

# 高低 接合 에미터 構造를 갖는 $N^+NPP^+$ Si 太陽電池의 效率 改善

## (Efficiency Improvement of $N^+NPP^+$ Si Solar Cell with High Low Junction Emitter Structure)

張志根\*, 金鳳烈\*\*

(Gee Keun Chang and Bong Ryl Kim)

### 要 約

비저항이  $10\ \Omega\text{-cm}$ , 두께가 13~15mil인 (111) oriented, P형 Si기판을 이용하여  $N^+PP^+$  BSF 전지와 에미터 영역이  $N^+N$  고저 접합으로 이루어진  $N^+NPP^+$  HLEBSF(high low emitter back surface field) 전지를 설계 제작하였다. 접합형 태양전지의 에미터 영역에서 고저 접합구조가 효율 개선에 미치는 영향을 검토하기 위해 HLEBSF 전지의 N영역을 제외하고는 같은 마스크와 동시 공정을 통해  $N^+PP^+$  전지와  $N^+NPP^+$  전지의 각 영역에서 물리적 파라미터들(불순물 농도, 두께)을 동일하게 만들었다.  $100\ \text{mW/cm}^2$ 의 인공조명에서 측정된 결과  $N^+PP^+$  전지들의 전면적(유효 수광면적) 평균 변환효율이 10.94% (12.16%)이었고,  $N^+NPP^+$  전지들의 평균 변환효율은 12.07% (13.41%)로 나타났다.  $N^+NPP^+$  전지의 효율개선은  $N^+N$ -고저 접합 에미터 구조가  $N^+$  에미터 영역에서 나타나는 heavy doping effects를 제거함으로써 에미터 재결합 전류의 증가를 억제하고 나아가 개방전압( $V_{oc}$ )과 단락전류( $I_{sh}$ )의 값을 증가시켜 준 결과로 볼 수 있다.

### Abstract

$N^+NPP^+$  HLEBSF (high low emitter back surface field) solar cells which have  $N^+N$  high low junction in the emitter as well as  $N^+PP^+$  BSF cells were designed and fabricated by using (111) oriented P type Si wafers with the resistivity of  $10\ \Omega\text{-cm}$  and the thickness of 13-15 mil. Physical parameters (impurity concentration, thickness) at each region of  $N^+PP^+$  and  $N^+NPP^+$  cell were made equally through same masks and simultaneous process except N region of HLEBSF cell to investigate the high low emitter junction effect for efficiency improvement.

Under the light intensity of  $100\ \text{mW/cm}^2$ , total area (active area) conversion efficiency were typically 10.94% (12.16%) for  $N^+PP^+$  BSF cells and 12.07% (13.41%) for  $N^+NPP^+$  cells. Efficiency improvement of  $N^+NPP^+$  cell which has high low emitter junction structure is resulted from the suppression of emitter recombination current and the increasement of open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) and short circuit current ( $I_{sh}$ ) by removing heavy doping effects occurring in  $N^+$  emitter region.

\*正會員, 檀國大學校 理工大學 電子工學科  
(Dept. of Electron. Eng., Dankook Univ.)

\*\*正會員, 延世大學校 工科大學 電子工學科  
(Dept. of Electron. Eng., Yonsei Univ.)

接受日字: 1983年 12月 21日

(※ 이 論文은 1983年度 檀國大學校 教授研究支援費의 後援을 받아 遂行되었음.)

### I. 序 論

광 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 태양전지의 개발에서 가장 중요한 두 가지 측면은 제조단가의 저렴화와 높은 전력 변환효율을 얻는데 있다. 오늘날 소자의 산업적 생산과 관련되어 공정이 용이하고 높은 변환효율을 기대할 수 있는 가장 일반적인 전지로서는

단결정 Si 기판을 사용한 N<sup>+</sup>P 접합형 태양전지를 들 수 있다. 그러나 실제 접합형 Si 태양전지의 효율은 P. Rappaport가 보고한<sup>(1)</sup> 상온에서 이론적 최대 변환 효율(약 22%)에 훨씬 미치지 못하는 실정으로, 이는 전지의 각 영역에서 불순물 농도분포 및 접합깊이, 표면상태와 그리드 전극 형태등에 의해 큰 제한을 받기 때문이다. 보통 N<sup>+</sup>P 전지는 직렬저항을 감소시키고 단과장 영역의 수집효율을 높이기 위해 N<sup>+</sup> 에미터 영역을 고농도의 얇은 접합구조로 만들게 된다. 그러나 에미터 영역의 고농도 도우핑은 그 영역에서 에너지갭의 축소와 Auger 재결합에 의한 캐리어 수명시간의 감소를 초래하게 된다. F. A. Lindholm<sup>(2)</sup>은 베이스 농도가 10<sup>17</sup>[cm<sup>-3</sup>]인 N<sup>+</sup>P Si 태양전지에서 에미터 재결합 전류가 단순한 PN접합 이론에서 예측되는 것과는 달리 베이스 재결합 전류에 비해 오히려 더 큰값으로 나타남을 보였다. N<sup>+</sup>P 태양전지의 에미터 영역에서 이러한 H. D. E. (heavy doping effects)<sup>(3)</sup>는 결과적으로 암전류 특성에서 역포화전류(I<sub>0</sub>)의 크기를 증가시켜 개방전압(V<sub>oc</sub>)과 단락전류(I<sub>sc</sub>)의 감소를 가져오고 전력 변환효율(η)의 저하를 주는 원인이 된다. 그러므로 고효율 특성을 얻기 위해서는 에미터 영역의 H. D. E.를 효과적으로 제거해야 하는데 이는 전지의 에미터 구조를 N<sup>+</sup> 단일 고농도 형태로 나타내는 대신 N<sup>+</sup>N 고저접합 형태로 나타내면 에미터 영역의 H. D. E.에 의한 암전류 크기의 증가를 효과적으로 억제시킬 수가 있다. 따라서 고저접합 에미터 구조를 갖는 태양전지의 공정설계시 N<sup>+</sup>N 에미터 영역의 물리적 파라미터들(불순물 농도, 두께)을 적당히 조절하면 직렬저항과 광생성 캐리어들의 수집효율을 크게 저하시키지 않고도 암전류의 크기를 현저히 감소시킬 수가 있게 되어 전체적으로 효율의 개선을 가져올 수 있게 된다. 본 연구에서는 뒷 표면 재결합 속도를 줄이기 위해 전지의 뒷면에 B. S. F. (back surface field)층<sup>(4)</sup>을 형성시킨 N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> 전지와 N<sup>+</sup>N PP<sup>+</sup> 전지를 함께 제작하여 이들의 측정, 비교를 통해 효율에 미치는 전지의 고저 접합 에미터 구조효과를 고찰하였다.

