

## PC1D를 이용한 cast poly-Si 태양전지의 최적화

### An Optimization of Cast poly-Si solar cell using a PC1D Simulator

이수은, 이인, 유창완, 이준신

( Su-Eun Lee, In Lee, Chang-Wan Ryu, Junsin Yi )

성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부

#### Abstract

This paper presents a proper condition to achieve above 19 % conversion efficiency using PC1D simulator. Cast poly-Si wafers with resistivity of 1  $\Omega$ -cm and thickness of 250  $\mu$ m were used as a starting material. Various efficiency influencing parameters such as rear surface recombination velocity and minority carrier diffusion length in the base region, front surface recombination velocity, junction depth and doping concentration in the Emitter layer, BSF thickness and doping concentration were investigated. Optimized cell parameters were given as rear surface recombination of 1000 cm/s, minority carrier diffusion length in the base region 200  $\mu$ m, front surface recombination velocity 100 cm/s, sheet resistivity of emitter layer 100  $\Omega/\square$ , BSF thickness 5  $\mu$ m, doping concentration  $5 \times 10^{19}$  cm<sup>-3</sup>. Among the investigated variables, we learn that a diffusion length of base layer acts as a key factor to achieve conversion efficiency higher than 19 %. Further details of simulation parameters and their effects to cell characteristics are discussed in this paper.

**Keywords (중요 용어) :** Cast poly-Si wafer, Solar cell, Simulation, PC1D.

#### 1. 서론

태양전지가 기존의 상용전력과 경쟁력을 갖기 위해서는 저가 고효율화가 필수적이다. 다결정 실리콘 p-n접합형 태양전지는 그 기판이 단결정에 비해 많은 결함을 가지고 있어 효율 면에서는 단결정 태양전지에 뒤지지만 저렴한 가격과 사각형으로 성장이 가능해 kerf 손실을 줄일 수 있는 등 저가화가 가능한 많은 요소를 가지고 있다. 본 논문은 실리콘계 태양전지의 손실 요인을 분석하고, 모의 실험을 통하여 각 손실 요인이 최종 변환 효율에 미치는 영향을 조사하여 최종 19 % 이상의 변환 효율을 달성하기 위한 각 요소의 적절한 값을 제시하는데 있다. 실리콘계 태양전지의 손실 요인은 물질 자체의 특성에서 오는 손실로써 특별히 제거할 방법이 없는 부분과 제조 공정의 최적화로 어느 정도 제거가 가능한 손실요인으로 나눌 수 있다.[1] 그림 1에서 가장 많은 손실 요인을 제공하고 있는 부분은 실리콘의 에너지 밴드갭에 관련된 것으로써 밴드갭 보다 낮은 에너지를 가지는 포톤과 높은 에너지를 가지는 포톤의 남는 에너지를 태양전지가 이용하지 못하는 것에 기인한다. 이는 실리콘 p-n접합 태양전지의 고유 성질로 간주되고 있다. 약 24.8 %를 차지하고 있는 전

압인자는 이론적으로 최대 개방전압은 밴드갭과 같아야 하나 p, n층을 높게 도핑하여도 이는 이루어지지 않으며, 높은 도핑은 추가적인 손실 요인을 제공한다.

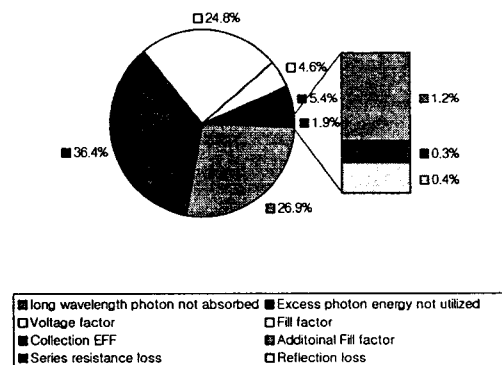


그림 1. 실리콘 p-접합 태양전지의 손실 요인.

