

PC1D 시뮬레이션을 통한 다결정 실리콘 태양전지 최적화 설계

김지현, 이영석, 정우원, 이준신*
성균관대학교

An Optimization of Crystalline poly-Si solar cell by using a PC1D Simulation

Jihyun Kim, Youngseok Lee, Woowon Jeong, Junsin Yi
Sungkyunkwan Univ,

Abstract - 다결정질 실리콘 웨이퍼의 도핑깊이, 도핑농도, 전면 재결합 속도, 면저항은 태양전지의 효율을 결정하는데 중요한 요소이다. 태양전지의 높은 효율을 얻기 위해 PC1D를 이용하여 태양전지의 에미터 도핑 깊이와 농도, 에미터 면저항, 전면 재결합 속도를 조절해 보았다. 그 결과로 최적화된 요소들은 peak doping 10^{18}cm^{-3} , depth factor $0.5 \mu\text{m}$, front recombination velocity 10^2cm/s , sheet resistance $50 \Omega/\square$ 를 얻을 수 있었다. 최적화 과정을 통하여 우리는 peak doping과 면저항이 높은 효율을 얻기 위한 중요한 요소가 된다는 사실을 알 수 있었다. 본 논문에서는 더 자세한 시뮬레이션 요소값과 그들이 태양전지에 미치는 영향에 대해 알아보려고 한다.

1. 서 론

실리콘 태양전지는 태양전지 시장의 95% 정도를 점유하고 있다. 실리콘 태양전지는 크게 단결정과 다결정으로 나눌 수 있다. 단결정 실리콘은 다결정 실리콘에 비해 에너지 전환효율이 1%가량 더 높으며, 이러한 뛰어난 에너지 전환효율성 때문에 단결정 실리콘 태양전지의 평균판매단가가 비교적 높아진다. 단결정 실리콘은 순도 높은 폴리실리콘을 필요로 하며, 이는 비싼 가격으로 이어지기 때문이다. 현재 태양광 시스템의 지상 전력 응용에서 가장 큰 과제는 태양전지의 가격하락에 있다. 세계의 현재 추세는 실용화에 가장 타당한 대안으로 다결정 실리콘을 사용한 태양전지를 제작하여 기존의 단결정 실리콘 웨이퍼 보다 가격이 30~40% 저렴하고 변환효율도 기존 단결정 태양전지에 근접하는 기술력을 확보하였기 때문에, 최근에는 이미 단결정 실리콘 태양전지 생산량을 앞지르고 있다. 다결정 실리콘은 재료 내부의 원자가 규칙적으로 배열되어 있는 방향이 서로 다른 부분으로 구성되어 있다. 따라서 원자 배열의 "불연속면"이 존재하게 되고 이러한 불연속면 때문에 전력변환효율이 단결정에 비해 낮다. 그러나 제조공정이 간단하고 대량 생산이 가능하여 가격이 저렴하다는 큰 장점을 갖고 있다. 다결정 실리콘 태양전지는 현재 실험실 수준에서는 21% 내외의 에너지 변환효율을 달성하여 초고효율 태양전지 제조분야의 기술력을 확보하였으므로 앞으로의 발전가능성이 무궁무진하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 PC1D를 활용하여 다결정 실리콘 태양전지의 베이스 비저항, 에미터의 도핑 농도, p층, n층 전면 재결합속도의 변화를 통해 최적의 변환효율을 얻을 수 있도록 제시하였다.

2. 본 론

2.1 실험

모의 실험에 사용된 프로그램은 호주 UNSW에서 개발한 PC1D이며, 실제 고효율 태양전지 제작에 이용될 수 있도록 p-n접합 태양전지의 구조를 이용하였다. 물질은 기존에 많이 사용하고 있는 두께 240um의 poly silicon을 사용하였다. 모의 실험을 하기 위해 사용된 설정 값은 아래 <표1>에 나타내었다.

표 1. 모의실험을 위한 시뮬레이션 조건

Device	
Device area	148.6cm ²
Front surface Texture Angle	54.74°
Front surface Texture Depth	3μm
Exterior front reflectance	3%
Region	
Thickness	270μm

Carrier lifetime	100cm/s
p-type background doping	10^{17}cm^{-3}
Rear recombination velocity	40.7cm/s

최적화된 조건을 찾기 위한 절차를 <그림 1>에 나타내었다.

