

1차원 모델링을 이용한 결정질 실리콘 태양전지의 디자인 해석

김동호^{†*} · 박상욱^{**} · 조은철^{***}

*재료연구소 표면기술연구부

**뉴사우스웨일즈대학

***현대중공업 기계전기연구소

Design Analysis of Crystalline Silicon Solar Cell Using 1-Dimensional Modelling

Dong-Ho Kim^{†*}, Sangwook Park^{**} and Eun-Chel Cho^{***}

*Department of Surface Technology, Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

**School of Photovoltaic & Renewable Energy Engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia

***Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co. LTD, Yongin, Korea

(2008년 9월10일 접수 : 2008년 10월 8일 최종수정 : 2008년 10월 10일 채택)

Abstract The simulation program for solar cells, PC1D, was briefly reviewed and the device modeling of a multicrystalline Si solar cell using the program was carried out to understand the internal operating principles. The effects of design parameters on the light absorption and the quantum efficiency were investigated and strategies to reduce carrier recombination, such as back surface field and surface passivation, were also characterized with the numerical simulation. In every step of the process, efficiency improvements for the key performance characteristics of the model device were determined and compared with the properties of the solar cell, whose efficiency (20.3%) has been confirmed as the highest in multicrystalline Si devices. In this simulation work, it was found that the conversion efficiency of the prototype model (13.6%) can be increased up to 20.7% after the optimization of design parameters.

Key words crystalline silicon solar cell, PC1D, device modelling, cell design, high-efficiency.

1. 서 론

세계적으로 화석연료의 사용을 줄이고자 하는 노력은 원유가격 상승에 따른 경제적 부담뿐만 아니라 최근 지구온난화에 따른 환경재앙 등이 국제적으로 이슈화되면서 적극적으로 진행되고 있다. 그러나, 국제 에너지 기구나 미 에너지국의 조사에 따르면 전세계 에너지수요는 앞으로도 꾸준히 증가하여 2030년에는 지금의 수치보다 약 50% 증가할 것으로 예상된다.¹⁾ 특히 석유는 중국, 인도 및 브라질 등 신흥 산업국의 경제성장에 따라 공업 원료나 자동차연료로서 그 소비량이 막대하게 증가하고 있기 때문에, 세계 각국은 에너지 수급안정, 경제성장, 환경보전을 위해 태양광과 풍력 등 재생가능한 에너지원의 기술개발과 실용화에 박차를 가하고 있다.

그 중 태양광 발전 분야는 유럽에서의 시장현실이 반영해 주듯 미래의 에너지공급원으로써 그 중요성이 증대

되고 있다. 미국도 utility solar assessment (USA) 연구를 통해, 산학연의 공동연구개발을 통해 2015년까지 태양광을 이용한 전기에너지 생산의 시장경쟁력을 확보하고 2025년경에는 총 전력의 약 10%를 태양광 발전으로 충당한다는 로드맵을 제시하고 있다.²⁾ 그 경제적 가치를 보면 태양광발전 시장은 지난 수년간 연평균 40%이상의 성장세를 이어오고 있으며, 최근에는 원재료인 폴리실리콘의 수급 부족이 해소되기 시작하면서 태양전지 산업의 성장 전망이 더욱 밝아지고 있다. 따라서 국내 기업들도 태양전지 산업에 대한 투자를 활발히 진행하고 있다.

국내 대학과 연구기관에서도 박막형 태양전지 및 차세대 태양전지(유기, 염료감응형)에 대한 많은 연구를 진행하고 있으나, 현재 시장의 절대량(90% 이상)을 차지하는 이른바 “제 1 세대” 결정질 태양전지에 대한 관심은 상대적으로 미흡한 현실이다. 본 고에서는 결정질 태양전지의 기본 이론과 디자인 해석에 유용하게 사용되는 모델링 기법인 PC1D프로그램을 소개하고, 이를 이용하여 태양전지의 에너지 변환효율을 높이기 위해 적용되는 기술들에 대한 모델링 해석결과를 제시한다.

