PP^+$  접합부의 공핍층에서의 캐리어의 유효수명 ( $\tau_{01}, \tau_{02}$ ),  $N^+$  층과  $P, P^+$  층에서의 전장의 세기 ( $E_a, E_b, E_c$ ) 에 대하여는 계산한 결과를 실제치와 비교함으로써 간접적으로 결정하거나 다른 문헌들에서 널리 인용되는 전형적인 값을 주어야 한다. 이 중 전지의 전기적인 특성에 비교적 크게 영향을 미치는 파라미터들인  $S_b$  와  $\tau_{01}, \tau_{02}$  에 대하여는 위의 간접적 측정방법에 의하여 그 값을 주의깊게 결정해야 하는데  $S_a$  의 값은 실측치에서 쉽게 얻어지는 분광반응, 내적 양자효율과 계산결과를 같이 비교하여 단파장쪽에서의 곡선모양을 일치시키면 구해진다.  $\tau_{01}$  와  $\tau_{02}$  값의 결정은 I-V 곡선에서 실측치와 계산치에서 최대전력점에서의 다이오드 상수 ( $\gamma$ ) 값과 포화암전류 ( $I_{D0}$ ) 값들을 실측치와 일치시키는 방법을 택하였다. 전장의 세기  $E_a, E_c$  에 대하여는 다른 문헌들 [4,10]에서 인용되는 값들 중 전형적인 것을 택하였고  $S_c$  는 뒷표면의 오염성 접촉을 고려하여 충분히 큰 값 ( $10^{12}$  cm/sec) 으로,  $E_b$  는 P 층이 일정한 도오핑 농도이므로 0으로 하였다.

III. 모의 실험결과 및 논의

본 프로그램을 실제 우리가 제작한 전지층의 하나인  $N^+PP^+$  형 전지의 경우에 적용시켜 실제 측정된 값과 단락전류, 개방전압, 충실도, 효율, 포화암전류, 다이오드 상수 등에 대하여 비교하면 표 1 과 같으며 표 1 의 데이터를 얻기 위하여 넣은 입력 파라미터들은 표 2 에 나타나 있다. NPP-24, NPP-30, LSR-10 은 실제 제작된 전지들이며<sup>[1]</sup>, Normal cell, Good cell, Ideal cell 은 각각 실제 제작된 전지와 비슷한 정도인 표준전지, 공정을 더욱 개선함으로써 제작이 가능한 전지, 그리고 이론적인 최대 효율을 주는 이상적인 전지들이다. 표 2 에 있는 파라미터들 중 각 영역에서의 평균 도오핑 농도 ( $N_a, N_b, N_c$ ) 와 접합깊이 ( $x_{jt}, x_{jb}$ ), 직렬저항 ( $R_s$ ), 누설저항 ( $R_{sh}$ ), 전지두께 ( $t$ ), 동작온도 ( $T$ ), 전지면적 ( $S$ ), 집광도 ( $C$ ) 등은 측정된 값이거나 이미 주어진 값들이고 표면 재결합속도 ( $S_a, S_c$ ),  $N^+$  층과  $P^+$  층 내부의 전장의 세기 ( $E_a, E_b$ ) 등은 다른 문헌들 [2,4,6] 에서 인용된 값들이다.

이 모의 실험의 결과중 NPP-30 전지의 광전류와

내적 양자 효율에 관한 분광 분포는 한국표준 연구소에서 측정한 실측치와 비교할 때, 그림 6에서 보는 바와 같이 일치가 잘됨을 알 수 있다.

표 1. 계산결과치와 측정치와의 비교, 이의 입력 파라미터들이 표 2에 나와 있으며 괄호 안은 실측치이다.

Table 1. Comparison of the calculated and the measured values for various solar cells. The numbers in parenthesis indicate measured values. The input parameters for these data are shown in Table 2.