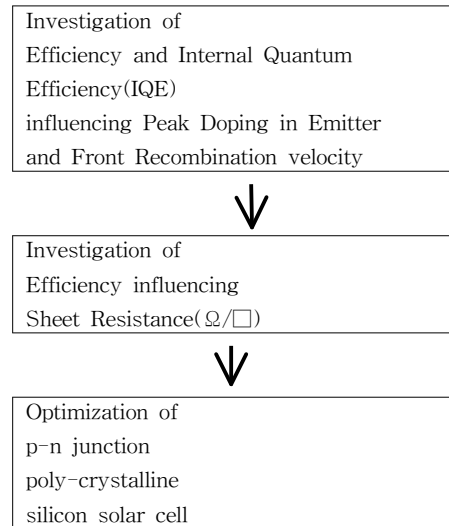


그림 1. PC1D 모의실험을 통한 최적화 순서도

에미터 층의 최적화를 위하여 사용된 변수는 depth factor, 전면 재결합 속도이며, 태양전지의 효율과 internal quantum efficiency (IQE)에 미치는 영향을 조사하여 높은 변환효율을 얻기 위한 각 요소의 적정값을 제시하였다. depth factor는 0.5, 1, 2, 3, 4의 경우에 대해 조사하였으며, 전면 재결합 속도는 10cm/s, 10²cm/s, 10³cm/s, 10⁴cm/s에 대해서 조사하였다. 여기서 표면저항을 찾는 이유는 전면 전극 설계 시에 직접 최적화된 값을 이용할 수 있기 때문이다.

2.2 결과 및 토론

베이스층 도핑농도를 $4.02 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, 비저항을 $0.2177 \Omega \times \text{cm}$, 에미터층 background doping을 10^{17}cm^{-3} 로 고정하고 에미터층의 peak 도핑농도와 두께를 변화시켜 보았다. PC1D에는 도핑 프로파일 시 다음과 같은 4가지 함수를 이용할 수 있다.

$$\text{Uniform } N(x) = N_0; x_p < x < x_p + x_d$$

$$\text{Exponential } N(x) = N_0 e^{-|x-x_p|/x_d}$$

$$\text{Gaussian } N(x) = N_0 e^{-(x-x_p)^2/x_d^2}$$

$$\text{Erfc } N(x) = N_0 \text{erfc}((x-x_p)/x_d)$$

여기서, No는 peak doing, x_d는 depth factor, x_p는 peak position을 말한다. N(x)=No (x<x_p, Erfc 형태)을 나타낸다. 본 실험에서는 Erfc 방식을 채택하여 시뮬레이션을 해보았다.

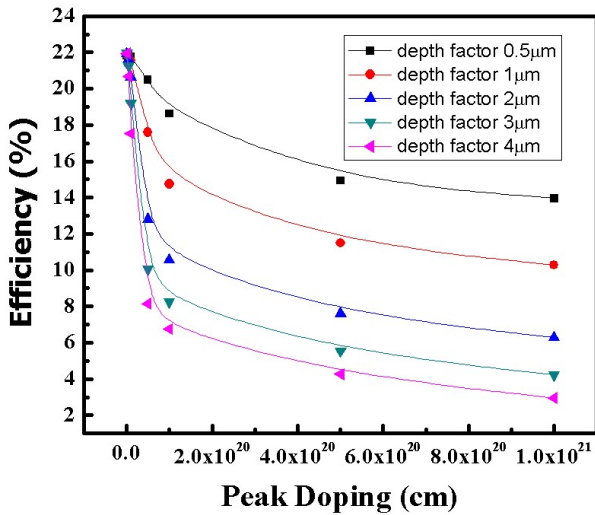


그림 2. 에미터층 도핑농도와 depth factor에 따른 변환효율

그림 2에서 보이는 것처럼 도핑농도가 높아질수록 태양전지의 효율이 낮아지고, 에미터층의 두께가 두꺼울수록 효율이 낮아짐을 알 수 있다. 높은 개방전압을 얻기 위해 과도한 도핑을 하는 경우 반송자의 이동도가 감소하며, 과도한 불순물과의 산란 영향 때문에 재결합 속도가 커지고 반송자 수명시간도 감소한다. 또한 너무 낮은 도핑을 한 경우에는 표면 면저항이 너무 커져 직렬저항에 의한 손실이 발생하고 곡선인자 충실도가 감소하는 경향이 나타난다. 이를 개선하기 위해 핑거와 핑거 사이를 줄이기 위한 연구가 진행되지만 차광손실(shadow loss)가 증가하여 단락전류의 감소를 가져왔다. 따라서 광에너지를 효과적으로 이용하기 위해서 에미터의 두께와 도핑농도를 최적화함으로써 표면재결합을 줄여야 한다. 기존공법으로는 면저항에 있어서 $40\Omega/\square$ 농도에 있어서 $ND=10^{18}cm^{-3}$ 의 값에서 변환효율의 가장 좋은 특성이 나왔다.