[†]Corresponding author

E-Mail : dhkim2@kims.re.kr (D. H. Kim)

2. 실험 방법

2.1 PC1D 소개

호주 뉴사우스웨일즈대학(UNSW)에서 개발된 PC1D 프로그램은 결정질 태양전지의 작동원리를 이해하고 소자 특성을 평가하는데 가장 널리 활용된다. 1985년 첫 버전이 개발된 후, 지속적으로 보완되어 현재 5.9버전(2003)까지 업데이트된 프로그램이 공개되어있다.³⁾ 1996년 IEEE PV conference에서 소개된 4.0버전부터는 윈도우 기반의 프로그램이 개발되고, 계산 속도와 유저 인터페이스 및 결과 가시화 등 여러가지 기능이 개선되어 누구나 손쉽게 활용가능해짐으로써 세계적으로 태양전지에 관한 표준모델링 툴로 사용되고 있다.

2.2 모델링 기법

반도체물질내에 존재하는 전자와 정공의 연속방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\nabla \cdot J_n}{q} + G - U \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\nabla \cdot J_p}{q} + G - U \quad (2)$$

여기서, J_n 과 J_p 는 전자와 정공의 전류밀도를 나타내는 것으로, 다음과 같이 각각의 이동도와 캐리어 농도, 그리고 준페르미 에너지로 표현된다.

$$J_n = \mu_n n \nabla E_{Fn} \quad (3)$$

$$J_p = \mu_p p \nabla E_{Fp} \quad (4)$$

그리고, 위 식(1)과 (2)에서 G항은 빛의 흡수에 의한 electron-hole pair의 발생율을 나타내고, U항은 재결합에 의한 소진율을 나타낸다.

한편, 전자와 정공의 농도(n, p)는 각각의 준 페르미 에너지에 의존하는 Boltzmann식의 형태로 표현가능하다.

$$n = N_c \exp[-(E_c - E_{Fn})/kT] \quad (5)$$

$$p = N_v \exp[-(E_{Fp} - E_v)/kT] \quad (6)$$

특정 위치(x=0)에서의 equilibrium Fermi 에너지를 기준으로 하여 준 페르미 포텐셜(ϕ_n, ϕ_p)를 정의하고 electrostatic potential(ψ)을 이용하면, 식(1)과 (2)에 나타난 모든 변수는 이 세 가지 변수들(ϕ_n, ϕ_p, ψ)로 표현가능하다.

마지막으로 electrostatic potential 함수는 고정전하와 전자 및 정공을 포함한 Poisson's equation으로 묘사된다.

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \Psi) = -\rho = -(\rho_{\text{fixed}} + p - n) \quad (7)$$

결과적으로, 반도체 내 전자와 정공의 움직임은 앞에서 언급한 세개의 변수와 세개의 지배방정식들로 묘사될 수 있다.

PC1D프로그램은 위와 같은 비선형 미분방정식을 1차원영역에서 유한요소법을 적용하여 그 해를 구한다. 넓은 도핑범위와 다양한 경계조건에서도 빠르고 정확한 결과값을 얻기 위하여 영역분할(discretization)과 재배치(re-noding)을 비롯한 몇 가지 수치해석적 기법들이 이용되는데, 본 논문의 주제에서 벗어나므로 생략하도록 한다. 그리고 내부의 광학 모델링과 캐리어 재결합 메카니즘 등에 대한 구체적 내용은 프로그램의 help메뉴를 참고하도록 한다.^{3,4)}

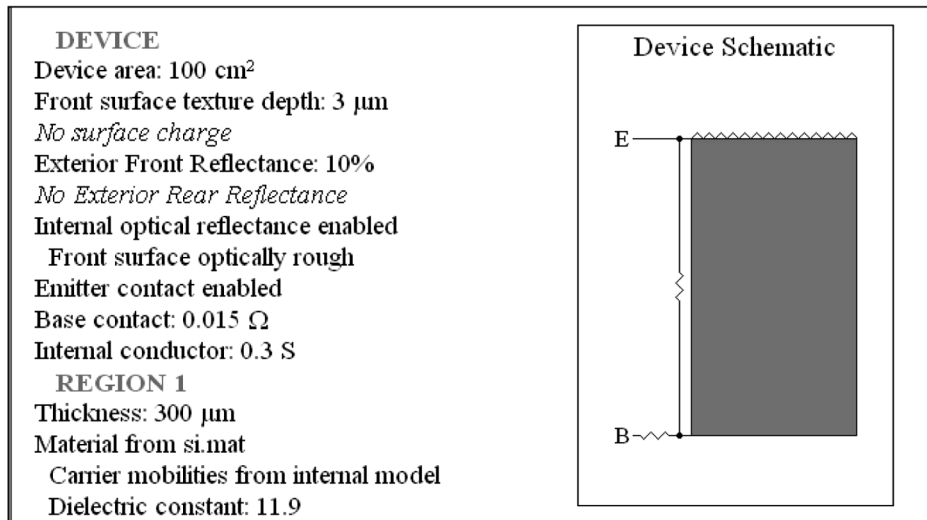


Fig. 1. PC1D parameter view window for Pvcell.prm.