전기적 파라미터 전지	$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (Volt)	FF	$\eta_T$ (%)	$\eta_A$ (%)	$J_{D0}$ ( $\frac{pA}{cm^2}$ )	$\gamma$
NPP-24	106 (107)	0.552 (0.556)	0.797 (0.790)	13.9 (13.5)	15.4 (15.0)	2.6 (2.0)	1.03 (1.1)
NPP-30	104 (99)	0.540 (0.543)	0.788 (0.799)	13.2 (12.8)	14.6 (14.2)	12.2 (5.0)	1.09 (1.2)
LSR-10	104 (103)	0.587 (0.585)	0.807 (0.801)	14.7 (14.4)	16.3 (16.0)	5.1 (1.5)	1.14 (1.11)
Normal Cell	86	0.681	0.831	14.4	16.0	3.6	1.07
Good Cell	93	0.688	0.835	16.0	17.8	2.2	1.05
Ideal Cell	106	0.701	0.846	19.5	21.6	$5.4 \times 10^{-2}$	100

모의 실험에서 입력파라미터들은 주어진 범위에서 최대 효율을 찾을 수 있는 최적조건 파라미터와 효율이 크게 저하되지 않는 한계치를 줄 수 있는 한계 허용치 파라미터, 그리고 파라미터들의 변화에 따라 어느 범위에서 거의 일정하게 효율이 증감하는 비례변동 파라미터들로 분류될 수 있다. 이를  $N^+PP^+$  형 확산전지를 중심으로 기술하면 다음과 같은 결론을 얻는다.

1) 최적 조건 파라미터

(1) 기관의 도오핑 농도

기관의 보론 농도는 높을수록 전류는 감소하나 개방전압과 충실도가 상승한다. 본 모의 실험의 결과, 그림 7에서 보듯이 너리 다른 조건하에서도  $1 \times 10^{17} \sim 5 \times 10^{17}/cm^3$  일때 최대효율을 나타낸다. 이는 도오핑 농도가  $10^{17}/cm^3$  근처부터 수명이나 확산거리가 급격히 감소하기 시작하는데 기인한다.

(2)  $N^+$  층의 도오핑 농도

$N^+$  층의 도오핑 농도가 높으면 개방전압과 충실도는 향상되어 일반적으로 높은 효율을 얻을 수 있으나 실제 제작에 있어서는 접합 깊이의 조정이 어렵고, 도오핑

표 2. 모의 실험에 사용된 입력 파라미터. Ideal cell에 있어서 앞 표면에서의 광반사는 없고, 이 이외의 전지들은  $\text{Si}_3\text{N}_4$  로 750 Å 되게 AR coating 한 경우이다.

Table 2. Input parameters for solar cell simulations. There is no reflection of light for the ideal cell and 750 Å silicon nitride for the other cells.

입력 파라미터 전지	$N_a$ (/cm <sup>3</sup> )	$N_b$ (/cm <sup>3</sup> )	$N_c$ (/cm <sup>3</sup> )	$\mu_a$ ( $\frac{\text{cm}^2}{\text{v}\cdot\text{sec}}$ )	$\mu_b$ ( $\frac{\text{cm}^2}{\text{v}\cdot\text{sec}}$ )	$\mu_c$ ( $\frac{\text{cm}^2}{\text{v}\cdot\text{sec}}$ )	$L_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_b$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_c$ ( $\mu\text{m}$ )	$x_{if}$ ( $\mu\text{m}$ )	$x_{jb}$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_a$ ( $\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ )	$S_c$ ( $\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ )
NPP - 24	$3.5 \times 10^{19}$	$1.5 \times 10^{15}$	$4.5 \times 10^{19}$	54.0	1230	104	2.98	315	3.85	0.46	7.0	$1.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^{12}$
NPP - 30	$4.0 \times 10^{19}$	$1.5 \times 10^{15}$	$4.5 \times 10^{19}$	53.0	1230	104	2.75	315	3.85	0.46	7.0	$1.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^{12}$
LSR - 10	$3.0 \times 10^{19}$	$7.0 \times 10^{15}$	$4.5 \times 10^{19}$	55.5	1040	104	3.26	279	3.85	0.46	7.0	$1.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^{12}$
Normal cell	$3.0 \times 10^{19}$	$5.0 \times 10^{17}$	$1.5 \times 10^{19}$	55.5	369	131	3.28	90.9	9.47	0.40	5.0	$1.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^{12}$
Good cell	$3.0 \times 10^{19}$	$3.0 \times 10^{17}$	$1.5 \times 10^{19}$	55.5	436	131	3.28	115	9.47	0.3	5.0	$1.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^{12}$
Ideal cell	$1.0 \times 10^{20}$	$3.0 \times 10^{17}$	$1.0 \times 10^{20}$	47.6	436	99.6	1.59	115	2.02	0.1	5.0	0	0