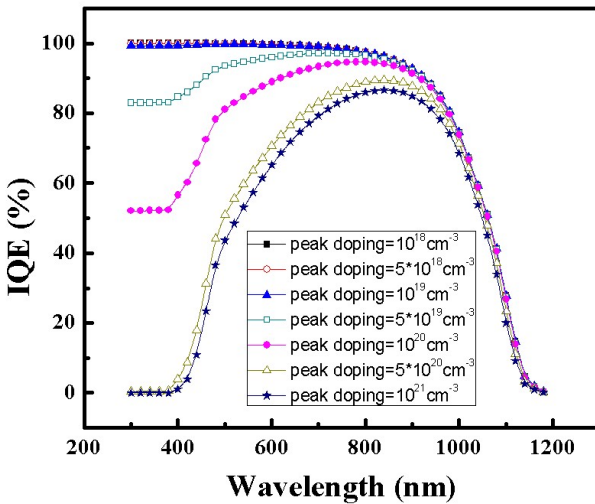


그림 3. 에미터층 도핑농도에 따른 IQE

IQE는 태양전지가 입사된 태양광 스펙트럼을 얼마만큼 효과적으로 이용하는가를 평가할 수 있는 매우 중요한 특성이다. 에미터층은 비교적 낮은 에너지를 가지고 있는 장파장 영역의 IQE특성에 많은 영향을 주고 있으며 이를 높이는 것은 효율향상을 위해 필수적이다. 그림 3에서 peak doping 농도는 장파장의 경우에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 단파장의 경우에는 도핑을 과다하게 했을 경우 불순물의 과도한 산란 영향으로 반송자 수명시간이 감소하여 수집효율이 급격히 낮아짐을 확인할 수 있었다.

표면 재결합 모델은 single Shockley-Read-Hall(SRH) energy level을 여러 전자와 정공의 lifetime과 적절한 밴드갭 이내의 에너지 레벨로 제공한다. S_n 이나 S_p 가 0이 아닌 경우, SRH 표면 재결합율은

$$R_s = \frac{S_n S_p (pn - n_{ie}^2)}{S_p (p + n_{ie} e^{-E_f/kT}) + S_n (n + n_{ie} e^{E_f/kT})}$$

로 나타낼 수 있다. S_n 와 S_p 의 값은 재조합 수식에 사용하기 위해 실제 장치의 온도와 표면의 밀도가 도핑을 반영하여 수정해서 대입하여야 한다.

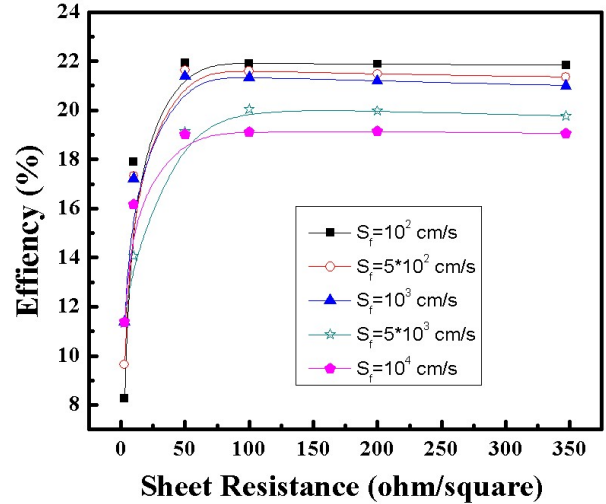


그림 4. 전면 재결합 속도에 따른 변환효율

그림 4는 면저항과 전면 재결합 속도에 따른 변환효율을 나타낸 것이다. 일정한 전면 재결합 속도 하에서 면저항의 증가는 접합깊이가 얇아지는 것으로, 전자와 정공의 수집효율이 증가하여 변환효율이 증가하게 되는 것이다. 면저항이 커짐에 따라 저항손실이 커지기 때문에 저항손실을 줄이기 위하여 핑거 간격이 줄어들어야만 한다. 이 때 핑거 간격이 줄어들면서 광 손실도는 커지기 때문에 이를 고려하여 핑거 간격이 결정된다. 또한 면저항이 커질수록 일반적으로 낮은 에미터 접합깊이를 갖는다. 이러한 낮은 에미터 접합은 전극 열처리 공정인 "firing-through" 공정 시 접합 누설의 가능성을 최소화하는 소성 공정을 확립해야 한다.

3. 결 론

본 논문에서는 다결정 실리콘 태양전지를 이용하여 제작되는 태양전지의 최대 효율을 보이기 위한 조건들을 모의실험을 통해 제시하였다. 에미터층의 모의 실험 결과 peak doping은 $10^{18}cm^{-3}$, depth factor $0.5\mu m$, 면저항은 $50\Omega/\square$, 전면 재결합 속도는 $10^2 cm/s$ 이 될 때 최적화됨을 확인하였다. 결과적으로 $I_{sc} = -5.724(A)$, $V_{oc} = 0.733(V)$, $P_{max} = 3.242(W)$ 를 얻게 된다. 이로부터 최종 변환효율 21.8169%를 얻어낼 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이준신 김경해 공저, "태양전지공학", 그린, 2007
- [2] 이준신 김경해 공저, "태양전지 실무 입문", 두양사, 2008
- [3] 박창걸 전승표 박남규, "태양전지: Ubiquitous 시대의 태양전지", 한국과학기술정보연구원, 2005
- [4] 구와노 유키노리, "태양 전지란 무엇인가 : 태양전지를 자유 자재로 사용한다", 아카데미 서적, 1998
- [5] 이수은 이인 유창환 이준신, "PC1D를 이용한 cast poly-Si 태양전지의 최적화", 한국전기전자재료학회 99 추계학술대회 논문집, 553~556p, 1999
- [6] 이옥재 박성현 고재경 김경해 이준신, "삼결정 실리콘 태양전지의 19%변환 효율 최적조건 고찰에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 2002년도 하계학술대회 논문집, 318~321p, 2002