

다결정 실리콘 태양전지 구조 최적화에 관한 연구

이재형* · 정학기* · 정동수* · 이종인*

*군산대학교 전자공학과

A Study on the Optimization of Polysilicon Solar Cell Structure

Jaehyeong Lee* · Hakki Jung* · Dongsu Jung* · Jongin Lee*

*Department of Electronic Engineering, Kunsan National University

E-mail : jhyi@kunsan.ac.kr

요 약

고효율 다결정 태양전지 제작의 방향을 제시하기 위해 PC1D 프로그램을 이용하여 전, 후면 재결합 속도, 소수 캐리어 확산거리, 접합깊이, 에미터 층 면저항, 후면 전계층이 미치는 영향을 조사하였다. 최적화된 전지 파라미터는 후면 재결합 속도 1000 cm/sec, 베이스 층에서의 소수 캐리어 확산거리 50 [μm], 전면 재결합 속도 100 [cm/sec], 에미터 층 면저항 100 Ω/\square , 후면 전계층 두께 및 도핑 농도는 각각 0.5 [μm]와 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 로 조사되었다. 특히 19.8% 이상의 변환효율을 얻기 위해서는 베이스층의 확산거리가 가장 중요한 파라미터임을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Poly-Si wafers with resistivity of 1 [$\Omega\text{-cm}$] and thickness of 50 [μm] 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/sec], minority carrier diffusion length in the base region 50 [μm], front surface recombination velocity 100 [cm/sec], sheet resistivity of emitter layer 100 [Ω/\square], BSF thickness 0.5 [μm], doping concentration $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Among the investigated variables, we learn that a diffusion length of base layer acts as a key factor to achieve conversion efficiency higher than 19.8 %. Further details of simulation parameters and their effects to cell characteristics are discussed in this paper.

키워드

Polysilicon, solar cell, structure optimization, high efficiency

1. 서 론

점차 심각해져 가는 지구 환경문제와 자원고갈 문제로 인해 주목을 받기 시작한 태양광 발전은 자원이 거의 무한정하고, 지역 편재성이 적으며, 공해 등 오염이 전혀 없는 가장 바람직한 에너지 기술 중의 하나이다. 미국, 일본, 독일 등에서는 청정 에너지원으로써 태양광 발전의 실용화 축진이 정부 차원에서 추진되고 있으며, 특히 일본의

경우 각 가정에 태양전지를 설치하여 2기가 와트에 해당하는 전력을 충당하는 백만호 건설을 추진 중에 있다. 이는 100메가 와트급 원자력 발전소의 20기를 건설하는 용량으로 차세대 시장의 크기와 전력공급이 중앙집중 관리형에서 일반가정 수요자 중심의 분산형으로 전환을 시도하고 있다.

한편, 고효율 다결정 실리콘 태양전지의 제작을 위해서는 태양전지의 변환 효율에 영향을 주

는 요소들을 정확히 알아야하며, 이들이 미치는 영향이 어떠한 것인지를 아는 것이 중요하다. 본 논문에서는 실리콘 p-n 접합 태양전지의 구조를 이용하여, 각 층의 영향요소가 변환 효율에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하였다.

II. 실험방법

본 연구에서 모의실험에 이용된 프로그램은 IBM PC용으로 호주의 UNSW(University of New South Wales)에서 개발된 PC1D(version 5.0)로서 손쉽게 파라미터를 변환시킬 수 있으며, 태양전지의 전류-전압 특성 뿐 아니라 IQE (Internal Quantum Efficiency)까지도 조사가 가능하다.

출발 물질은 두께 50 [μm], 비저항 1[$\Omega\text{-cm}$]의 실리콘 웨이퍼를 이용했으며, 최적화 절차를 그림 1에 나타내었다. 베이스 층(p층)의 최적화를 위하여 사용된 변수는 후면 재결합 속도(rear surface recombination, S_r), 소수 캐리어 확산거리 (L_n)이며, 이들이 변환효율에 미치는 영향을 조사하기 위해 나머지 변수들은 표 1에 나타낸 것과 같이 고정시켰다. 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. 본 논문에서는 소수 캐리어 확산거리 L_n 을 10 [μm]에서 70 [μm]까지 변화시켰으며, 각각의 L_n 에 대해서 후면 재결합 속도는 100 [cm/sec], 1000 [cm/sec], 10000 [cm/sec]까지 변화시키면서 이들의 영향을 조사하였다.