약 2.4 %을 차지하는 곡선 인자에 기인한 손실 요인 역시 p-n접합 태양전지는 넓은 의미에서 다이오드이므로 한계 값이 존재한다. 이들 네가지 요소는 태양전지에서 피할 수 없는 손실 요인이며, 나머지

요소들은 최적화된 공정의 개발로 어느정도 감소가 가능하다. 본 논문에서 우리는 쉽게 구할 수 있는 비저항 1 Ω-cm, 두께 약 250 μm의 cast poly-Si를 기판으로 사용하여 p-n접합 다결정 태양전지를 제조할 경우 p층, n층, 후면 전계층 등의 형성 조건이 변환효율과 IQE(Internal Quantum Efficiency)에 미치는 영향을 조사하여 19 %이상의 변환 효율을 얻기 위한 최소한의 조건들을 제시하였다.

## 2. 실험

모의 실험에 사용된 프로그램은 IBM PC용으로 UNSW에서 개발된 PCID (version 5.0)이며, 실제 고효율 태양전지 제작에 이용될 수 있도록 상용 p-n 접합 태양전지의 구조를 이용했다. 출발 물질은 두께 250 μm, 비저항 1Ω-cm의 cast-poly Si를 이용했으며, 최적화 절차를 그림 2에 나타내었다.

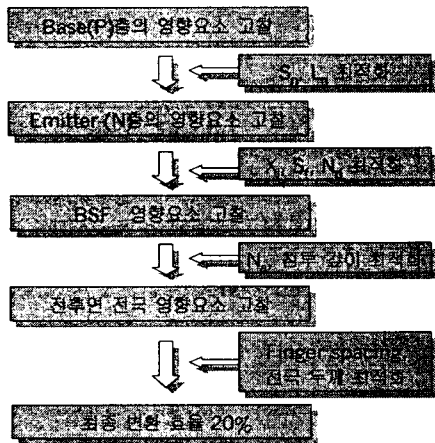


그림 2. 모의실험 순서도.

P층의 최적화를 위하여 사용된 변수는 후면 재결합 속도( $S_r$ ), 소수 반송자 확산거리 ( $L_n$ )이며, 태양전지의 효율과 internal quantum efficiency (IQE)에 미치는 영향을 조사하여 19 %이상의 변환효율을 얻기 위한 각 요소의 적정값을 제시하였다.  $L_n$ ,  $S_r$ 은 태양전지의 단락 전류와 개방전압에 모두 큰 영향을 주는 인자이며, 장파장 영역의 IQE에 역시 큰 영향을 준다.  $L_n$ 은 길수록 좋으며,  $S_r$ 은 느릴수록 좋으나 도달할 수 있는 기술적 한계가 존재하므로 이들의 영향을 고려하여 적절한 값을 정하는 것이 필요하다. 태양전지의 n층은 매우 신중히 고려되어야 하는 부분이며 개방전압과 단락전류 특히 단파장 영역에서의 IQE에 큰 영향을 주는 곳이다. 높은 개방전압을 얻기 위해 높은 도핑을 하게 되면 반송자의 이동도가 감소하며, 표면의 면저항이 커지므로 전면 전

극 설계가 제한된다. 재결합 속도가 매우 커지므로 반송자가 수집되지 못하고 모두 재결합되는 층(dead layer)이 생성된다. 최적화를 위하여 사용된 변수는 접합 깊이( $X_j$ ), 표면저항( $R_{\square}$ ), 전면 재결합 속도( $S_f$ )이며, 표면 저항을 사용한 이유는 전면 전극 설계시에 직접 최적화 된값을 이용할 수 있기 때문이다. 일반적으로 금속과 반도체의 접합 주위는 매우 높은 재결합 속도를 보인다. 이는 장파장 영역에서 IQE가 낮아지는 주된 원인이며 이를 해결하기 위하여 현재 많은 연구 그룹에서 후면 passivation, 혹은 후면 전계층(BSF)을 형성 등을 연구하고 있다.[2,3] 후면 전계층은 비교적 낮게 도핑된 p층과 금속 사이에 높게 도핑된 P+층을 형성시켜 소수 반송자를 반사시킴으로써 후면에서 실패 재결합 속도를 낮추는 효과를 얻을 수 있다. 도핑 농도( $N_d$ )와 침투 깊이의 영향을 고려하여 최적화 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

본 모의 실험의 목적이 쉽게 구할 수 있는 기존의 다결정 기판을 이용한 p-n접합 태양전지의 제작에 있으므로 p층의 비저항을 1 Ω-cm로 고정하였으며, 기판의 두께는 250 μm로 고정하였다. 표 1에 베이스층의 모의 실험에 사용된 자세한 값들을 보였다.

표 1. 베이스층 모의실험에 사용된 parameter.

