

삼결정 실리콘 태양전지의 19%변환 효율 최적요건 고찰에 관한 연구

The study of High-efficiency method using Tri-crystalline Silicon solar cells

이욱재, 박성현, 고재경, 김경해, 이준신
(W. J. Lee, S. H. Park, J. K. Ko, K. H. Kim, J. S. Yi)

Abstract

This paper presents a proper condition to achieve high conversion efficiency using PC1D simulator on tri-crystalline Si solar cells. 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 μm , front surface recombination velocity 100 cm/s, sheet resistivity of emitter layer 100 Ω/\square , BSF thickness 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 %.

Key Words : tri-grain, PC1D, tri-crystalline, efficiency, sheet resistance

1. 서론

세계의 태양광 발전용 기술현황은 실리콘계와 화합물계 태양전지로 나누어진다. 화합물 태양전지 제품은 실리콘 태양전지보다 최소 10배 이상의 재료비 상승요인 때문에 산업의 95% 이상이 실리콘(silicon) 계열로 태양광 발전을 하고 있다. 단결정 실리콘 웨이퍼로 제작된 태양전지는 현재 17% 내외의 변환효율을 보이고 있으나 단가가 높고 태양전지 면적 확대에 어려움이 있다. 반면에 대면적으로 생산 가능한 비정질 규소박막 태양전지는 안정도와 에너지 변환효율에 한계 때문에 일본, 미국

등의 선진국에서도 그 소비가 줄고 있다. 따라서 태양광발전에 핵심사항은 가격이 저렴하며, 그림 1에서 보여주는 기계적 강도가 높은 삼결정(tri-grain) 실리콘을 사용한 저가, 고효율 태양전지 달성에 있다. 본 논문에서는 고효율 삼결정 실리콘 태양전지를 제작 및 연구를 위하여 실험을 진행하였다. 호주의 UNSW에서 제작된 태양전지 모의실험 도구인 PC1D를 이용해서 현재 제작되고 있는 p-n 접합형 삼결정 실리콘 태양전지의 효율 손실 원인을 분석하고 그들의 영향을 분석함으로써 향후 고효율 태양전지 제작의 방향을 제시하였으며[1], 실제 태양전지에의 적용 가능성을 제작하여 평가하였다. 고효율 삼결정 실리콘 태양전지의 제작을 위해서는 태양전지의 변환 효율에 영향을 주는 요소들을 정확히 알아야하며, 이들이 미치는 영향이 어떠한 것인지를 아는 것이 중요하다.[2]

성균관대학교 정보통신공학부
(수원시 장안구 천천동 300번지)
Fax: 031-290-7159
E-mail : lujwon@hanmail.net

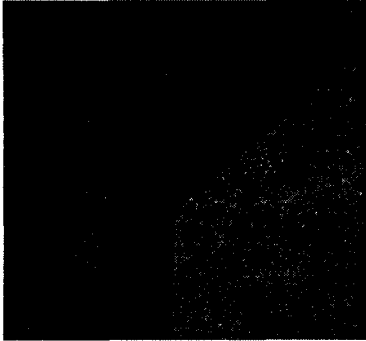


그림 1. Tri-crystalline 실리콘 단면구조
Fig 1. The surface structure of Tri-crystalline.

2. 실험

고효율 다결정 실리콘 태양전지의 제작을 위해서는 태양전지의 변환효율에 영향을 주는 요소들을 정확히 알아야하며, 이들이 미치는 영향이 어떠한 것인지를 아는 것이 중요하다. 본 논문에서는 실리콘 p-n 접합 태양전지의 구조를 이용하여, 각 층의 영향요소가 변환효율에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하였다. 모의실험에 이용된 프로그램은 IBM PC용으로 호주의 UNSW에서 개발된 PC1D (version 5.0)로서 손쉽게 parameter를 변환시킬 수 있으며, 태양전지의 전류-전압 특성 뿐 아니라 IQE (internal quantum efficiency)까지도 조사가 가능하다.

