

PC1D 시뮬레이션을 이용한 결정질 실리콘 태양전지의 도핑 프로파일 모델링

최성진, 유권종, 송희은*

한국에너지기술연구원 태양광센터(sjchoi@kier.re.kr, y-gj@kier.re.kr, hsong@kier.re.kr)

The Doping Profile Modeling of Crystalline Silicon Solar Cell with PC1D simulation

Choi, Sung Jin, Yu, Gwon-Jong, Song, Hee-eun*

Photovoltaic Research Center, Korea Institute of Energy Research
(sjchoi@kier.re.kr, y-gj@kier.re.kr, hsong@kier.re.kr)

Abstract

The PC1D is widely used for modeling the properties of crystalline silicon solar cell. Optimized doping profile in crystalline silicon solar cell fabrication is necessary to obtain high conversion efficiency. Doping profile in the forms of a uniform, gaussian, exponential and erfc function can be simulated using the PC1D program. In this paper, the doping profiles including junction depth, dopant concentration on surface and the form of doping profile (gaussian, gaussian+erfc function) were changed to study its effect on electrical properties of solar cell. As decreasing junction depth and doping concentration on surface, electrical properties of solar cell were improved. The characteristics for the solar cells with doping profile using the combination of gaussian and erfc function showed better open-circuit voltage, short-circuit current and conversion efficiency.

Keywords : 결정질 실리콘 태양전지(crystalline silicon solar cell), 도핑 프로파일(doping profile), 접합깊이(junction depth), 도핑농도(doping concentration)

기 호 설 명

R_s : sheet resistance
PSG : phosphorous silicate glass
 $POCl_3$: phosphorous oxychloride

1. 서 론

시뮬레이션 프로그램을 이용한 태양전지의 연구는 태양전지 모델링에 따른 동작 특성이나 전기적, 광학적 특성을 예측해 볼 수 있어 실제 태양전지 제작에 큰 도움을 줄 수 있다.

PC1D, PC2D, AFORS-HET1D, Silvaco와 같은 프로그램이 있으며 본 논문에서 다른 PC1D 프로그램은 호주의 UNSW(university of new south wales)에서 개발된 것으로 1차원으로 결정질 태양전지를 모델링 할 수 있다.[1] 본 연구에서는 PC1D 프로그램을 이용하여 도핑 프로파일에 따른 결정질 실리콘 태양전지의 전기적 특성 변화를 분석해 보았다.

2. 본 론

2.1 PC1D에서의 도핑

PC1D 프로그램에서는 p형과 n형의 도핑을 할 수 있으며 도핑농도, 접합깊이, 면저항, 농도 최고점 등을 변화시킬 수 있다. 그리고 uniform, exponential, gaussian, erfc의 4가지 형태로 도핑 프로파일을 모델링 할 수 있다.[1] 그림 1은 PC1D 프로그램의 front diffusion 설정 화면으로 위에서 말한 도핑 프로파일 설정과 관련된 사항을 확인할 수 있다.

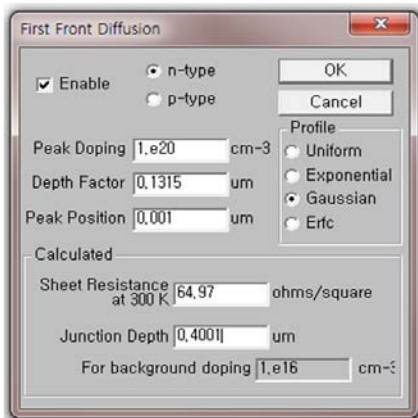


그림 1. Front diffusion 설정 화면(PC1D 프로그램)

그림 2는 그림 1의 front diffusion 설정에서의 4가지의 도핑 프로파일을 각각 모델링하여 깊이에 따른 불순물 농도를 나타낸 그래프이다. Base 기판은 태양전지 공정에서

가장 많이 이용되고 있는 p형의 실리콘 웨이퍼로 설정하였고 n형의 도핑을 하였다. 또한 접합깊이와 농도최고점을 같은 값을 지정하여 프로파일을 비교해 보았다. 4가지 각각 다른 형태의 도핑 프로파일을 보임을 확인할 수 있으며 태양전지 시뮬레이션 시에는 실제 공정을 통해 얻을 수 있는 도핑 프로파일과 유사한 형태의 함수를 적용하여 모델링해야 실제 태양전지 제작 시의 전기적 특성을 예측해 볼 수 있을 것이다.