Parameter	Value
Base thickness	250 μm
Emitter thickness	0.5 μm
Emitter concentration	$4.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , 70 Ω/□
Base concentration	$1.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 1 Ω-cm
Front SRV	1000 cm/s
Rear SRV	Variable
Lifetime in base	Variable
contact resistance	Ignore

액체  $\text{POCl}_3$ 로부터 기상 확산법을 이용하여 일반적으로 얻을 수 있는 n층 도핑 농도와 접합 깊이를 이용하였으며, 전면 재결합 속도는 별 영향을 주지 않는다고 보고되고 있는 1000 cm/s를 이용하였다. 베이스층의 특성 중 전지의 효율에 크게 영향을 주고 있는 요소는 후면 재결합 속도와 소수 반송자 수명이다. 그림 3에 이들이 변환효율에 미치는 영향을 보였다. 소수 반송자 확산 거리가 150 μm까지는 후면 재결합 속도에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 이는 후면에서 생성된 EHP가 공핍영역에 도달하기 전에 이미 p층내에서 재결합을 하게 되므로 후면의 영향을 거의 받지 않음으로 해석된다. 그러

나 확산 거리가 증가할수록 후면 재결합 속도의 영향이 매우 중요하게 작용한다.

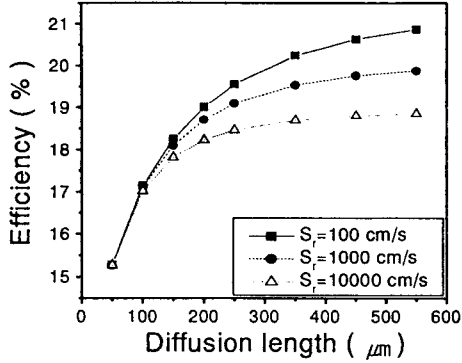


그림 3. 후면 재결합 속도와 소수 반송자 확산 거리에 따른 변환효율, 개방전압, 단락 전류.

확산 거리가 p층의 두께인 250  $\mu\text{m}$  이상이 되면 단락 전류는 포화 상태가 되어 거의 증가하지 않게 되며, 개방 전압은 아래의 식 (1),(2)에서 알 수 있듯이 베이스 포화 전류( $J_{ob}$ )가 감소하므로 전체적인 전지의 역 포화전류가 감소하여 계속 증가하게 된다. 따라서 효율이 계속 증가하는 것은 개방전압의 영향으로 해석된다.[4]

$$V_{oc} = V_i \ln \left[ 1 + \frac{J_{sc}}{J_o} \right] \quad (1)$$

$$J_o = J_{ob} + J_{oc} = \frac{qn_i^2}{N_A} \cdot \frac{D_n}{L_n} \times \left[ \frac{S_r \cosh\left(\frac{W_b}{L_n}\right) + \frac{D_n}{L_n} \sinh\left(\frac{W_b}{L_n}\right)}{S_r \sinh\left(\frac{W_b}{L_n}\right) + \frac{D_n}{L_n} \cosh\left(\frac{W_b}{L_n}\right)} \right] + \frac{qn_i^2}{N_D} \cdot \frac{D_p}{L_p} \left[ \frac{S_f \cosh\left(\frac{W_e}{L_p}\right) + \frac{D_p}{L_p} \sinh\left(\frac{W_e}{L_p}\right)}{S_f \sinh\left(\frac{W_e}{L_p}\right) + \frac{D_p}{L_p} \cosh\left(\frac{W_e}{L_p}\right)} \right] \quad (2)$$

Internal Quantum Efficiency(IQE)는 태양전지가 입사된 포톤의 에너지를 얼마만큼 효과적으로 이용하는가를 평가할 수 있는 매우 중요한 특성이다. 베이스 층은 비교적 낮은 에너지를 가지고 있는 장파장 영역의 IQE특성에 많은 영향을 주고 있으며 이를 높이는 것은 효율향상을 위해 필수적이다. 그림 4에 장파장 영역에서의 IQE에 후면 재결합과 확산 거리가 주고 있는 영향을 나타내었다. 확산 거리가 50  $\mu\text{m}$ 인 경우, 즉 베이스층 내의 재결합이 많은 경우에는 후면 재결합 속도의 향상이 아무런 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 이는 확산거리가 150  $\mu\text{m}$  이내에서는 효율이 급격히 감소하는 것과 같은 원

인으로 해석된다. 즉 확산 거리가 베이스층의 두께 이상이 되어야만 비로소 후면 재결합 속도가 전지의 IQE특성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 장파장 영역에서의 수집 효율을 올리기 위해서는 확산 거리가 적어도 150  $\mu\text{m}$  이상이 되어야 함을 알 수 있다.