II. 효율 요소들에 대한 분석과 Heavy Doping Effects

1. 효율요소들에 대한 분석

태양전지의 효율을 결정하는 기본요소들은 I<sub>sc</sub>, V<sub>oc</sub> 및 충실도(F·F)이며 효율 개선이라함은 이들의 상대적 개선을 의미하게 된다. 전지의 효율을 나타내는 식<sup>(5)</sup>은 입사광 전력을 Pin이라 할때

$$\eta = \frac{F \cdot F \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}} \quad (1)$$

으로 표현된다. 또한 전지의 등가회로<sup>(6)</sup>로부터 직렬 저항을 R<sub>s</sub>, 병렬누설저항을 R<sub>sh</sub>, 광생성전류를 I<sub>ph</sub>라 하고 다이오드 equation을 이용하면 부하를 단락시켰을 때 흐르는 전류(I<sub>sc</sub>)는

$$I_{sc} = \frac{R_{sh}}{R_s + R_{sh}} \left\{ I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q I_{ph} R_s}{nKT}\right) - 1 \right] \right\} \quad (2)$$

이고 개방전압은 R<sub>s</sub>가 적고 R<sub>sh</sub>가 충분히 크다고 볼 때

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (3)$$

로 주어진다. 여기서 I<sub>0</sub>는 역포화 암전류의 크기를 나타내고 n은 ideality factor이다. 전지의 충실도는 R<sub>sh</sub>가 충분히 커서 누설전류를 무시할 수 있을 때 다음과 같이 표현된다.<sup>(6)</sup>

$$F \cdot F = \left| \frac{I}{I_{sc}} \left\{ \left( 1 - \frac{I}{I_{sc}} \frac{R_s}{R_{ch}} \right) + \frac{V_{th}}{V_{oc}} \ln \left[ 1 - \frac{I}{I_{sc}} \left( 1 - \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_{th}} \frac{R_s}{R_{ch}} - 1\right) \right) \right] \right\} \right|_{\text{maximum}} \quad (4)$$

여기서 R<sub>ch</sub>는 특성저항( $\frac{V_{oc}}{I_{sc}}$ ), V<sub>th</sub>는 열평형전압( $\frac{nKT}{q}$ )을 나타내고 maximum은 F·F가 일정한  $\frac{R_s}{R_{ch}}$ ,  $\frac{V_{oc}}{V_{th}}$ 에 대해  $\frac{I}{I_{sc}}$ 의 변화에 따른 (4)식의 최대값으로 주어짐을 의미한다. 그림 1에서는 일반적 태양전지의 F·F를 정규화된 파라미터들,  $\frac{V_{oc}}{V_{th}}$ ,  $\frac{R_s}{R_{ch}}$ 에 의존하는 곡선군들로 나타내었다.

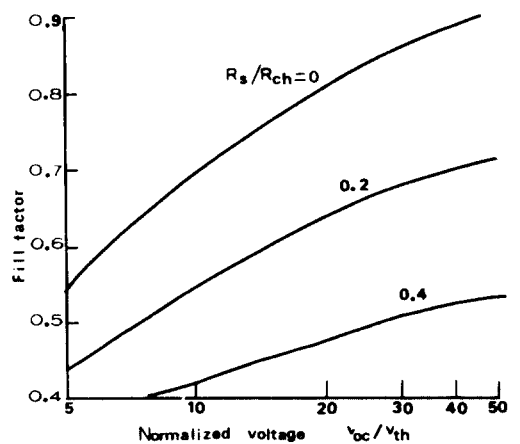


그림 1.  $\frac{R_s}{R_{ch}}$ ,  $\frac{V_{oc}}{V_{th}}$  들을 파라미터로 갖는 태양전지의 충실도 곡선들

Fig. 1. Solar cell fill factor curves as parameters,  $\frac{R_s}{R_{ch}}$  and  $\frac{V_{oc}}{V_{th}}$ .

따라서 식(1)에서 (4)까지의 결과를 볼때 전지의 효율을 증가시키기 위해서는 직렬저항을 감소시키고  $R_{sh}$ 에 의한 누설전류를 없게 하며 동시에 다이오드의 순방향 암전류의 크기를 적게 하고 광생성 전류의 크기를 증가시켜야 한다. 그러나 효율에 영향을 미치는 이들 요소들은 서로 연관되게 나타나, 한 요소의 임의 독립적인 개선은 다른 효율요소들에 영향을 미치므로 최대 효율을 위한 최적 설계는 실제로 매우 어렵지만 이들 요소들의 독립적 개선방법은 다음과 같이 요약할 수 있다.

광생성 전류( $I_{ph}$ ) : 이는  $h\nu \geq E_g$ 인 광자가 전지속으로 입사될때 Si 내부에서 광흡수에 의해 전자 정공쌍이 생성되어 각 영역의 소수 캐리어들이 확산과 전계에 의해 PN접합부 양쪽으로 분리, 이동 되므로써 흐르는 전류이다. 주파수가  $\nu$ 인 광자의 플럭스를  $F(\nu)$ , 전지의 표면반사계수를  $R(\nu)$ , 수집효율을  $Q(\nu)$ 라 하면 광전류는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{ph} = qA \int_0^\infty (1-R(\nu)) \cdot F(\nu) \cdot Q(\nu) d\nu \quad (5)$$

여기서 A는 전지의 유효 수광면적이며,  $I_{ph}$ 의 증가를 위한 인위적 개선책으로는 수광면적 및 표면에서 광반사 방지막(A·R막)을 이용하여 광전달 효과를 최대로 하고 전지의 표면처리와 B. S. F. 층을 갖도록 하며 에미터 층의 두께를 조절하여 광생성 캐리어들의 수집효율을 높여야 한다.