2.3 활용예시

태양전지 모델링의 샘플 파일을 이용하여 실제 프로그램을 사용하는 방법을 간단히 소개한다. 프로그램을 실행하여 루트디렉토리에 포함된 Pvcell.prm 파일을 열어 보면 Fig. 1의 device schematic을 포함한 parameter view 화면이 나타난다. 이 모델은 상용 저가형 실리콘 태양전지 셀을 묘사한 것으로 주요특성은 Table 1에 나타난 바와 같다. 셀의 디자인이나 파라미터값을 변경하기 위해서는 device메뉴의 각 항목을 선택하거나 화면상의 해당위치를 클릭하여 수정할 수 있다.

일반적으로 태양전지의 작동성능은 기준조건(AM1.5, 25°C)에서 전류전압곡선(IV curve)을 조사하고 각 파장별로 양자효율(quantum efficiency; QE)을 파악함으로써 평가할 수 있다. PC1D에서는 이 두 가지 평가법에 대한 excitation표준파일들을 제공하고 있다. 계산을 실행하면 equilibrium–steady state–transient 모드 순으로 시뮬레이

션이 진행되며 최종 시뮬레이션 결과가 graphs view 화면에 제시된다. 에너지 밴드, 캐리어의 발생 및 재결합 속도, 캐리어 농도, IV curve 등 다양한 결과값을 확인할 수 있으며, Fig. 2에서는 그 중 IV curve와 QE 결과값을 나타냈다.

태양전지의 성능을 결정하는 대표적인 인자들에 대한 결과값을 Table 2에 나타냈다. 현재까지 보고된 다결정질 실리콘 태양전지 중 최고효율을 검증받은 셀⁵⁾과 비교하여 보면, 모의실험의 default 모델은 단락전류(Isc)와 개방전압(Voc), 그리고 fill factor(FF) 등 모든 면에서 개선되어야 할 부분이 많다는 것을 확인할 수 있다. 다음 장에서는 결정질 태양전지분야에서 현재까지 개발되거나 산업에 적용되고 있는 기술들을 중심으로 default 모델의

Table 1. Default values of parameters in Pvcell.prm

parameter	characteristics and values
substrate	p-type Si, thickness 300 μm
base doping	1.513e+16/cm ³ , resistivity 1 Ω · cm n-type diffusion layer
front emitter	peak doping 2.87e+20/cm ³ (erfc profile) ^a sheet resistance 50 Ω/sq.
bulk	diffusion length = 139 μm,
recombination	minority carrier lifetime = 7.2 μs
surface	front surface = 1 × 10 ⁶ cm/s
recombination	rear surface = 1 × 10 ⁵ cm/s
reflectance	external front (10%)
	internal front (75-92% diffuse) ^b rear (70% specular)
parasitic resistance	series base 0.015 Ω emitter 1.e-6 Ω
	shunt conductance = 0.3 S

^a complementary error function
^b first bounce = 75%, subsequent bounce = 92%

Table 2. Simulation results on characteristic properties of multicrystalline Si solar cells.

	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	효율 (%)
best multicrystalline Si ⁵⁾	37.7	664	80.9	20.3
default Model	31.8	592	72.2	13.6
+front design ^a	33.6	593	71.5	14.3
+L _n = 300 μm	34.7	601	71.1	14.9
+BSF ^b (for L _n = 139 μm)	36.0 (34.0)	606 (595)	71.7 (71.3)	15.8 (14.5)
+passivation ^c	37.5	628	72.4	17.1
+optimize n ⁺ doping ^d	37.9	637	72.6	17.5
+minimize R _s & R _{sh} ^e	38.1	639	80.5	19.6
+high quality base ^f	37.6	663	81.2	20.3
+back reflector 90%	38.4	663	81.2	20.7