출발 물질은 두께 $250 \mu\text{m}$, 비저항 $1 \Omega\text{-cm}$ 의 cast-poly Si를 이용했으며, 최적화 절차를 그림 2에 나타내었다. P층(base)의 최적화를 위하여 사용된 변수는 후면 재결합 속도(S_r), 소수 반송자 확산거리 (L_n)이며, 이들이 변환효율에 미치는 영향을 조사하기 위해 나머지 변수들은 고정하였다.

본 논문에서는 소수 반송자 확산거리 L_n 을 $50 \mu\text{m}$ 에서 $550 \mu\text{m}$ 까지 변화시켰으며, 각각의 L_n 에 대해서 후면 재결합 속도는 100 cm/s , 1000 cm/s , 10000 cm/s 까지 변화시키면서 이들의 영향을 조사하였다.

에미터층의 최적화를 위하여 사용된 변수는 접합깊이(X_j), 표면저항(R_{\square}), 전면 재결합 속도(S_f)이며, 후면 재결합 속도는 100 cm/s , 베이스층 확산거리는 $150 \mu\text{m}$ 로 고정했다.

전면 재결합 속도는 100 cm/s , 1000 cm/s , 10000 cm/s 에 대해서 조사하였으며, 표면저항은

$20 \Omega/\square$ 에서 $500 \Omega/\square$ 까지 변화시켰다. 접합깊이는 $0.5 \mu\text{m}$ 와 $0.2 \mu\text{m}$ 에 대해 조사하였으며, 표면저항

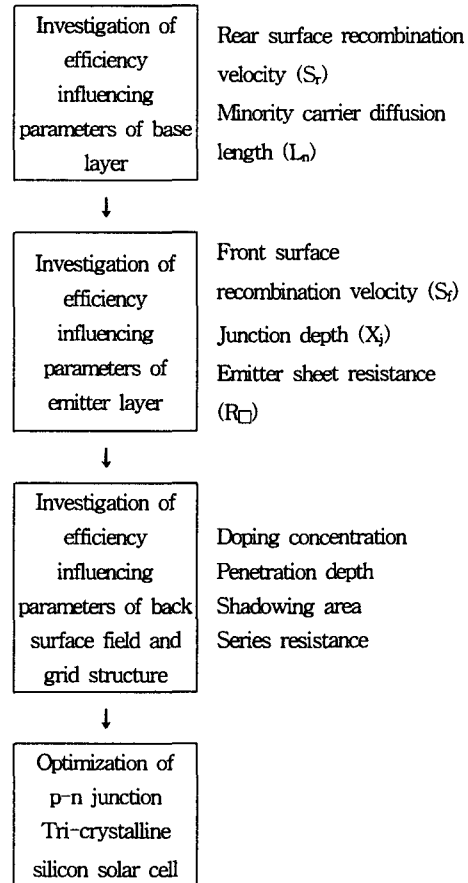


그림 2. PC1D 모의실험을 통한 삼결정 실리콘 태양전지 최적화 순서.

Fig 2. An experimental procedure for the optimization of Tri-crystalline Si solar cells using PC1D.

을 사용한 이유는 전면 전극 설계 시에 직접 최적화 된 값을 이용할 수 있기 때문이다. 후면 전계층은 비교적 낮게 도핑된 p층과 금속 사이에 높게 도핑된 P'층을 형성시켜 소수 반송자를 반사시킴으로써 후면에서 실효 재결합 속도를 낮추는 효과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 후면전계층의 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 변화 시켰으며, 침투 깊이는 각각에 대해서 $1 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ 까지 변화 시켰다.