직렬저항( $R_s$ )과 병렬누설저항( $R_{sh}$ ) : 태양전지의  $R_s$ 는 주로 에미터층의 spreading 저항( $R_e$ )과 그리드선을 따라 나타나는 저항성분( $R_g$ )의 합으로 표현되며 그 외 금속-반도체간의 접촉저항과 베이스 영역에서의 저항 및 contact stripe에서 나타나는 저항은 충분히 적어 무시할 수 있다.<sup>[7]</sup>

그림 2와 같은 빗살 무늬형 태양전지의 직렬저항은

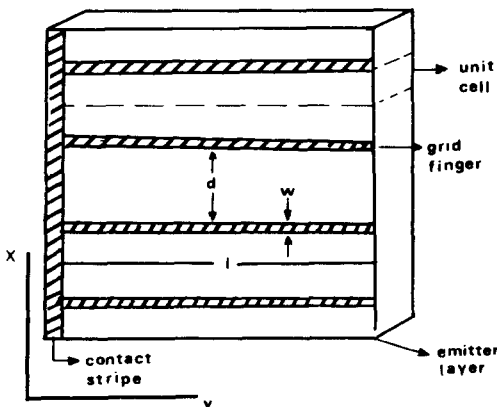


그림 2. 빗살 무늬형 태양전지  
Fig. 2. Comb shaped solar cell.

다음과 같이 계산할 수 있다. 그리드선이 길이( $l$ ), 폭( $w$ ), 등간격( $d$ )로 위치된다고 할때 면적  $\left(\frac{ld}{2}\right)$ 의 단위전지를 취하면 그리드로부터 거리  $x$ 에서 흐르는 전류는  $Jl \left[ \left(\frac{b}{2}\right) - x \right]$ 로 주어지고 단위전지의 에미터 영역에서 소모되는 전력( $P_e$ )은 에미터 영역의 sheet 저항을  $\rho_e$ 라 할 때

$$P_e = \int_0^{d/2} \left[ Jl \left( \frac{d}{2} - x \right) \right]^2 \cdot \rho_e \cdot \frac{dx}{l} \quad (6)$$

이다. 따라서  $P_e$ 를  $I^2 R_e = \left( J \cdot \frac{ld}{2} \right)^2 R_e$ 로 취하면

$$R_e = \rho_e d/6l \quad (7)$$

가 된다. 마찬가지로 그리드선을 따라 소모되는 전력( $P_g$ )은 그리드선을 이등분 했을때 그리드 끝에서부터 거리  $y$ 에 흐르는 전류는  $J \cdot \frac{w}{2} (1-y)$ 이므로

$$P_g = \int_0^1 \left[ J \cdot \frac{w}{2} (1-y) \right]^2 \cdot \rho_m \cdot \frac{dy}{(w/2)} = J^2 \cdot \frac{w}{2} \cdot \rho_m \cdot \frac{l^3}{3} \quad (8)$$

이다. 이를  $(J \cdot \frac{w}{2} l)^2 R_g$ 와 관련시키면

$$R_g = \frac{2}{3} \cdot \frac{\rho_m \cdot l}{w} \quad (9)$$

가 된다. 따라서 전지의 직렬저항은

$$R_s = R_e + R_g = \rho_e \cdot d/6l + \frac{2}{3} \cdot \frac{\rho_m \cdot l}{w} \quad (10)$$

이다. 여기서  $\rho_m$ 은 금속전극의 sheet 저항이다. 식(10)으로부터 직렬저항을 감소시키기 위해서는 에미터 영역의 불순물 농도를 크게 해야 하고 도전성이 좋은 금속을 사용할 것과, 그리드선들의 간격이 좁고 폭이 커야 한다. 그러나 이런 처리는 필연적으로 유효수광면적의 축소와 에미터 영역의 H. D. E. 에 의해 효율의 악영향을 초래하게 된다. 또한 병렬누설저항( $R_{sh}$ )은 전지의 제작시 공정처리의 잘못이나 전지 내부구조의 결함에 의해 발생하는데 보통의 전지에서는 이 값이 충분히 커서 효율 저하에 큰 영향을 미치지 않는다.  $R_{sh}$ 의 개선방안으로는 양호한 기관을 사용하고 공정처리에 세심한 주의를 기울이면 된다.

암전류( $I_D$ ) : 암전류는 전지의 동작시 다이오드의 순방향 전류-전압특성에 따르며 구성성분으로는 주입전류( $I_{in}$ )와 공간전하영역에서 재결합전류( $I_{rec}$ ) 및 터널링 전류( $I_{tun}$ )로 구분된다. 보통 N<sup>+</sup>P형 전지의 암전류는  $I_{tun}$ 을 무시하고  $I_{in}$ 과  $I_{rec}$ 을 캐리어 연속방정식과 전류밀도 방정식으로 부터<sup>[5]</sup> 구하여 표현할 수 있는데, 경제조건을 전자 확산길이에 비해 베이스 폭을 충분히 크다고 보고 전지의 표면에서 재결합 속도를  $S_n^+$ 이라두면 다음과 같이 주어진다.<sup>[8]</sup>

$$I_D = qA \left\{ \frac{D_n^+ n_i^2}{L_n^+ N_n^+} \left( \frac{(S_n^+ L_n^+ / D_n^+) \cosh\left(\frac{W_n^+}{L_n^+}\right)}{(S_n^+ L_n^+ / D_n^+) \sinh\left(\frac{W_n^+}{L_n^+}\right)} + \frac{\sinh\left(\frac{W_n^+}{L_n^+}\right)}{\cosh\left(\frac{W_n^+}{L_n^+}\right)} \right) + \frac{D_p n_i^2}{L_p N_p} \right\} \left[ \exp\left(\frac{qV_j}{KT}\right) - 1 \right] + qA \frac{n_i W_{\Delta E}}{2 \tau} \exp\left(\frac{qV_j}{2KT}\right) \approx I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_j}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (11)$$

위의 식에서  $W_n^+$ ,  $W_{\Delta E}$ 는  $n^+$ 에미터 영역의 폭과 공간전하영역의 폭이고  $V_j$ 는 접합면 양쪽의 전위차이며  $\tau$ 는 공간전하영역에서 캐리어 평균수명시간을 표시한다. 또한  $D_n^+$ ,  $L_n^+$ ,  $N_n^+$ 들은  $n^+$ 영역에서 정공의 확산 계수, 확산길이 및 도우너 불순물 농도이며  $D_p$ ,  $L_p$ ,  $N_p$ 들은 P베이스 영역에서 전자의 확산계수, 확산길이 및 엑셉트 불순물 농도를 나타낸다. 식(11)로부터 에미터 영역에서 반도체의 축퇴(degeneracy)를 고려치 않을 때는  $N_n^+ \gg N_p$ 이므로 암전류성분의 대부분은 베이스 영역의 재결합 전류임을 알 수 있다.