^a external front reflection (10 → 5%)
^b p+ doping (1e+19/cm³) of 5 μm (uniform profile)
^c at front surface = 1 × 10³ cm/s, at rear = 1 × 10² cm/s
^d peak doping (1e+20/cm³), junction depth (0.3 μm), sheet resistance (114 Ω/sq.)
^e series resistance (0.015 → 0.005 Ω), shunt conductance (0.3 → 0.01 S)
^f 100 μm thick base with resistivity of 0.6 Ω · cm

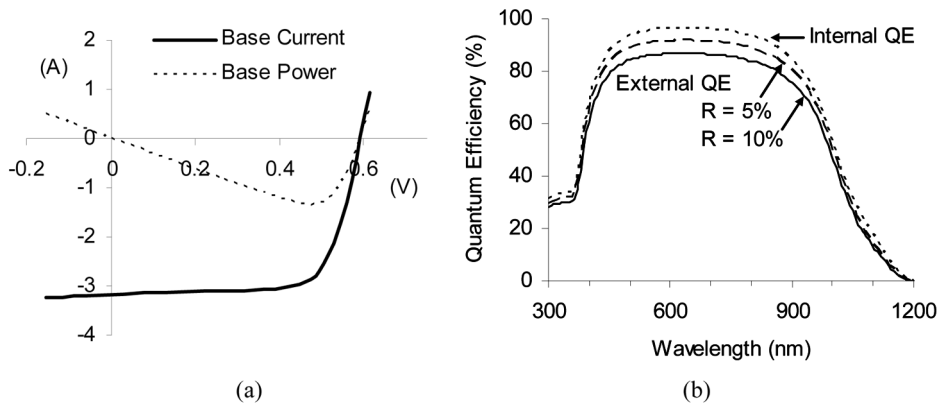


Fig. 2. Performance of the default solar cell model; (a) IV curve and (b) quantum efficiencies.

효율을 개선하는 일련의 과정을 PCID를 이용한 모의실험을 통해 제시한다.

3. 결과 및 고찰

태양전지의 효율을 높이기 위하여 셀 디자인을 개선하거나 공정조건을 최적화함에 있어서 대표적으로 고려해야 할 사항은 다음과 같다.⁶⁾

- 광 이용률의 최대화
- 캐리어 재결합의 최소화
- 기생 저항(parasitic resistance)의 최소화

3.1 Front surface design

태양전지의 광흡수율을 높이기 위해서는 먼저 조사되는 빛의 차단과 반사를 최소화해야 한다. 이를 위해서 셀 전면에 반사방지막을 코팅하거나 표면 texturing을 적용하여 외부반사율을 줄인다. 한편, 전면 전극에 의한 광차단을 줄이면서도 직렬저항의 증가를 최소화하기 위하여 전극의 디자인을 최적화한다거나 buried contact 구조를 적용할 수 있다. PCID를 이용한 본 모의실험에서, 반사방지막을 적용하고 전극디자인을 최적화하여 외부반사율이 10%에서 5%로 감소한다고 가정하면, Figure 2의 (b)에 나타난 바와 같이 외부 양자효율이 향상되고 이로 인하여 에너지변환효율이 13.6%에서 14.3%로 증가한다는 것을 알 수 있다.

3.2 Bulk recombination

태양전지의 에너지변환과정은 크게 빛에 의한 캐리어의 발생과 전계에 의한 캐리어의 분리·수집으로 나눌 수 있다. 태양전지에 조사되는 빛과 전지의 광특성이 동일하다고 가정하면, 발생된 캐리어의 재결합을 최소화하면서 수집하는 것이 효율에 가장 큰 영향을 미친다. 캐리어의 재결합 특성은 벌크상과 표면에서의 재결합속도로 구분될 수 있는데, 벌크상의 재결합 특성은 소재의 고유한 특성에 기인하는 것으로 도핑정도와 공정조건에 의해 좌우된다. 다결정질 실리콘 소재의 경우 도핑정도에 따라 소수 캐리어 수명이 약 수 μs ~수십 μs 의 값을 지니고 있다. 일반적으로 캐리어 수명은 소자제조 시 고온공정을 거치면서 나빠지게 되는데, Schultz 등은 고온공정을 대체하여 소수 캐리어의 수명을 50 μs 이상 유지함으로써 20%이상의 효율을 지닌 다결정질 실리콘 태양전지를 제조하였다.⁷⁾ 이 값을 확산길이(Ln)로 전환하면 약 367 μm 에 해당되는데, 다시 말해 베이스에서 발생된 전자가 거의 모두 재결합없이 pn 접합부로 이동할 수 있는 것이다. 모의실험 상에서도 소수 캐리어의 확산길이를 기판두께(300 μm)까지 증가시키면, 효율이 14.9%까지 높아짐을 알 수 있었다.