태양전지의 n층은 개방전압과 단락전류 특히 단파장 영역에서의 IQE에 큰 영향을 주는 곳이므로 매우 신중히 고려되어야 하는 부분이다. 높은 개방전압을 얻기 위해 높은 도핑을 하게 되면 캐리어의 이동도가 감소하며, 과도한 불순물의 도입으로 인해 재결합 속도가 매우 커지므로 캐리어가 수집되지 못하고 모두 재결합되는 층(dead layer)이 생성된다. 또한 너무 낮게 도핑을 하는 경우에는, 표면의 면저항(sheet resistance)이 너무 커지므로 이들에 의한 손실을 작게 하기 위해서는 핑거(finger)와 핑거 사이의 간격을 줄여야 하며, 차광면적의 증가가 불가피하게 된다. 따라서 적절한 범위에서 에미터 층 형성조건을 최적화할 필요가 있다. 최적화를 위하여 사용된 변수는 접합 깊이(X_j), 표면의 면저항(R_{\square}), 전면 재결합 속도(S_f)이며, 후면 재결합 속도는 100 [cm/sec], 베이스 층 확산거리는 30 [μm]로 고정하였다. 전면 재결합 속도는 100 [cm/sec], 1000 [cm/sec], 10000 [cm/sec]에 대해서 조사하였으며, 표면저항은 20 Ω/\square 에서 500 Ω/\square 까지 변화시켰다. 접합 깊이는 0.5 [μm]와 0.2 [μm]에 대해 조사하였으며,

표면저항을 사용한 이유는 전면 전극 설계 시에 직접 최적화 된 값을 이용할 수 있기 때문이다.

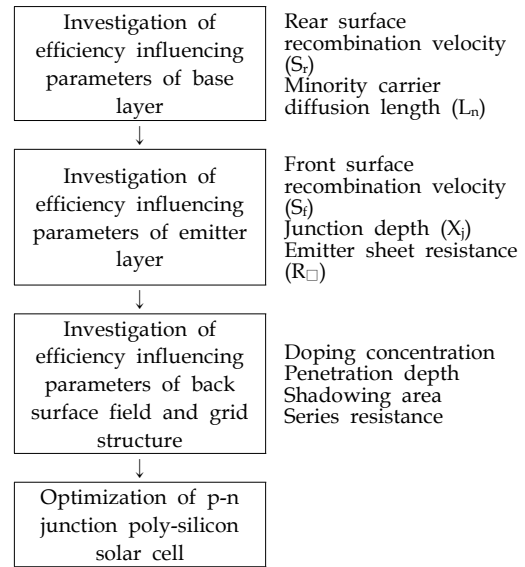


Fig. 1. An experimental procedure for the optimization of poly-Si solar cells using PC1D.

Table 1. Input parameters to investigate the effect of base layer properties to cell efficiency

Parameter	Value
Base thickness	50 μm
Emitter thickness	0.5 μm
Emitter concentration	$4.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 70 Ω/\square
Base concentration	$1.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 1 $\Omega\text{-cm}$
Front SRV	1000 cm/s
Rear SRV	Variable
Lifetime in base layer	Variable
Contact resistance	Ignore

일반적으로 금속과 반도체의 접합 주위는 매우 높은 재결합 속도를 보인다. 이는 전체가 금속과 접하게 되는 후면에서 더욱 심각하며, 이는 장파장 영역에서 IQE가 낮아지는 주된 원인이며 이를 해결하기 위하여 현재 많은 연구 그룹에서 전체 면적에 금속을 접합시키지 않고 부분 부분에 금속을 접합시키고 나머지 부분은 passivation하는 후면 국부 접합 혹은 재결합 방지막 역할을 하는 후면 전계층(Back Surface Field, BSF)에 대한 연구가 집중되고 있다. 후면 전계층은 비교적 낮게 도핑된 p층과 금속 사이에 높게 도핑된 p⁺층을 형성시켜 소수 캐리어를 반사시킴으로써 후면에서 실패 재결합 속도를 낮추는 효과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 후면 전계층이 변환효율에

미치는 영향을 조사하기 위하여, 도핑 농도(N_A)와 침투 깊이의 영향을 고려하여 최적화 하였다. 도핑 농도는 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 까지 변화시켰으며, 침투 깊이는 각각에 대해서 1, 5, 10 [μm]까지 변화 시켰다.

III. 결과 및 고찰

3.1 베이스 층 변화에 따른 효율 변화

베이스 층의 특성 중 전지의 효율에 크게 영향을 주는 요소는 베이스 층의 두께 및 비저항, 후면 재결합 속도와 소수 캐리어 수명 또는 확산거리이다. 베이스 층의 두께는 얇을수록 좋으나, 이는 소수 캐리어 확산거리에 가까워질수록 효율이 좋아지며, 길거나 짧으면 효율이 감소한다. 베이스 층의 비저항은 약 0.1~0.5 [$\Omega\text{-cm}$]에서 최고 변환 효율을 나타내지만 이는 실제 웨이퍼 생산 시에 정밀한 조절이 어렵다. 실제 변환효율에 큰 영향을 미치며 고도의 기술력이 필요한 요소는 소수 캐리어 확산거리이다. 그림 2에는 이들이 변환효율에 미치는 영향을 보였다. 소수 캐리어 확산거리가 증가함에 따라 후면 재결합 속도에 관계없이 전지 효율이 향상됨을 알 수 있다. 그러나 확산거리가 웨이퍼 두께에 해당하는 50 [μm] 이상의 값에서는 효율에 큰 영향을 미치지 못한다.