입력 파라미터 전지	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	$\tau_{01}$ (sec)	$\tau_{02}$ (sec)	t (mil)	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	S (cm <sup>2</sup> )	m	$H_i$ ( $\frac{\text{mw}}{\text{cm}^2}$ )	$E_a$ ( $\frac{\text{v}}{\text{cm}}$ )	$E_b$ ( $\frac{\text{v}}{\text{cm}}$ )	$E_c$ ( $\frac{\text{v}}{\text{cm}}$ )
NPP - 24	0.11	36 K	$1.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-7}$	13	27	3.36	0.1	100 GE-ELH 107v	1000	0	1000
NPP - 30	0.15	35 K	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-9}$	13	27	3.36	0.1	100 GE-ELH 107v	1000	0	1000
LSR - 10	0.11	25 K	$1.0 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-9}$	7	27	3.36	0.1	100 GE-ELH 107v	1000	0	1000
Normal cell	0.015	10 K	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-9}$	13	27	3.36	0.1	100 AM1	0	0	0
Good cell	0.010	50 K	$1.0 \times 10^{-3}$	$\infty$	4	27	3.36	0.1	100 AM1	0	0	0
Ideal cell	0	50 K	$\infty$	$\infty$	3	27	3.36	0	86.4 AM1	1000	0	1000

농도가 너무 높으면 캐리어의 수명 단축으로 단락전류가 감소된다. 그림 7에서는 평균 도오핑 농도가  $5 \times 10^{19} \sim 5 \times 10^{20} / \text{cm}^3$  에서 최대효율을 보여 주었다. 이 영역은 실제 확산을 할 때 0.3  $\mu\text{m}$  이하의 접합깊이를 얻기 어렵게 하는 범위이다.

(3) 전지

광생성된 캐리어가 뒷면에서 거의 재결합으로 손실되지 않는다는 전제하에서는 그림 8에서 보는 바와 같이 전지의 두께가 보통 2 ~ 5 mil 정도에서 가장 높은

효율을 나타내었다. 그러나 뒷면에서의 확산층이 없는 N<sup>+</sup>P 전지에서는 뒷표면에서의 캐리어의 재결합 속도는 매우 크므로 전지의 두께는 적어도 10 mil 이상은 되어야 한다. 본 모의 실험의 결과에서 이 두 “얇은 전지형”과 “두꺼운 전지형”의 분기점은 뒷표면 재결합 속도가  $10^2 \text{ cm/sec}$  에서 일어남을 나타내 주었다.

(4) 집광도

집광도가 증가하면 단락전류가 집광도에 거의 비례



하여 증가하고 개방 전압도 상승하여 효율이 증가한다. 그러나 직렬 저항이 크면 전압이 손실되고 절보기 암전류가 증가하여 개방전압의 상승은 기대할 수 없고 총 실효도가 매우 저하된다. 그림 9에서 86.4 mw/cm<sup>2</sup>의