4. 결론

4.1 베이스 층의 변화에 따른 변환효율

베이스 층의 특성 중 전지의 효율에 크게 영향을 주는 요소는 베이스층의 두께 및 비저항, 후면 재결합 속도와 소수 반송자 수명이다. 베이스 층의 두께는 얇을 수록 좋으나, 이는 소수 반송자 확산 거리에 관계한다. 즉 소수 반송자 확산거리에 가까워질수록 효율이 좋아지며, 길거나 짧으면 효율이 감소한다. 베이스 층의 비저항은 약 0.1 ~ 0.5 Ω-cm에서 최고 변환 효율을 보이나 이는 실제 웨이퍼 생산 시에 정밀한 조절이 어렵다.[4] 실제 변환효율에 큰 영향을 미치며 고도의 기술력이 필요한 요소는 후면 재결합 속도와 소수 반송자 확산 거리이다.

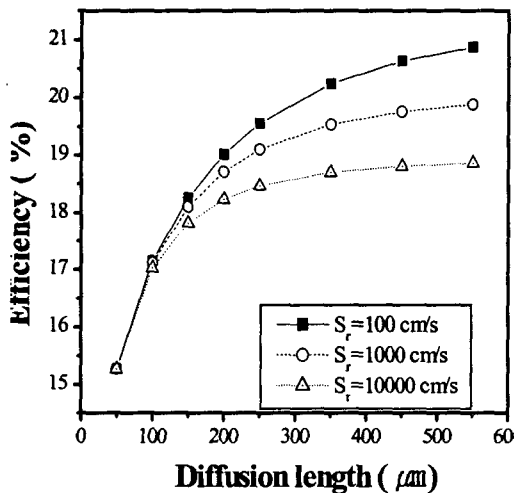


그림 3. 베이스층의 소수반송자 확산거리와 후면 재결합 속도에 따른 변환효율

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

그림 3에 이들이 변환효율에 미치는 영향을 보였다. 소수 반송자 확산 거리가 100 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. 확산 거리가 p층의 두께인 250 μm 이상이 되면 단락 전류는 포화상태가 되어 거의 증가하지 않게 되며, 개방 전압은 베이스 포화 전류(I_{0b})가 감소하므로 전체적인 전지의 역 포화전류가 감소하여 계속 증가하게 된다. 따라서 효율이 계속 증가하는 것은 개방전압의 영향으로 해석된다.

4.2 에미터층의 변화에 따른 변환 효율

그림 4에서는 에미터층의 표면저항이 태양전지의 효율에 미치는 영향을 그래프로 나타낸 것이다.

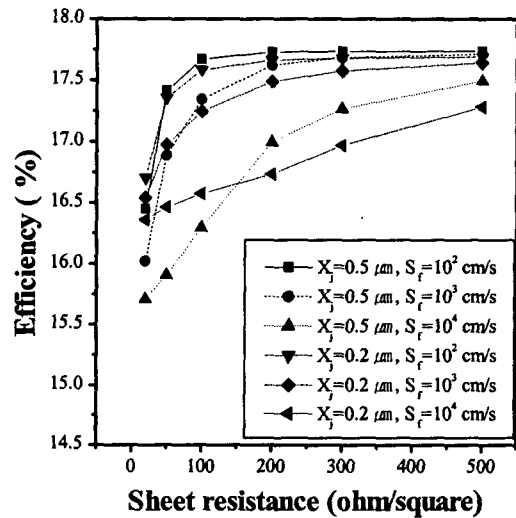


그림 4. 에미터층의 접합깊이, 전면 재결합 속도, 면저항에 따른 변환효율

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

후면의 재결합 속도가 에미터층의 모의 실험에 주는 영향을 최소화하기 위하여 재결합 속도는 100 cm/s로 고정하고 에미터층의 모의 실험을 수행하였다. 에미터층의 표면저항은 전면 전극을 설계할 때 매우 중요한 요소이므로 이를 이용하여 도핑 농도를 변화 시켰다.