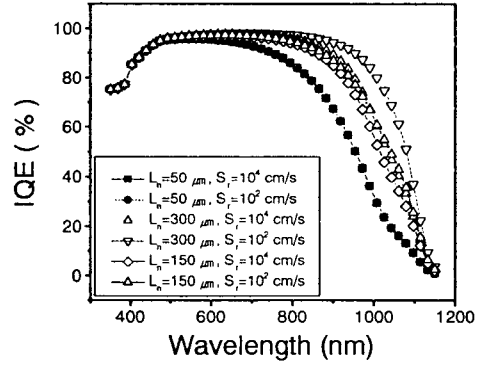


그림 4. 후면 재결합 속도, 소수 반송자 수명에 따른 IQE.

태양전지의 에미터층(n)은 도핑 농도와 표면 재결합 속도가 에미터 포화 전류에 직접적인 영향을 주므로 개방전압에 상당히 밀접한 관계에 있으며, 단파장 영역에서의 수집 효율을 향상시키기 위하여 일반적으로 접합 깊이를 짧게 한다. 적절한 에미터의 접합 깊이, 도핑 농도, 표면 재결합 속도를 결정하기 위해 이들이 변환 효율에 미치는 영향을 조사하였다.

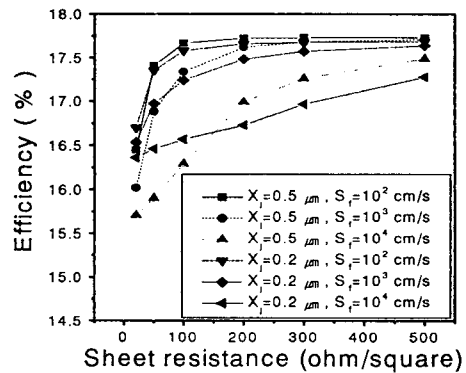


그림 5. 접합깊이, 전면 재결합 속도에 따른 변환 효율의 변화.

베이스층의 모의 실험과 마찬가지로 베이스층의 두께와 비저항은 고정하였으며, 일반적인 다결정 실리콘의 소수 반송자 수명이 약 5~10  $\mu\text{s}$ 임을 고려하여 확산 거리를 100  $\mu\text{m}$ 로 고정하였다. 후면의 재결합이 에미터층의 모의 실험에 주는 영향을 최소화하기 위하여 재결합 속도는 100  $\text{cm/s}$ 로 고정하고 에미터층

의 모의 실험을 수행하였다. 에미터의 표면저항은 전면 전극을 설계할 때 매우 중요한 요소이므로 이를 이용하여 도핑 농도를 변화 시켰으며 이들이 변환 효율에 주는 영향을 그림 5에 나타내었다.

에미터층의 표면 재결합이 1000 cm/s이하인 경우에 표면 저항이 약 100 Ω/□이하에서 변환 효율이 급격히 떨어짐을 볼 수 있다. 이는 도핑 농도가 높아짐에 따라 에미터층의 반송자 이동도가 현저히 떨어지고 내부의 재결합이 증가하여 단락 전류가 급격히 감소하는 것으로 해석된다. 재결합을 1000 cm/s 이하로 떨어뜨릴 수 있는 공정을 확립할 경우 적절한 에미터층의 면저항은 약 100 Ω/□이나 모의 실험에서 사용된 것과 같이 전면 전극이 차지하는 면적을 전지 면적의 4 %이하로 유지하면서 동시에 직렬저항을 0.5 Ω이하로 유지할 수 있는 그리드의 설계는 매우 어렵다. 따라서 19 %이상의 변환 효율을 얻기 위해서는 높은 에미터 비저항을 이용해 낮은 직렬저항을 얻을 수 있는 그리드의 설계가 필수적이다.