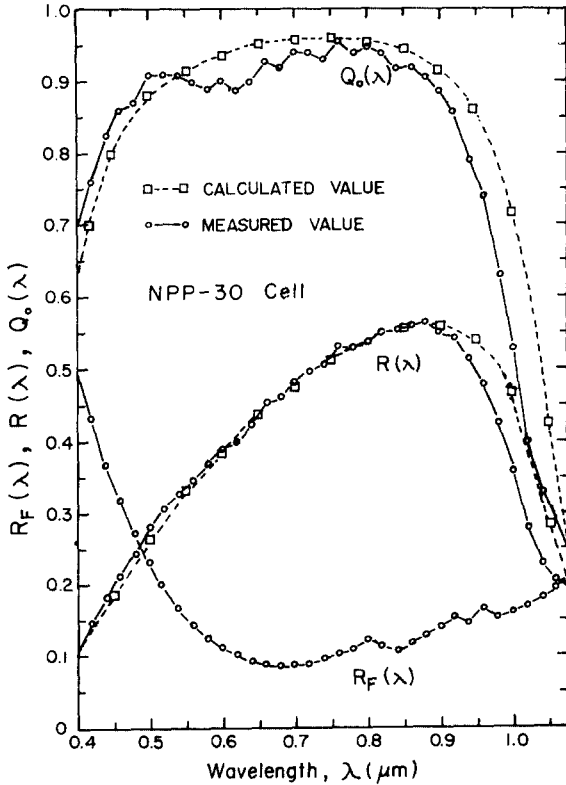


그림 6. 표면 광반사율 ( $R_F$ ), 광전류의 분광반응 ( $R$ ) 및 내적 양자효율 ( $Q_0$ )에 관한 계산치와 측정치의 비교

Fig. 6. A comparison of the calculated and the measured values for the surface reflectance ( $R_F$ ), spectral response of photo current ( $R$ ) and internal quantum efficiency ( $Q_0$ ).

AM1 태양스펙트럼을 단위로 하여 최대 효율을 주는 집광도  $C_{max}$  는 직렬저항의 크기에 따라 집광도가 20 Suns 이하에서  $C_{max} = (1.1 \sim 0.2) / (R_s \cdot S)$  Suns /  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  가 성립함을 발견하였다.

(5)  $N^+$  층의 접합깊이

전체적으로 볼때  $N^+$  층의 접합깊이는 적당한 도오핑농도를 유지하면서 얇아수록 광전류에 있어서 앞 표면 재결합에 의한 영향이 덜 미치게 되고, 캐리어의 수집효율이 높은 뒷 영역의 이용이 좋아지기 때문에 단락

전류의 증대로 효율이 향상된다. 본 모의 실험의 결과는, 그림 10에서 보듯이 캐리어의 재결합 속도가  $10^2$  cm/sec 이상으로 클때에는 암전류의 증가로 인하여 접합깊이가 보통  $0.05 \sim 0.15 \mu\text{m}$  정도일때 최대를 보여 주었다. 그러나 실제에 있어서는 앞면의 재결합 속

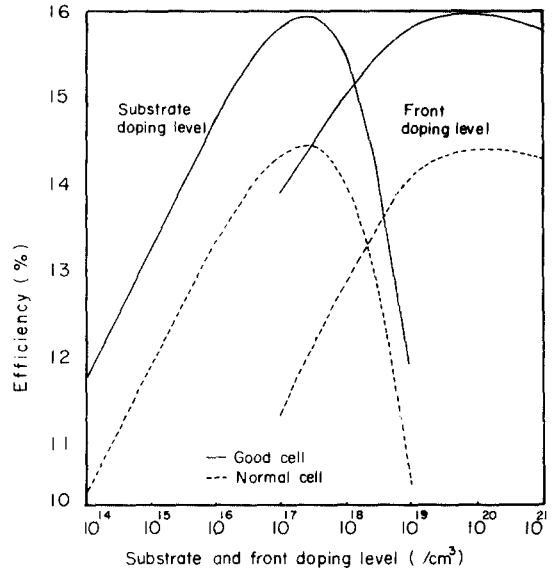


그림 7. 기판과  $N^+$  영역의 도오핑 농도에 따른 효율의 변화

Fig. 7. Efficiency depending upon doping concentrations of the substrate and  $N^+$  region.

도는  $10^6$  cm/sec 정도이므로 접합깊이는  $0.3 \mu\text{m}$  이하로 얇게하면 좋다. 그러나 앞면에서의 재결합 속도가  $10^4$  cm/sec 이하에서는 접합깊이에 따른 영향은 작아져서  $\Delta\eta/\Delta x_j$  는  $-0.8\%/ \mu\text{m}$  미만이었다.

뒷  $P^+$  층의 접합깊이는 현재의 공정한제인  $5 \sim 10 \mu\text{m}$  정도로 하였으나 효율에는 영향을 주지 못했다. 이는 뒷  $P^+$  영역에서 생성된 광전류의 1% 미만에 불과하기 때문이다. 이 뒷면  $P^+$  층의 역할은 현재의 전지의 구조상으로 볼때 간접적인 것으로서  $P$  영역 뒷쪽에서 생성된 캐리어들이 뒷면에서 재결합 되는 것을 방지하며, 암전류를 작게 하고, 동작전압에서 뒷면에서의 금속과 실리콘 사이의 접촉저항을 줄여 주는 데 있다. 그러나  $P^+$  층이 앞면에서  $100 \mu\text{m}$  이하까지 접근하면 이 층에 있는 전체의 도움으로 광전류의 증대효과도 얻을 수 있다.