2. Heavy Doping Effects (H. D. E.)

에미터 영역의 불순물 농도가 약  $10^{20}[\text{cm}^{-3}]$  정도를 상회할 때 그 영역에서 반도체는 축퇴되어지고 축퇴된 반도체는 그림 3 과 같이 에너지갭( $E_g$ )의 축소와 결정결합 및 격자 스트레인에 의해 band edge tails를 초래하게 된다.<sup>19), 10)</sup>

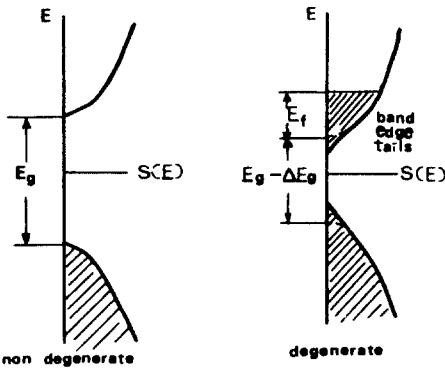


그림 3. 축퇴 및 비축퇴 반도체의 에너지갭과 상태밀도  
Fig. 3. Energy gap and state density of degenerated and non degenerated semiconductors.

진성캐리어 밀도( $n_i$ )는 식(11)에서 보다더없이 전지의 암전류를 결정하는 주요 요소가 되며 재료의 에너지갭과 절대온도에 따라 변화하게 된다.

$$n_i = 3.87 \times 10^{16} \cdot T^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_{g0}}{2KT}\right) \quad (12)$$

비축퇴 Si 반도체에서  $E_{g0}$ 는 1.210[eV] 값을 갖고 평형상태에서 그 내의 전자-정공공은 항상  $n_i^2$  값을 갖게 된다. 그러나 축퇴 반도체는 에너지갭의 축소와 Fermi-Dirac 통계를 적용시켜야 하므로써 평형상태에서  $n \times p$ 는  $n_i \text{eff}^2$ 으로 수정해야 한다.

$$n_i \text{eff}^2 = n_i^2 \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_g}{KT}\right) \cdot \left[ F_{1/2}(E_f/KT) \cdot \exp(E_f/KT) \right] \quad (13)$$

식(13)의 처음 지수항은 에너지갭의 축소를 설명한 것이고 괄호안은 반도체의 degeneracy를 고려해 Fermi-Dirac 통계에 의해 수정된 것이며  $F_{1/2}(E_f/KT)$ 는 Fermi integral이다.

식(13)에서 축소된 에너지갭 양( $\Delta E_g$ )을 band edge tails를 고려해 좀더 엄밀히 고찰하면 band edge tails는 전도대 및 가전자대 가장자리 부근에서 국부적 상태들(localized states)를 형성하고 이들 상태내의 캐리어들은 이동성을 갖지 못하므로 전기 전도성을 결정하는 Mobility 에너지갭<sup>11)</sup>은  $E_g - \Delta E_g$ 보다는 다소 증가하는 것으로 나타난다. 또한 캐리어 평균수명시간은 재결합 방식에 의해 결정되며 비축퇴 Si 반도체에서는 주로 재결합 중심을 이용한 H. S. R. (Hall Schockley Read) 재결합<sup>11)</sup>이 발생한다. 그러나 고농도 도우핑된 영역에서는 좁은 에너지갭에 의해 H. S. R. 재결합 이외에도 직접 재결합으로 나타나는 Radiative 재결합과 Auger 재결합이 존재하게 된다.<sup>11)</sup> 따라서 고농도 도우핑된 영역에서 캐리어 평균수명시간( $\tau$ )은

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{H.S.R.}} + \frac{1}{\tau_{Aug.}} + \frac{1}{\tau_{rad}} \quad (14)$$

로 주어지며,  $\tau$ 의 감소는 특히 캐리어들의 충돌로 나타나는 Auger 재결합에 의해 크게 영향을 받게 된다. 여기서  $\tau_{H.S.R.}$ ,  $\tau_{Aug.}$ ,  $\tau_{rad}$ 들은 H. S. R. 재결합, Auger 재결합 및 radiative 재결합 방식들에 의한 수명시간을 나타내고 있다. 이와같이 고농도 불순물로 도우핑된 영역에서 유효진성캐리어 밀도가 증가하고 평균수명시간이 감소하는 현상(이를 heavy doping effects라함)때문에 태양전지 암전류 특성을 식(11)과 같이 단순하게 나타낼 수 없으며, 에미터 영역에서 나타나는 재결합 전류는 베이스 재결합전류를 오히려 실제적으로 증가하게 된다. 결과적으로  $N^+P$ 형 전지에서 에미터 영역의 H. D. E.는 암전류의 증가를 가져와 식(2)와 (3)에서 알 수 있듯이  $I_{sk}$  및  $V_{oc}$ 의 감소를 초래하고 전체적으로 효율의 저하를 가져오게 한다. 그러므로 에미터 영역에서 H. D. E.에 의한 암전류의 증가를 줄이는 것은 중요한 효율 개선방안의 하나가 될 것이며 이를 위해 에미터 영역의 구조를 고저접합 형태로 나타낸 HLE(high low emitter)태양전지를 생각해 볼

수 있다. H. L. E. 구조에서 금속 전극과 접촉을 이루는 표면 에미터층은 ohmic contact과 낮은 직렬저항을 갖도록 고농도의 얇은 접합깊이로 만들며 P베이스 영역과 접합을 이루는 벌크 에미터층은 낮은 불순물 농도를 갖는 N에피층으로 나타낸다. N에피층의 불순물 농도와 두께에 대한 최적 파라미터들은 좀더 깊이 연구되어야 할 과제이지만 광생성 캐리어들의 확산길이를 고려하여 수집효율을 크게 저하시키지 않는 범위로 이들 파라미터들을 잘 조절하면 이는 암전류 크기를 현저히 줄일 수 있을 것이므로 H. L. E. 구조를 갖는 전지는 일반적 단일고농도 에미터 구조를 갖는 전지에 비해 높은 효율특성을 나타내게 될 것으로 기대된다.