에미터층의 표면 재결합이 1000 cm/s이하던 경우에 표면 저항이 약 100 Ω/□이하에서 변환 효율이 급격히 떨어짐을 볼 수 있다. 이는 도핑 농도가 높아짐에 따라 에미터층의 반송자 이동도가 현저

히 떨어지고 내부의 재결합이 증가하여 단락 전류와 개방전압이 급격히 감소하는 것으로 해석된다. 재결합을 1000 cm/s 이하로 떨어뜨릴 수 있는 공정을 확립할 경우 적절한 에미터층의 면저항은 약 100 Ω/\square 이나 모의 실험에서 사용된 것과 같이 전면 전극이 차지하는 면적을 전지 면적의 4% 이하로 유지하면서 동시에 직렬저항을 0.5 Ω 이하로 유지할 수 있는 그리드의 설계가 필수적이다.

4.3 후면전계 층의 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 1에 전면 재결합 속도 100 cm/s, 에미터 면저항 100 Ω/\square , 베이스 확산거리 200 μm 인 경우의 후면 전계의 특성이 전지 효율, 개방전압, IQE에 주는 영향을 보였다. 접합 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 확산 거리가 도핑 농도에 반비례하므로 적정 농도가 필요하다. 모의 실험 결과 도핑 농도 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, 접합 깊이는 약 5 μm 정도가 가장 적절함을 알 수 있다.

5. 결론

고효율 태양전지를 만들기 위한 가장 단순한 접근법은 어떻게 하면 광생성되는 전자-정공쌍을 많이 만들 수 있을까와 이를 손실됨이 없이 외부로 끌어내는가에 달려있다. 본 논문에서는 태양전지를 구성하고 있는 각 층의 요소들이 변환 효율에 미치는 영향을 조사하여 향후 고효율 다결정 태양전지 제작의 방향을 제시하였다. 태양전지 변환효율에 영향을 미치는 전, 후면 재결합 속도, 소수 반송자 확산거리, 접합깊이, 에미터 면저항, 후면 전계층 등을 조사하였다.

베이스층에 대한 모의 실험 결과 소수 반송자 확산거리가 100 μm 이하에서는 후면 재결합 속도가 전지의 효율에 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알았으며, 향후 고효율 태양전지를 제작하기 위해서는 소수 반송자 확산거리를 150 μm 이상 후면 재결합 속도를 1000 cm/s 이하로 하기 위한 효과적인

bulk 및 후면의 passivation 공정의 확립이 필수적임을 알았다. 에미터층에 대한 모의 실험결과 전면 전극의 차광 면적과 직렬저항 성분을 무시할 수 있다면 에미터의 면저항이 약 100 Ω/\square 정도에서 변환 효율이 포화되는 것을 알았으며, 이때 전면 재결합 속도는 1000 cm/s 이하가 되어야 함을 알았다. 같은 면저항에서는 접합깊이가 IQE에 미치는 영향을 극히 미약했으며, 표면 재결합속도가 중요한 변수임을 알았다. 후면 전계 형성에 관한 모의 실험 결과 농도 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, 접합 깊이는 약 5 μm 정도가 가장 적절함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2001년도 기초전력공학공동연구소의 연구비에 의해 지원되었습니다.

참고 문헌

- [1] D. M. Chapin, C. S. Fuller, G. L. Pearson, "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power", J. Appl. Phys., Vol. 25, pp676, 1954.
- [2] J. Zhao, A. Wang, M. A. Green, "19.8% Efficient 'honeycomb' Textured Multicrystalline and 24.4% Monocrystalline Silicon Solar Cells", Appl. Phys. Lett., Vol. 73, pp1991-1993, 1998.
- [3] 임동건, "투명전도막을 이용한 저가 고효율 다결정 실리콘 태양전지에 관한 연구", 성균관대학교 석사학위 논문, pp. 6-8, 1998.
- [4] 김상수, "결정입계의 영향을 줄인 다결정 실리콘 태양전지의 효율 향상에 관한 연구", 성균관대학교 석사학위 논문, pp. 32-34, 1997
- [5] J. Zhao, A. Wang, M. A. Green, "19.8% Efficient 'honeycomb' Textured Multicrystalline and 24.4% Monocrystalline Silicon Solar Cells", Appl. Phys. Lett., Vol. 73, p.1991-1993, 1998.