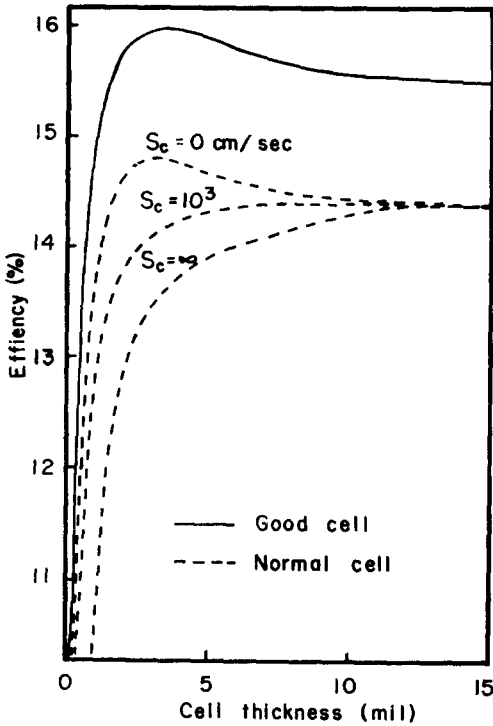


그림 8. 셀지의 두께에 따른 효율의 변화  
Fig. 8. Efficiency versus cell thickness.

2) 한계 허용치 파라미터

(1) 앞표면 재결합 속도

앞표면 재결합 속도가 크면 우선 단락전류가 크게 감소하고 암전류도 증대하게 된다. 본 모의 실험에서는 보통  $10^4 \text{ cm/sec}$  정도에서 부터 효율이 급격하게 저하됨을 보여 주었다.

(2) 뒷표면 재결합 속도

뒷표면 재결합 속도는 PP+ 접합면과 전지 뒷면 등 두가지로 나누어 볼 수 있다. 전지 뒷면에서의 재결합 속도는 실리콘과 금속간의 오음성 접촉이므로 매우 크다고 할 수 있다. 그러나 PP+ 접합면에서의 재결합 속도는 P 층에서 볼때 PP+ 접합이 잉여캐리어를 얼마만 확보준해 줄 수 있는가를 말해 주는 개념적인 지표로서 접합의 구조에 따라 차이가 있다. 본 모의 실험에서는 PP+ 접합은 P 층에서 볼때는 뒷표면 재결합면으로 파악했고 P+ 층에서 볼때는 잉여캐리어의 드레인으로 가정한 것을 토대로 하고 있음을 이론의 전개식에서 보았다.

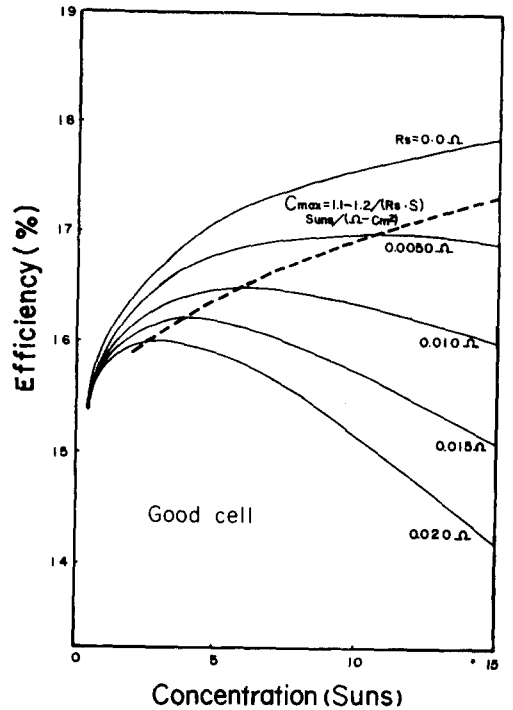


그림 9. AM1 스펙트럼의 집광도(C)에 따른 효율의 변화,  $C = 1$  일때  $86.35 \text{ mw/cm}^2$  이며,  $C_{max}$  는 특정  $R_s$  에서 최대효율을 주는 집광도를 나타낸다.