III. 전지의 제작

1. 전지의 설계

실험에 이용될 전지의 종류를 그림 4와 같은 단면구조를 갖는 두개의 전지(N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup>와 N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup>)로 구분하고 이들 전지들의 제작을 위해 그림 5와 같이 4 종류의 마스크들을 설계하였다.

그림 5 (a)의 격리 마스크는 한 장의 Si 웨이퍼상에 몇 개의 독립적 N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup> 전지를 집적시킬 때 (실험에서는 3개를 넣음.) 이들간의 격리를 시키기 위함이며 N<sup>+</sup> 확산 마스크와 유효수광면적을 동일하게 만들기 위해 N<sup>+</sup> 확산 마스크의 패턴과 크기가 같고 명암이 반대가 되도록 설계하였다. 그림 5 (b)의 N<sup>+</sup> 확산 마스크 패턴은 전지의 크기를 결정해 주며 pad 부분을 제외시킬 때 전체 수광면적이  $\frac{154 \times 225}{200} \text{mm}^2$ 으로 주어진다. 그림

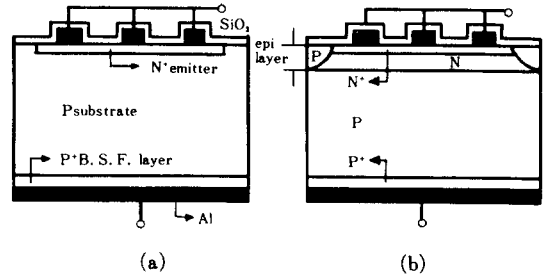


그림 4. N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup>와 N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup> 전지들의 단면도  
(a) N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> 전지 (b) N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup> 전지  
Fig. 4. The cross section view of N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> and N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup> cells.  
(a) N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> cell (b) N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup> cell.

5 (c)의 전극 마스크 패턴에서는 폭이  $\frac{1}{\sqrt{200}} \text{mm}$ , 길이가  $\frac{150}{\sqrt{200}} \text{mm}$ 인 그리드 fingers을  $\frac{10}{\sqrt{200}} \text{mm}$ 의 등간격으로 21개를 배치시키고, 사다리꼴 contact stripe ( $\frac{1}{\sqrt{200}} \text{mm}$ ,  $\frac{4}{\sqrt{200}} \text{mm}$ ,  $\frac{221}{\sqrt{200}} \text{mm}$ )을 전지의 중앙에서 세로로 놓이게 하여 금속 전극이 차지하는 면적(18.3mm<sup>2</sup>)을 전지 전체면적(173mm<sup>2</sup>)의 약 10%가 되게 하였다. 그림 5 (d)의 pad는 A. R막으로 덮여있는 금속전극으로부터 외부로 도선을 끌어 내기 위한 것이며 그 크기는  $\frac{28}{\sqrt{200}} \times \frac{28}{\sqrt{200}} \text{mm}^2$ 으로 하였다.

2. 공정 처리

비저항이 10Ωcm, 결정방향이 <111>, 두께가 13

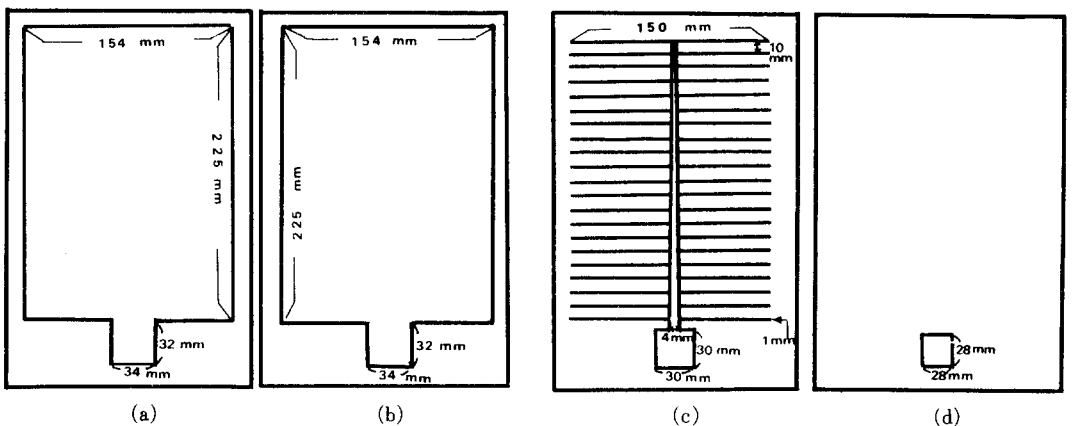


그림 5. 설계된 공정 마스크들(실제 크기의  $\sqrt{200}$  x.로 확대한 것임.)  
(a) 격리 마스크 (b) N<sup>+</sup> 확산 마스크 (c) 전극 마스크 (d) Pad 마스크  
Fig. 5. Designed processing masks(enlarged by  $\sqrt{200}$  times from real size).  
(a) Isolation mask (b) N<sup>+</sup> diffusion mask (c) Electrode mask (d) Pad mask.

~15mil인 P형 Si 웨이퍼를 N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> 전지의 기관으로 사용하였고, N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup> 전지의 기관으로는 앞과 같은 웨이퍼상에 N-에피텍셀층 (비저항이 1 Ωcm, 두께가 9~11μm)을 성장시킨 것을 이용하였다. 이들 전지들의 제작과정은 그림 6의 공정 순서도에 따라 실시하였으며 N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup> 전지에 대한 격리확산 과정만 제외하고는 제작공정을 동시에 처리하여 두 전지들의 N<sup>+</sup>, P 및 P<sup>+</sup> 영역들에서 물리적 파라미터들을 같게 만들었다. 자세한 공정내용으로는 먼저  $\frac{N}{P}$  에피웨이퍼들을 청결히 세척하여 Wet O<sub>2</sub>로 두께 7000 Å의 초기 산화막을 성장시킨 후, 격리 마스크를 사용하여 사진식각법으로 격리창구를 개방하였다.