3.3 Back surface field (BSF)

후면전계는 전지 후면에 기판보다 높은 p형 도핑층을 형성함으로써 얻을 수 있으며, 주로 알루미늄을 이용한 확산공정이 적용된다. 이는 금속 전극과의 접촉저항을 줄일 뿐만 아니라, 베이스층의 소수 캐리어인 전자에 대한 포텐셜 장벽을 추가적으로 형성함으로써 후면의 유효 재결합속도를 감소시키는 효과를 준다.

후면전계효과는 소수 캐리어 확산길이가 베이스의 두께보다 크고 후면의 재결합속도가 큰 경우에 뚜렷이 관찰된다. Fig. 3에서 후면전계의 영향으로 단락조건에서의 누적 재결합속도가 변화된 결과를 확인할 수 있다. 본 모의실험 조건에서는, 전체 재결합에서 후면의 재결합속도가 차지하는 비중이 대략 50%에서 후면전계를 적용함으로써 약 8%이하로 크게 감소하였다. 이러한 유효 재결합속도의 감소는 단락전류의 증가(34.7 \rightarrow 36.0 mA/cm^2)로 이어지고, 포텐셜장벽의 추가에 따른 개방전압의 상승(601 \rightarrow 606 mV)과 더불어 결과적으로 태양전지의 효율을 14.9%에서 15.8%까지 높이게 된다. 그러나, 이러한 후면전계의 효과는 소수 캐리어 확산길이가 기판두께보다

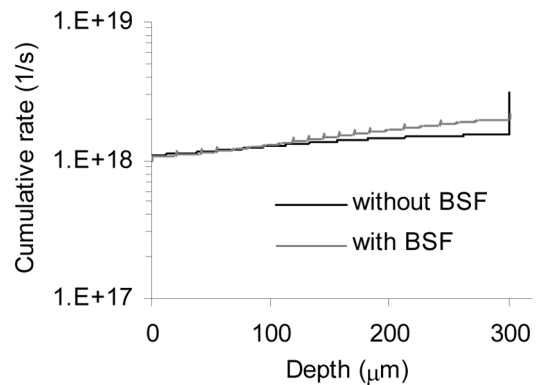


Fig. 3. Effect of BSF on the cumulative recombination velocity of solar cell at short circuit condition.

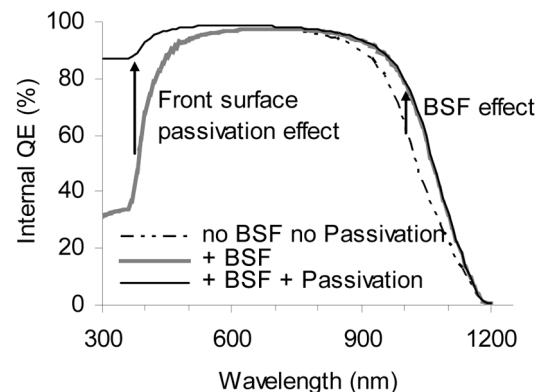


Fig. 4. Surface passivation effects on the internal quantum efficiency.