Fig. 9. Efficiency variation depending on concentration of AM1 spectrum, C is unity with  $86.35 \text{ mw/cm}^2$  of light intensity, and  $C_{max}$  stands for the concentration yielding maximum efficiency with a certain  $R_s$ .

여러 조건에서 모의 실험한 결과는 PP+ 접합면에서의 재결합 속도가  $0 \sim 10^2 \text{ cm/sec}$  영역에서 효율의 변화가 거의 없이 일정하고  $10^2 \text{ cm/sec} \sim 10^4 \text{ cm/sec}$  에서는 급격히 떨어지며,  $10^4 \text{ cm/sec}$  이상의 영역에서는 다시 일정해짐을 보여 주었다.

(3) 접합부에서의 캐리어의 평균수명

N+P 접합부에서의 접합쪽 전체에 대한 캐리어의 평균수명이  $10 \mu\text{sec}$  까지는 효율에 미치는 영향은 거의 없었다. 그러나 그 이하이면 다이오드 상수( $\gamma$ )가 약 1.5 가 되고 충실도가 격감했다.

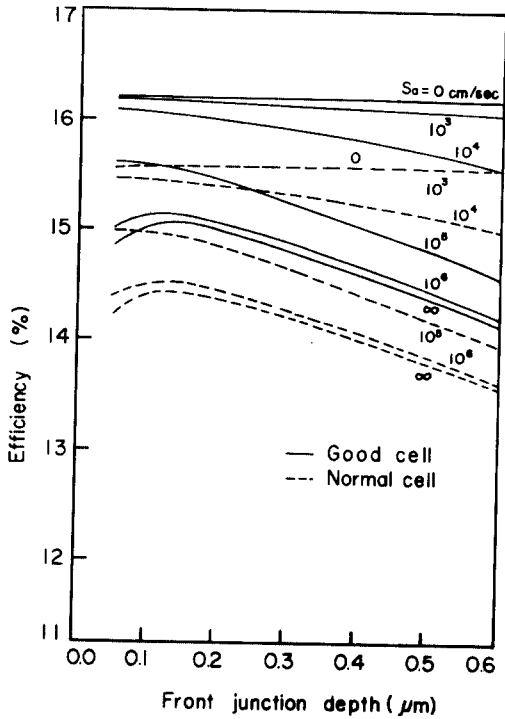


그림 10. 앞면의 접합깊이에 따른 효율의 변화  
**Fig. 10.** Efficiency versus front junction depth.

(4) 누설저항

누설저항이 작으면 주로 충실도와 개방전압에서 큰 손실을 가져온다. 본 모의 실험의 결과는 보통  $R_{sh} \cdot S > 10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$  이면 효율이 보존됨을 보여 주었다.

3) 비례변동 파라미터

(1) 동작온도

온도가 상승하면 단락전류는 거의 변화가 없으나 개방전압과 충실도가 저하되어 효율이 감소하게 되고 이 경향은 좋은 전지에서 더욱 심하다. 이는 진성 캐리어의 증가가 직접 암전류에 크게 영향을 미치기 때문이다. 본 모의 실험의 결과인 그림 11에서는 온도 상승에 따른 효율감이 보통  $-0.05 \sim -0.07 \text{ \%}/^\circ\text{C}$  임을 보여 주었다.

(2) 직렬저항

직렬저항이 증가하면 주로 충실도에만 영향을 미치는데 집광도가 크게 되면 개방전압에도 영향을 미친다.

그림 12에서  $100 \text{ mw}/\text{cm}^2$  의 일사강도를 가진 AM1 스펙트럼이 입사할때 직렬저항의 증가로 나타난 효율의 감소율은 보통  $-0.5 \sim -0.7 \text{ \%}/\Omega \cdot \text{cm}^2$  임을 보여 주고 있다.