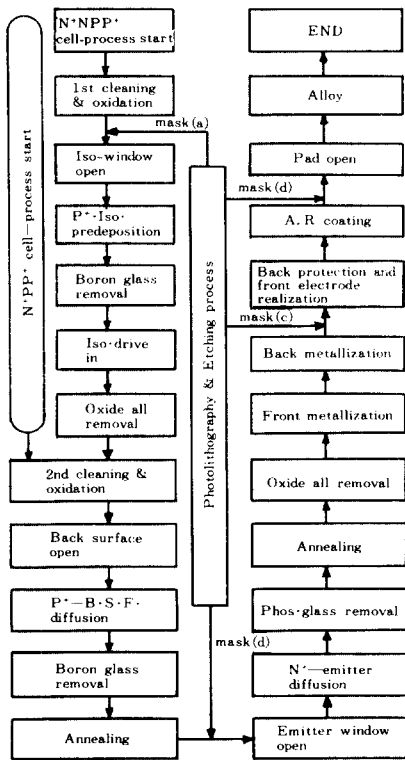


그림 6. 공정 순서도  
Fig. 6. Process flow chart.

격리확산 공정으로는 BN 웨이퍼를 사용하여 붕소 (Boron)를 T=1100°C에서 40분간 predeposition (R<sub>□</sub> (Sheet 저항) = 5.8~6.0 Ω/□)하고, LTO (low temperature oxidation) 방식으로 boron glass를 제거한후, T=1130°C에서 12시간 Dry O<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>분위기에서 drive-in을 실시하였다.

이후 표면의 산화막을 전부 제거해 버리고 새로운 N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> 전지용 P형 Si 기관들과 합쳐서 다음 단계인 2

차세척 및 산화공정을 실시하였으며, 2차산화공정에서는 6000Å의 산화막을 성장시켰다. 전지의 뒷면에 소수캐리어들에 대한 반사전위 장벽을 형성하여 효율 특성을 높이기 위해 P<sup>+</sup>-BSF층을 만들었으며 이 과정으로는 뒷면 산화막을 제거한 후 T=1100°C에서 60분간 붕소를 확산(R<sub>□</sub>=4.4~5.2 Ω/□)시켰다. 다음으로 boron glass를 제거한 후 뒷면 결정결함을 줄이기 위해 T=1100°C에서 Dry O<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>분위기로 각 15분, 60분씩 순서대로 열처리(annealing)하였다. N<sup>+</sup>에미터 영역의 형성으로는 N<sup>+</sup>확산 마스크를 사용하여 에미터 창구를 개방한 후 PoCl<sub>3</sub>를 dopant로 하여 T=940°C에서 3분간 인(phosphorus)를 확산시켰으며, N<sup>+</sup>에미터 영역의 sheet 저항과 접합 깊이는 20.7~21.5 Ω/□, 0.3μm로 각각 측정되었다. 다시 HNO<sub>3</sub> boiling과 H·F용액으로 phos. glass를 제거하고 T=920°C에서 Dry O<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>분위기로 각 20분, 10분씩의 순서대로 표면을 열처리 하였다. 전극의 형성은 웨이퍼상의 산화막들을 모두 제거, 세척하여 전지의 앞, 뒷면에 각각 두께 3μm, 1μm의 Al을 진공증착시킨 후 사진식각법으로 뒷면의 Al층을 보호하고 앞면에 전극 마스크를 이용하여 그리드 패턴의 전극을 나타내었다. 표면에서 광반사 효과를 줄이기 위한 A.R. 막으로는 두께 1100 Å의 undoped SiO<sub>2</sub>막을 pyrox 방법으로 형성시켰으며, 공정의 마지막 단계로 pad 마스크를 사용하여 외부로 도선이 연결되는 창구를 개방한 후 T=450°C에서 N<sub>2</sub>분위기로 10분간 alloy를 실시하였다. 공정과정에서 측정된 sheet 저항과 접합깊이는 4-point probe (magnetron co. M-700)와 grooving machine (philtec co. 2067-E)을 사용하였으며 산화막 두께의 측정은 Nano spec data를 이용하였다.

IV. 측정 결과 및 고찰

제작공정으로부터 6개의 N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> 전지들(cell No. S-1, S-2, S-3, S-4, S-5, S-6)과 3개의 N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup> 전지들(cell No. E-1, E-2, E-3)을 얻었으며 그림 7에서는 제작된 전지들의 사진을 보였다.

또한 전지들의 암전류 특성을 조사하기 위해 외부로부터 빛을 차단한 상태에서 순방향 전압에 따른 전류값을 측정하였으며 표 1에서 대표전지(S-1, E-1)들의 I<sub>0</sub>-V 특성값을 나타내었다.

순방향 전압이  $\frac{nKT}{q}$ 보다 충분히 클때는 Schockley 방정식으로부터 암전류-전압의 관계식이  $I_n I_0 = I_n I_0 + \frac{q}{n \cdot KT} \cdot V$ 로 표현되므로 전류축을 대수로 나타낸 I<sub>0</sub>-V 특성고선은 이 영역에서 거의 직선으로 주어진다.

따라서 이 직선을 연장시켜 전류축과 외삽하면 역포화 암전류의 크기( $I_0$ )를 구할 수 있다. 그림8은 대표 전지(S-1, E-1)들의 암전류밀도-전압( $J_0-V$ ) 특성곡선을 반대수 방안에 그려진 것이다.

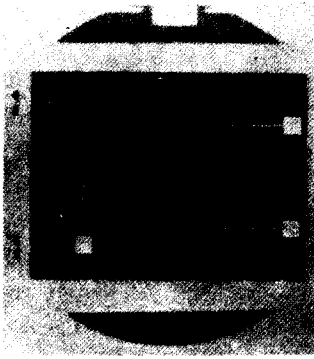


그림 7. 제작된 전지의 사진  
Fig. 7. Photo graphy of fabricated cell.