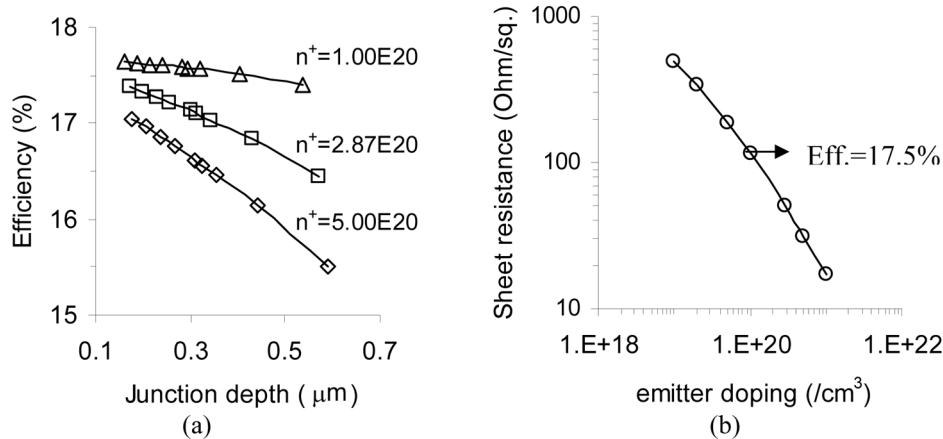


Fig. 5. Effects of junction depth and emitter doping on Si solar cell performance; (a) efficiency changes with the variation of junction depth, and (b) sheet resistance according to the emitter doping (junction depth = 0.3 μm).

작은 경우(139.1 μm)에는 그다지 크게 나타나지 않는다는 사실을 모의실험 결과를 통해 확인할 수 있다(Table 2 참고).

3.4 Surface passivation

일반적으로 실리콘 표면이나 금속 전극과의 경계면에는 많은 수의 결함이 존재하기 때문에 표면 재결합속도 (surface recombination velocity: SRV)가 매우 크다. 따라서 산화막 형태의 passivation층을 형성하여 표면 재결합속도를 감소시킨다. Fig. 4는 표면 재결합속도를 각각 1/1000 수준($\text{SRV}_{\text{front}} = 1000 \text{ cm/s}$, $\text{SRV}_{\text{rear}} = 100 \text{ cm/s}$)으로 감소시킨 경우 전지의 내부양자효율이 어떻게 변하는지를 보여주고 있다. 광흡수가 가장 많이 일어나는 전면부의 재결합속도 감소는 에미터층에서의 캐리어 손실을 줄일 수 있어 특히 단파장에 대한 양자효율을 크게 향상시킨다. 한편 장파장 영역의 양자효율은 후면전계가 이미 적용된 상태에서는 뚜렷한 차이를 보이지 않는다. 이는 앞에서 언급한 바 있듯이 후면전계에 따른 유효 재결합속도의 감소 때문이다. 만약 후면전계가 존재하지 않거나 그 효과가 상대적으로 미비한 경우($L_n \ll \text{베이스층 두께}$)엔, 후면의 passivation효과를 장파장에서 뚜렷이 확인할 수 있다. Table 2에 제시한 바와 같이 표면 passivation을 추가함으로써 태양전지의 성능이 모든 특성인자들에 대해서 개선되고 결과적으로 에너지변환효율이 크게 향상될 수 있다(15.8% \rightarrow 17.1%).

3.5 Emitter doping

에미터층의 도핑농도와 접합깊이가 태양전지의 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해, complementary error함수 형태의 n^+ 확산층을 가정하고 최대도핑량(peak density)과 접합깊이(junction depth)를 변화시키면서 효율을 조사

Table 3. Typical values of parasitic resistances.⁸⁾

Resistance	Lab.	Commercial
직렬저항	0.5 $\Omega\text{-cm}^2$	1.3 $\Omega\text{-cm}^2$
선티저항	M $\Omega\text{-cm}^2$	10 ³ $\Omega\text{-cm}^2$

하였다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이, 본 모의실험의 도핑범위에서 접합깊이가 커질수록 효율이 감소하며 도핑량이 증가할수록 효율의 감소폭이 커짐을 알 수 있다. 이는 도핑량이 증가함에 따라 에미터층 내 캐리어의 재결합이 늘어나고 이동도와 확산길이가 줄어들기 때문이다.

특히 접합깊이가 큰 경우엔 확산길이의 감소에 따른 효율저하가 더욱 크게 나타난다. 태양전지의 에미층은 빛의 흡수가 가장 많은 곳으로 여기서 발생된 캐리어가 수집되지 못하고 재결합으로 소진되면 에너지변환효율에 악영향을 준다. 따라서 이른바 ‘dead layer’라 불리는 에미층의 효율감소를 막기 위해서는 일반적으로 접합깊이를 최소화한 shallow junction을 형성한다.