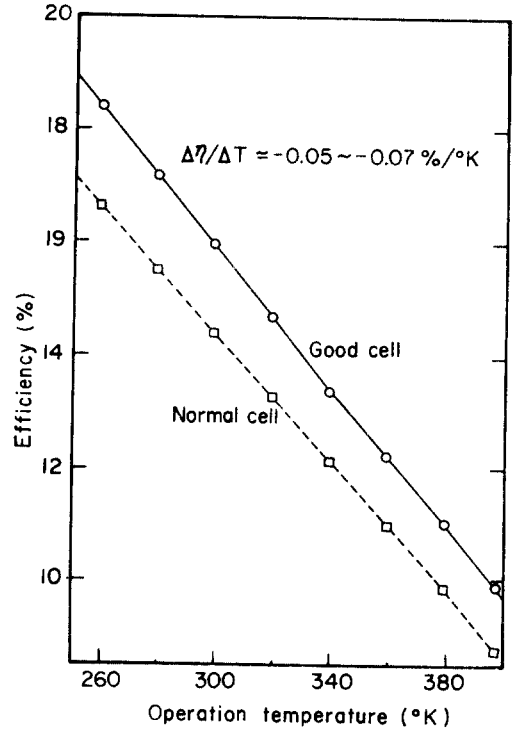


그림 11. 동작온도에 따른 효율의 변화  
**Fig. 11.** Efficiency versus operation temperature.

(3)  $N^+$  층에서의 전계

실리콘 내의 불균일한 도오핑 농도에 기인한 전계는  $N^+P$  접합부와  $PP^+$  접합부, 그리고  $N^+$  층과  $P^+$  층 내부에 존재하게 된다. 이 모의 실험의 광전류의 계산에서는 접합부에는 전계가 매우 커서 캐리어의 이동이 전계에 의하여 지배되어 전자 - 정공 쌍이 분리되며,  $N^+$  층과  $P^+$  층에서는 캐리어가 전계의 도움을 받아 주로 확산에 의하여 이동함을 기초로 하고 있다. 여기서  $P^+$  층 내부의 전계는 전체 광전류에 대한 기여가 작으므로 무시하고  $N^+$  층 내부에서의 전계를 특징적인 값  $500 \text{ v}/\text{cm}$  을 중심으로  $10000 \text{ v}/\text{cm}$  까지 변화시켜 가면서 효율 변화를 보았다. 그 결과  $100 \sim 10000 \text{ v}/\text{cm}$  사이에서 전장의 세기에 따른 효율 증가는  $0.15 \text{ \%}/\log(\text{v}/\text{cm})$  정도가 되었다.

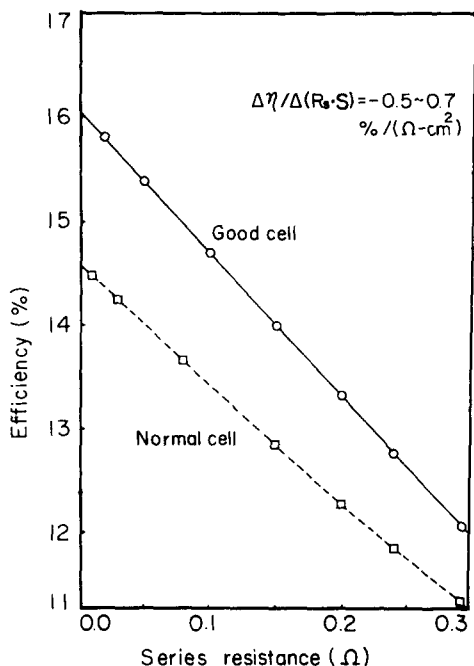


그림 12. 직렬저항에 따른 효율의 변화  
**Fig. 12.** Efficiency versus series resistance.

IV. 結 論

본 연구에서는 확산형 N+PP+ 형 전지를 모형으로 하여 태양전지를 특징짓는 프로그램을 만들어 실험 데이터와 일치시키고 최대 효율을 주기 위한 파라미터들의 범위를 논의하였다. 그 결과 기판의 도오핑 농도, N+ 층의 평균 도오핑 농도, 전지의 두께, 집광도, N+ 층의 접합깊이 등에 대한 최적치를 구하였으며, 다음으로 앞면과 PP+ 접합면에서의 표면 재결합 속도와 N+P 접합부에서의 캐리어의 평균수명, 그리고 누설저항에 대하여는 한계 허용치를 정하였다. 마지막으로 동작온도와 직렬저항, N+ 층 내부에서의 전장의 세기에 대하여는 각각 이들에 대한 효율변화율로써 정량적인 분석을 하였다. 이들 파라미터들을 다시 요약하여 정리하면 다음과 같다.