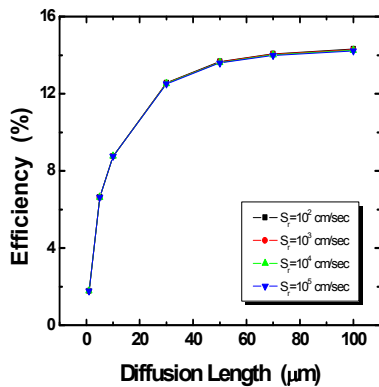


Fig. 2. Efficiency of Si solar cells as a function of minority carrier diffusion length and rear surface recombination velocity of base layer.

내부 양자효율(IQE)은 태양전지가 입사된 포톤의 에너지를 얼마만큼 효과적으로 이용하는가를 판가름할 수 있는 매우 중요한 특성이다. 베이스 층은 비교적 낮은 에너지를 가지는 장파장 영역의 IQE 특성에 많은 영향을 주고 있으며 이를 높이는 것은 효율향상을 위해 필수적이다. 그림 3에 장파장 영역에서의 IQE에 후면 재결합 속도와 확

산 거리가 주고 있는 영향을 나타내었다. 확산거리가 50 [μm] 이하인 경우, 즉 베이스 층 내의 재결합이 많은 경우에는 후면 재결합 속도의 향상이 아무런 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 또한 그림에 알 수 있듯이 베이스 층의 두께가 50 [μm]로 얇은 경우 800 nm 이상의 장파장 영역에서 빛이 베이스 층에 거의 흡수 되지 못하고 있음을 알 수 있다.

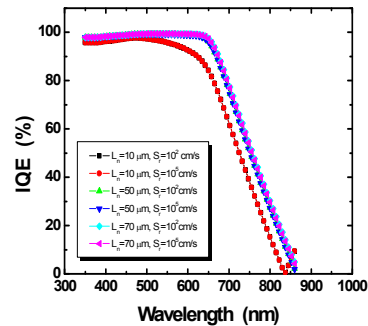


Fig. 3. IQE as a function of minority carrier diffusion length and rear surface recombination velocity of base layer.

3.2 에미터 층의 변화에 따른 변환 효율

후면 재결합 속도가 에미터 층에 주는 영향을 최소화하기 위하여 재결합 속도는 100 [cm/sec]로 고정하고 에미터 층의 모의실험을 수행하였다. 에미터 층의 면저항은 도핑 농도를 변화시켜 조절할 수 있는데, 전면 전극을 설계할 때 매우 중요한 요소이므로 이들이 변환 효율에 주는 영향을 그림 4에 나타내었다. 에미터 층의 면저항이 약 50 Ω/\square 이하에서는 변환 효율이 급격히 떨어짐을 볼 수 있다. 이는 도핑 농도가 높아짐에 따라 에미터 층의 캐리어 이동도가 현저히 떨어지고 내부의 재결합이 증가하여 단락 전류와 개방 전압이 급격히 감소하는 것으로 해석된다. 재결합 속도를 1000 [cm/sec] 이하로 떨어뜨릴 수 있는 공정을 확립할 경우 적절한 에미터 층의 면저항은 약 100 [Ω/\square]이나 모의실험에서 사용된 것과 같이 전면 전극이 차지하는 면적을 전지 면적의 4 %이하로 유지하면서 동시에 직렬저항을 0.5 [Ω] 이하로 유지할 수 있는 그리드의 설계가 필수적이다.

에미터 층 면저항을 100 [Ω/\square]로 고정하고 접합 깊이와 전면 재결합 속도를 변수로 하여 IQE를 조사해본 결과 같은 면저항을 사용하였을 경우에는 전면 재결합 속도가 가장 큰 변수로 작용하였으며, 접합깊이는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있었으며, 도핑 농도를 변수로 하여 같은 실험을 수행한 결과 도핑 농도가 낮을수록 IQE가 좋아짐을 알 수 있었다. 따라서 좋은 IQE를 얻기 위해서는 낮은 표면 재결합 속도가 필요하며, 이

를 달성하지 못할 경우 낮은 도핑 농도와 접합깊이가 필요함을 알 수 있었다.