이와같은 방법으로 구한 N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> 전지(S-1 cell)의 역포화 암전류 밀도,  $I_n J_0(J_0)$ 는  $0.5 \mu A/cm^2$  ( $1.65 \mu A/cm^2$ )였고 N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup> 전지(E-1 cell)는  $I_n J_0(J_0)$ 가  $-7.5 \mu A/cm^2$  ( $5.53 \times 10^{-4} \mu A/cm^2$ )로 나타났다. 그림 9는 ELH램프(G. E. Co.)로 인공조명을 만들어 약  $100mW/cm^2$  부근에서 변화되는 두 임사광전력( $I_{ph1} > I_{ph2}$ )들에 대해 그린 E-1 cell의 전류-전압 특성곡선들이다. 전지의 직렬저항은 그림 9와 같은 두개의 전류-전압 특성곡선을 이용하여  $R_s = \frac{V_{L2} - V_{L1}}{I_{L1} - I_{L2}}$ 의 관계

식으로 부터 구할 수 있으며, 충실도(F.F)는 I-V 특성곡선상에서 최대 전력을 주는 점을 찾아  $\frac{I_m \cdot V_m}{I_{sh} \cdot V_{oc}}$ 로 계산하였다. 그림 9의 E-1 전지는 직렬저항이  $0.4 \Omega$ , 충실도가 77.3%로 나타났다. 개방전압과 단락전류의 값은 정확한  $100mW/cm^2$ 의 조명설치가 곤란하여, 전자공학회지 논문 83-20-1-4에서 발표, 실험한 전지를 표준으로 이용하여 계산하였다. 표 2에서는 제작된 전지들의 효율특성 파라미터들을 나타내었다.

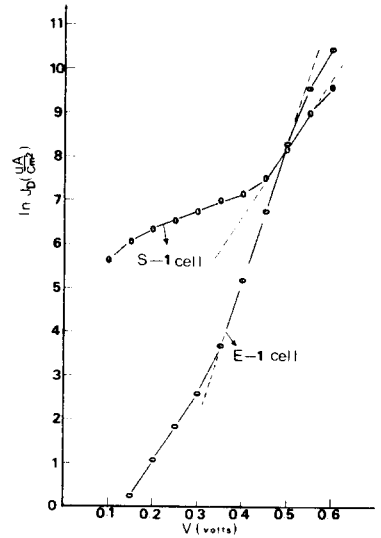


그림 8. 대표전지(S-1, E-1)들의  $J_0-V$  특성곡선  
Fig. 8. The  $J_0-V$  characteristic curves of representative cells(S-1, E-1).

표 1. 대표전지(S-1, E-1)들의  $I_0-V$  특성값(전지면적:  $1.73cm^2$ , 측정온도:  $25^\circ C$ )

Table 1. The  $I_0-V$  characteristic values of representative cells(S-1, E-1).  
(cell area:  $1.73cm^2$ , T:  $25^\circ C$ .)

V[Volts]	N <sup>+</sup> PP <sup>+</sup> cell (S-1)			N <sup>+</sup> NPP <sup>+</sup> cell (E-1)		
	I[mA]	J[mA/cm <sup>2</sup> ]	$I_n J_0[\mu A/cm^2]$	I[mA]	J[ $\mu A/cm^2$ ]	$I_n J_0[\mu A/cm^2]$
0.10	0.485	280.34	5.636	$1.0 \times 10^{-3}$	0.578	-0.548
0.15	0.752	434.68	6.075	$2.3 \times 10^{-3}$	1.329	0.284
0.20	1.00	578.03	6.360	$5.1 \times 10^{-3}$	2.948	1.081
0.25	1.23	710.98	6.567	$11.0 \times 10^{-3}$	6.358	1.849
0.30	1.49	861.27	6.758	$22.8 \times 10^{-3}$	13.179	2.578
0.35	1.79	1,034.68	6.942	$69.0 \times 10^{-3}$	39.884	3.686
0.40	2.2	1,271.67	7.148	0.305	176.3	5.172
0.45	3.2	1,849.7	7.523	1.50	867	6.765
0.50	6.3	3,641.6	8.200	6.7	3,873	8.261
0.55	14.0	8,092.4	8.999	25	14,451	9.578
0.60	25.7	14,855.5	9.606	60	34,682	10.454

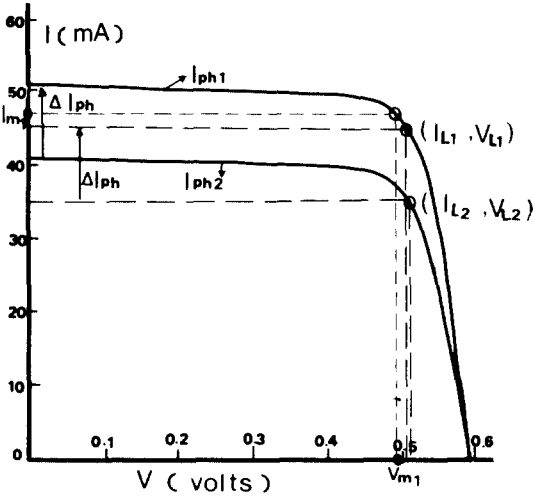


그림 9. E-1 전지의 전류-전압 특성곡선. 100mW/cm<sup>2</sup> 부근의 두입사 광전력( $I_{ph1} > I_{ph2}$ )에서 측정  
 Fig. 9. The current-voltage characteristic curves of E-1 cell measured under two different incident power about 100 mW/cm<sup>2</sup>.