- 1) P 층의 최적 도오핑 농도는  $1 \times 10^{17} \sim 5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$  이다.
- 2) N+ 층의 최적 도오핑 농도는  $5 \times 10^{19} \sim 5 \times 10^{20}/\text{cm}^3$  이다.
- 3) 앞면 접합깊이 ( $x_{jf}$ ) 는 알을수록 좋으나 앞면 재결합 속도가  $10^6 \text{ cm/sec}$  이상일 때에는 0.05 ~

0.15  $\mu\text{m}$  일때가 가장 좋다.

- 4) 이상적인 뒷표면 전계형 전지의 두께의 최적치는 2~5 mil 이다.
- 5) 앞표면 재결합 속도( $S_a$ ) 는  $10^3 \text{ cm/sec}$  이하이면 효율에 거의 영향을 미치지 않는다.
- 6) PP+ 접합면에서의 재결합 속도는  $10^2 \text{ cm/sec}$  이하이면 효율에 거의 영향을 미치지 않는다.
- 7) N+P 접합부에서의 캐리어의 평균수명 ( $\tau_{01}$ ) 이 10  $\mu\text{sec}$  이상이면 충실도에 큰 영향을 미치지 않는다.
- 8) 온도 상승에 따른 효율감률 ( $\Delta\eta/\Delta T$ ) 은 -0.05 ~ -0.07 %/°C 이다.
- 9) 직렬저항의 증가에 따른 효율감률 ( $\Delta\eta/\Delta(R_s \cdot S)$ ) 은 -0.5 ~ -0.7 %/( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) 이다.
- 10) 누설저항이 효율에 미치는 영향은  $R_{sh} \cdot S > 10 \text{ k} \Omega \cdot \text{cm}^2$  인 범위에서는 거의 없다.
- 11) 최대광출력을 주는 AM 1의 집광도 ( $C_{max}$ ) 는  $C_{max} = (1.2 \sim 1.2) / (R_s \cdot S) \text{ Suns}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$  의 조건에서 얻어진다.
- 12) 뒷면 전계층에서의 전계에 의한 효율변화는 전장의 세기가  $10000 \text{ v/cm}$  까지 증가할 때 0.3% 정도만 효율 증대를 가져온다.

본 논문에서 사용된 컴퓨터 모의 실험 프로그램을 창의적으로 개발된 것으로 앞으로 꾸준한 개발과 다른 선진의 프로그램과의 교류를 통해 더욱 유용성을 넓혀갈 수 있을 것이다.

參 考 文 獻

1. Jong Duk Lee, et al " High Efficiency Solar Cell (I) - Fabrication and Characteristics of N+ PP+ Cell ", J. of KIEE, Vol. 18, No. 3, Jan. 1981.
2. J. G. Frey, " Photovoltaic Power Generation ", Van Nostrand Reinhold Company, N. Y., 1975, PP. 19-113.
3. W. L. 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, August 15, 1955, PP. 1154.
4. H. J. Hovel, " Semiconductor and Semimetals ", Vol. II, Solar Cells, Academic Press, N. Y., 1975, PP. 29 - 52.

5. P. T. Landsberg and J. R. Mallinson, "Thermodynamic Constraints, Effective Temperatures and Solar Cells", Photovoltaic Solar Energy Conference, Toulouse, 1976, PP. 32.
6. D. Redfield, "Unified Model of Fundamental Limitations on the Performance of Silicon Solar Cells", IEEE Trans., Vol. ED-27, No. 4, April, 1980, PP. 768-769.
7. S. M. Sze and J. C. Irvin, "Resistivity, Mobility and Impurity Levels in GaAs, Ge and Si at 300°K", Solid State Electronics, Vol. 11, 1968, PP. 600.
8. P. A. Iles and S. I. Soclof, "Effect of Impurity Doping Concentration on Solar Cell Output", IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1975, PP. 23.
9. M. Wolf, "Updating the Limit Efficiency of Silicon Solar Cells", IEEE Trans., Vol. ED-27, No. 4, April, 1980, PP. 751-759.
10. R. S. Muller and T. I. Kamins, "Device Electronics for Integrated Circuits.", John Wiley & Sons, 1977, PP. 24-175.