한편, 전면 전극과의 접촉저항과 전도성을 고려하면 도핑농도는 어느 정도 높은 값을 유지하여야 한다. Fig. 5(b)에 제시한 바와 같이 에미터층의 도핑을 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 이하로 감소시키면 면저항이 100 Ω/sq .이상으로 증가하여, 에미터층 내 전극방향으로의 전도특성이 저하될 수 있다. 따라서 n^+ 도핑의 최적화가 요구되며, 나아가 고효율 전지에서는 buried contact구조가 적용되고 있다.

PC1D프로그램은 1차원 모델링 툴이므로 이에 대한 해석에 한계를 지니고 있다.

3.6 Parasitic resistances

지금까지 광흡수를 높이고 캐리어의 재결합을 줄이는 과정을 통해 단락전류와 개방전압을 개선함으로써 효율을 13.6%에서 17.5%까지 향상시켰다. Table 2에서 최고

효율의 다결정질 실리콘 셀의 특성치와 비교해보면 추가적으로 fill factor(FF)의 개선이 요구됨을 확인할 수 있다. 이는 기생저항을 감소시킴으로써 가능한데, Table 3에 실험실 단계와 상업용 태양전지의 직렬저항과 셉트저항 값을 제시하였다. 이러한 값을 근거로 본 모델링 셀의 직렬저항과 셉트저항 값을 각각 0.5 및 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 에 해당되는 값으로 변경하면, FF가 72.6에서 80.5로 개선되고 결과적으로 에너지변환효율이 19.6%까지 크게 향상된다.

본 모델링 연구에서 비교 대상으로 채택한 최고효율의 다결정질 실리콘 태양전지는 고품위 기관(저항: $0.6 \Omega \cdot \text{cm}$, 두께: $100 \mu\text{m}$)을 사용한 것이다.⁷⁾ 이와 같은 특성을 지닌 기관을 대상으로 동일한 계산을 수행한 결과, Table 2에 제시한 바와 같이 효율을 비롯하여 모든 특성인자에서 최고효율의 셀과 근접한 값을 얻을 수 있었다. 추가적으로 후면의 반사율을 개선(70% → 90%)하여 단락전류를 증가시키면 최종적으로 20.7%의 효율을 지닌 태양전지를 디자인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 결정질 태양전지의 대표적인 모델링 기법인 PC1D프로그램을 소개하고, 이를 이용하여 태양전지의 작동원리를 이해하고 에너지변환효율을 높이기 위해 적용되는 기술들에 대한 모델링 해석결과를 제시하였다. 13.6%의 효율을 지닌 다결정질 실리콘 태양전지를 대상으로, 광흡수를 증대시키고 캐리어 재결합을 최소화하는 일련의 개선과정을 시뮬레이션을 통해 검증하면서, 최종효율 20.7%에 이르는 태양전지 모델을 디자인하였다. 이와 같은 해석기법은 실제 제조된 태양전지의 양자효율과 특성인자들(J_{sc} , V_{oc} 및 FF)에 대한 실험값을 모

사함으로써 효율향상에 필요한 결정적 파라미터를 판단하는데 도움을 줄 수 있다.

본 논문에서 제시한 디자인 개선순서는 절대적인 것이 아니며, 실제 공정 난이도나 소재특성에 따라 차이를 보일 수 있으며 생산에 적용하기 위해선 경제성도 고려해야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-611-D00015).

참 고 문 헌

1. L. B. Lave, MRS Bull. **33**(4), 291 (2008).
2. Utility Solar Assessment (USA) Study. Clean Edge Home Page. Retrieved Aug 28, 2008 from <http://www.cleaneledge.com/reports/reports-solarUSA2008.php>
3. Links PC1D. School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering Home Page. Retrieved Aug 28, 2008 from <http://www.pv.unsw.edu.au/links/products/pc1d.asp>
4. P. A. Basore and D. A. Clugston, presented at the University of New South Wales, Sydney, Australia (2003).
5. M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa and W. Warta, Progress in Photovoltaics: Research and Applications **16**(1), 61 (2008).
6. J. Nelson, The Physics of Solar Cells. p.190, Imperial College Press, London, England (2003).
7. O. Schultz, S. W. Glunz and G. P. Willeke, Progress in Photovoltaics: Research and Applications **12**(7), 553 (2004).
8. C. Honsberg and S. Bowden, Photovoltaics CDROM. Retrieved Aug 28, 2008 from <http://pvcdrrom.pveducation.org>