에미터층 면저항을 100 Ω/□로 고정하고 접합 깊이와 전면 재결합 속도를 변수로 하여 IQE를 조사해본 결과 같은 면저항을 사용하였을 경우에는 전면 재결합 속도가 가장 큰 변수로 작용하였으며, 접합 깊이는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있었으며, 도핑 농도를 변수로 하여 같은 실험을 수행한 결과 도핑 농도가 낮아수록 IQE가 좋아짐을 알 수 있었다. 따라서 좋은 IQE를 얻기 위해서는 낮은 표면 재결합 속도가 필요하며, 이를 달성하지 못할 경우 낮은 도핑 농도와 접합깊이가 필요함을 알 수 있었다.

표 2. BSF의 특성에 따른 변환 효율과 IQE.

P+ doping (cm <sup>-3</sup> )	BSF depth (μm)	V <sub>oc</sub> (V)	EFF (%)	IQE <sub>avg.</sub> (%)
5×10 <sup>18</sup>	1	0.627	18.55	80.38
	5	0.63	18.93	81.71
	10	0.631	19.09	82.29
5×10 <sup>19</sup>	1	0.629	18.87	81.51
	5	0.632	19.17	82.52
	10	0.633	19.22	82.58
5×10 <sup>20</sup>	1	0.631	19.04	83.72
	5	0.632	19.04	83.31
without BSF		0.625	18.32	79.55

후면 전계는 후면 금속 전극과의 접촉저항을 줄이거나 낮은 후면 재결합 속도를 얻음으로 해서 전지의 역포화 전류를 억제하는 효과를 얻을 수 있으므로 높은 개방 전압을 얻을 수 있어 매우 중요한 부분이다. 표 3에 전면 재결합 속도 100 cm/s, 에미터 면저항 100 Ω/□, 베이스 확산거리 200 μm인 경우의

후면 전계의 특성이 전지 효율, 개방전압, IQE에 주는 영향을 보였다. 접합 깊이가 5 μm이상이면 도핑 농도는 큰 영향을 주지 않고 있는 것을 볼 수 있으며, 1 μm에서는 도핑 농도에 비례함을 알 수 있다. 일반적으로 도핑 농도와 접합 깊이가 커질수록 후면 전계의 효과가 커진다. 그러나 후면 전계층 자체의 확산 거리가 도핑 농도에 반비례하므로 적정 농도가 필요하다. 모의 실험 결과 도핑 농도 5×10<sup>19</sup>cm<sup>-3</sup>, 접합 깊이는 약 5 μm정도가 가장 적절함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서 우리는 기존의 다결정 실리콘 태양전지의 구조와 쉽게 구할 수 있는 다결정 실리콘 기판을 이용하여 제작되는 태양전지가 19 % 이상의 변환 효율을 보이기 위한 최소한의 조건들을 모의 실험을 통해 제시하였다. 베이스층의 모의 실험 결과 소수 반송자 확산 거리가 150 μm이상이어야 하며, 후면 재결합 속도는 1000 cm/s이하가 되어야 함을 알 수 있었으며, 후면 전계에 대한 모의 실험 결과 도핑 농도 5×10<sup>19</sup>cm<sup>-3</sup>, 접합 깊이는 약 5 μm정도가 적합함을 알 수 있었다. 전면 에미터층은 면저항이 100 Ω/□이하, 전면 재결합 속도 1000 cm/s, 접합 깊이는 0.5 μm이하가 되어야함을 보였다. 이상의 결과를 토대로 최종 모의 실험결과 최종 19 % 이상의 변환 효율을 보이기 위해서는 무엇보다도 베이스의 확산 거리가 200 μm이상이어야 하며, 전면 재결합 속도가 100 cm/s이하가 될 수 있는 공정 개발이 선행되어야 하며, 전극이 차지하는 면적을 3% 이하로 줄이면서 직렬 저항이 0.5 Ω이하의 전극 설계가 매우 중요함을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업 자원부·에너지 관리공단 학술진흥사업 과제 (1999n-pv03-p-03)의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

#### 참고 문헌

- [1] M. Wolf, Energy Conversion, Vol. 11, p63-73, June, 1971.
- [2] A. Goetzberger et al., Crystalline Silicon Solar Cells, p 94, 1994.
- [3] P. Sana, J. Salami, and A. Rohagi, IEEE Trans. Elect. Devices, Vol. 40, No. 6, June, 1993.
- [4] H. J. Hovel, Semiconductor and Semimetal, Vol. 11, p 51, 1975.