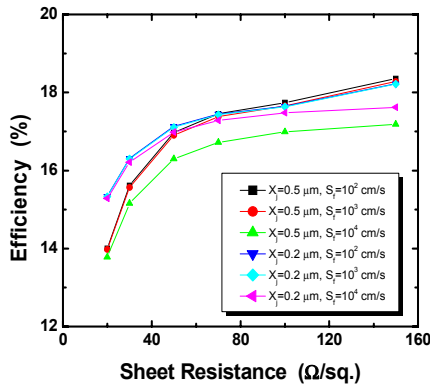


Fig. 4. Conversion efficiency as a function of junction depth, front surface recombination velocity and sheet resistance of emitter layer.

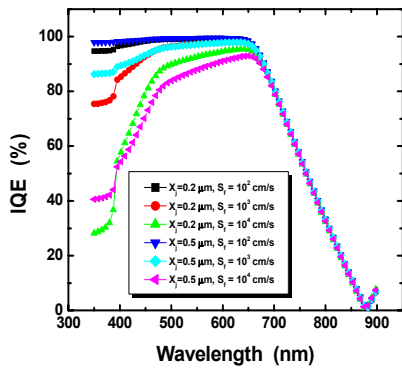


Fig. 5. IQE as a function of junction depth, front surface recombination velocity and sheet resistance of emitter layer.

3.3 후면 전계층의 변화에 따른 변환 효율

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 2에 전면 재결합 속도 100 [cm/sec], 에미터 면저항 100 [Ω/□], 베이스 확산거리 50 [μm]인 경우의 후면 전계의 특성이 전지 효율, 개방전압, IQE에 주는 영향을 보였다. 침투 깊이가 5 [μm] 이상이 되면 도핑 농도는 큰 영향을 주지 않고 있는 것을 볼 수 있으며, 1 [μm]에서는 도핑 농도에 비례함을 알 수 있다. 일반적으로 도핑 농도와 접합 깊이가 커질수록 후면 전계의 효과가 커진다. 그러나 후면 전계층 자체의 확산거리가 도핑 농도에 반비례하므로 적정 농도가 필요하다. 모의실험 결과 도핑 농도 5×10¹⁹ cm⁻³, 접합 깊이는 약 5 [μm] 정도가 가장

적절함을 알 수 있다.

Table 2. Conversion efficiency and average IQE as a function of BSF layer properties.

P ⁺ doping (cm ⁻³)	BSF depth (μm)	V _{oc} (V)	EFF (%)	IQE _{avg.} (%)
5×10 ¹⁸	1	0.577	17.55	77.38
	5	0.58	17.93	78.71
	10	0.581	18.09	79.29
5×10 ¹⁹	1	0.579	17.87	78.51
	5	0.582	18.17	79.52
	10	0.583	18.22	79.58
5×10 ²⁰	1	0.581	18.04	80.72
	5	0.582	18.04	80.31
without BSF		0.575	17.32	76.55

V. 결 론

고효율 다결정 실리콘 태양전지 제작을 위해 위하여 PC1D 프로그램을 이용하여 태양전지의 각 층의 요소들이 변환효율에 미치는 영향을 조사하였다.

(1) 베이스층에 대한 모의실험 결과 소수 캐리어 확산거리가 30 [μm]이하에서는 후면 재결합 속도가 전지의 효율에 큰 영향을 미치지 못하며, 고효율 태양전지를 제작하기 위해서는 소수 캐리어 확산거리를 30 [μm] 이상, 후면 재결합 속도를 1000 [cm/sec] 이하로 하기 위한 효과적인 후면 패시베이션 공정의 확립이 필수적임을 알았다.

(2) 에미터층에 대한 모의 실험결과 전면 전극의 차광 면적과 직렬저항 성분을 무시할 수 있다면 에미터의 면저항이 약 100 [Ω/□] 정도에서 변환 효율이 포화되며, 이때 전면 재결합 속도는 1000 [cm/sec] 이하가 되어야 함을 알았다. 같은 면저항에서는 접합깊이가 IQE에 미치는 영향을 극히 미약했으며, 표면 재결합속도가 중요한 변수임을 알았다.

(3) 후면 전계층에 대한 모의실험 결과, 농도 5×10¹⁹ cm⁻³, 접합 깊이는 약 5 [μm] 정도가 가장 적절함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] M. Wolf, "Historical Development of Solar Cells", Proc. 25th Power Sources symp., pp. 120-124, 1972.
- [2] Y. Minamino et al., 17th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Florida, p.229, 1984
- [3] H. Okinawa, Sun Shine Journal, Vol. 8(1), p.17, 1987
- [4] Martin A. Green, "Solac Cells Operating Principles, Technology, and System Application", Prentice-Hall, pp.4-6, 1982.