표 2에서 N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> 전지들의 평균효율은  $\eta_{tot}$  (전면적에 대한 효율)이 10.94%,  $\eta_{eff}$  (그리드 전극의 shadow 면적을 제외한 유효 수광면적에 대한 효율)가 12.16%로 나타났고, N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup> 전지들에서는  $\eta_{tot}$  이 12.07%,  $\eta_{eff}$ 가 13.41%로 N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> 전지들에 비해 평균 10% 이상의 효율개선을 보였다. N<sup>+</sup>PNP<sup>+</sup> 전지의 효율개선은 N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> 전지의 효율 파라미터들 (F. F=78.0(%),  $V_{oc}$  =0.553 (V),  $I_{sh}$  =43.96 (mA))에 비해, F. F(77.3

(%))가 다소 낮아졌음에도 불구하고 개방전압( $V_{oc}$  = 0.585 (V))과 단락전류( $I_{sh}$  =46.16 (mA))가 크게 증가했기 때문이다. F. F의 감소 원인으로는 N 에피층의 삼입으로 인해 전지의 직렬저항이 다소 증가한 결과로 생각되어지고,  $V_{oc}$ 와  $I_{sh}$ 의 개선은 에미터 영역의 H. D. E.를 제거하여 역포화 암전류밀도의 크기( $J_0$ )를 현저히 줄일 수 (약  $1.4 \times 10^3$  배) 있었기 때문인 것으로 간주된다.

V. 結 論

일반적 태양전지의 에미터 영역에서 나타나는 H. D. E. (heavy doping effects)는 암전류의 크기를 증가시켜 효율저하에 중요한 영향을 미친다. 본 논문에서는 에미터 구조를 N<sup>+</sup>N 고저접합 형태로 나타내고 뒷면에 B. S. F. (back surface field) 층을 형성한 N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup> 전지와 일반적 N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> 전지를 함께 제작하여 고저접합 에미터 구조에 의한 H. D. E. 제거 및 효율 개선 효과를 고찰하였다. 두 전지들의 암전류 특성에서 N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup> 전지의 역포화 암전류밀도의 크기( $J_0$  =  $7.74 \times 10^{-4} \mu A/cm^2$ )는 N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> 전지( $J_0$  =  $1.11 \mu A/cm^2$ )에 비해  $1.4 \times 10^3$  배만큼 줄어 들었으며, 이는 전지의 에미터 구조를 고저접합 형태로 나타내므로써 에미터 영역의 H. D. E.를 효과적으로 제거시킨 결과이다. 또한 이러한 암전류의 감소는 결과적으로 개방전압과 단락전류의 증가를 가져와 N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup> 전지의 평균효율 ( $\eta_{tot}$  = 12.07%,  $\eta_{eff}$  = 13.41%)을 N<sup>+</sup>PP<sup>+</sup> 전지 ( $\eta_{tot}$  = 10.94%,  $\eta_{eff}$  = 12.16%)에 비해 10% 이상 증가시켰다. N<sup>+</sup>N 고저접합 에미터 영역에서 접합깊이와 불순물분포도에 대한 최적조건은 좀더 연구되어야 할 과제로 남아 있으며, 이

표 2. 제작된 전지들의 효율 파라미터들(입사광전력: 100mW/cm<sup>2</sup>, AM1)

Table 2. Efficiency parameters of fabricated cells (under AM1, 100mW/cm<sup>2</sup>).

parameter		$V_{oc}$ (V)	$I_{sh}$ (mA)	$J_{sh}$ (mA)	$J_0(\mu A/cm^2)$	F. F (%)	$R_s(\Omega)$	$\eta_{eff}$	$\eta_{tot}$
N <sup>+</sup> PP <sup>+</sup>	s-1	0.557	42.75	24.53	1.65	77.4	0.15	10.57	11.74
	s-2	0.555	43.29	24.99	1.05	78.5	0.10	10.88	12.09
	s-3	0.548	43.02	24.83	2.10	77.8	0.15	10.59	11.77
	s-4	0.553	45.31	26.15	0.50	78.3	0.15	11.33	12.59
	s-5	0.556	45.18	26.08	0.54	77.9	0.15	11.29	12.54
	s-6	0.550	44.23	25.53	0.83	78.1	0.10	10.97	12.19
	ave	0.553	43.96	25.35	1.11	78.0	0.13	10.94	12.16
N <sup>+</sup> NPP <sup>+</sup>	E-1	0.590	46.50	26.88	$5.53 \times 10^{-4}$	77.3	0.40	12.26	13.62
	E-2	0.580	45.72	26.43	$1.02 \times 10^{-3}$	77.2	0.40	11.83	13.15
	E-3	0.585	46.25	26.73	$7.50 \times 10^{-4}$	77.5	0.35	12.19	13.47
	ave	0.585	46.16	26.68	$7.74 \times 10^{-4}$	77.3	0.37	12.07	13.41



와함께 공정 분위기를 개선시킨다면 N<sup>+</sup>NPP<sup>+</sup> 전지의 효율은 더욱 증가되리라 기대된다. 끝으로 본 연구를 완성시키시기까지 물심양면으로 도움을 아끼지 않으신 K. I. E. T. 여러분들에게 감사할 드린다.

#### 參 考 文 獻

- [1] J.J. Wysocki and P. Rappaport, "Effect of temperature on photovoltaic solar energy conversion," *J. Appl. Phys.*, 31, pp. 571, 1961.
- [2] F.A. Lindholm, A. Neugroschel, C.T. Sah, M.P. Godlewski, and H.W. Brandhorst, *IEEE Trans. on Electron Devices*, ED-24, pp. 402, 1977.
- [3] John R. Hauser and Peter M. Dunbar, "Performance limitations of silicon solar cells," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-24, no.4, Apr. 1979.
- [4] S.R. Dhariwal, "Theory of back surface field silicon solar cells," *Solid State Electronics*, vol. 24, no.12, pp. 1161-1165, 1981.
- [5] S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*. 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc., 1981.
- [6] Martin A. Green, "Solar cell fill factors: general graph and empirical expression," *Solid State Electronics*, vol. 24, no. 8, pp. 788-789, 1981.
- [7] R.N. Hall, "Silicon photovoltaic cells," *Solid State Electronics*, vol. 24, pp. 595-616, 1981.
- [8] Jong Duk Lee, et al, "高效率 太陽電池 工程開發에 관한 研究", K.I.E.T 研究報告書, no.4, Oct. 1980.
- [9] P.Lauwers, et al, "Influence of band gap narrowing on the performance of silicon n-p solar cells," *Solid State Electronics*, vol. 21, pp. 747-752, 1978.
- [10] Fredrik A. Lindholm and Chin Tang Sah, "Fundamental electronic mechanisms limiting the performance of solar cells," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-24, no.4, Apr. 1977.
- [11] R.A. Smith, *Semiconductors*, 2nd ed., Cambridge University Press, London, 1978.