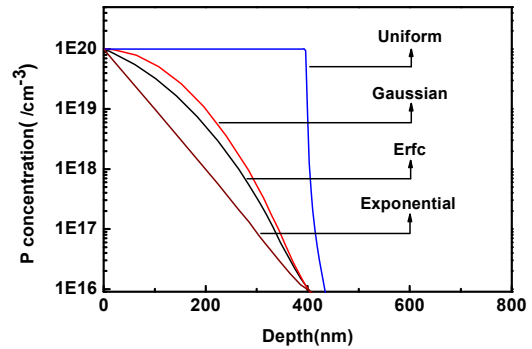


그림 2. PC1D 프로그램에서 적용되는 4가지 도핑 프로파일 형태

2.2 도핑 프로파일 모델링

표 1은 PC1D 프로그램에서의 각종 파라미터 값으로 본 연구에서는 모두 같은 값을 적용하였고 n형 도핑과 관련된 파라미터들만 변화를 주었다.

결정질 실리콘 태양전지 도핑에서는 불순물의 농도와 접합 깊이 그리고 도핑 프로파일의 형태가 매우 중요하다. 표 2는 PC1D에 적용할 접합 깊이와 불순물 농도 가변에 대한 조건들이다. 첫 번째로 접합깊이 가변 실험에서는 4가지의 조건을 적용하였고 조건당 50nm의 차이를 두었다. 표면에서의 도핑 농도는 $2.5 \times 10^{21} / \text{cm}^{-3}$ 의 같은 값으로 고정하였다. 그리고 두 번째로 도핑농도 가변 실험에서는 접합깊이를 400nm로 고정하였고 4가지의 다른 도핑농도 조건을 적용하였다.

각 조건 당 0.5 E21(/cm⁻³)의 농도 차이를 두었다.

표 1. PC1D 시뮬레이션에서 고정한 파라미터 값

Device area	1 cm ²
Substrate	p-type Si, thickness : 180 μm
Base doping	1.0 E16, n-type diffusion, resistivity : 1.47 Ω·cm
Emitter contact	1.0 E-6 Ω
Base contact	1.0 E-6 Ω
Bulk recombination	1000 μs
Reflectance	front external : 실제 측정치
	internal reflectance : front[92%(first bounce, subsequent bounce),specular], rear[65%(first bounce, subsequent bounce), diffuse]

표 2. 접합깊이와 불순물 농도 변화 실험 조건

	실험 1 (접합깊이 변화)	실험 2 (도핑농도 변화)
조건 1	250 nm	1.0 E21 cm ⁻³
조건 2	300 nm	1.5 E21 cm ⁻³
조건 3	350 nm	2.0 E21 cm ⁻³
조건 4	400 nm	2.5 E21 cm ⁻³

그림 3은 도핑 공정을 진행한 후 SIMS (secondary ion mass spectroscopy) 측정을 통하여 얻은 데이터를 나타낸 그래프이다. 깊이에 따른 불순물 농도를 알 수 있으며 도핑소스로서 POCl₃ 용액을 사용하여 n형 도핑을 하였고 55Ω/sq의 면저항 값을 얻었다. 그림 2의 gaussian 함수나 erfc 함수의 모양과 비슷하다고 할 수 있으나 kink(구부러짐)가 생기는 특이한 변화가 있다.[2] 이러한 형태의 도핑 프로파일도 PC1D를 이용하여 구현할 수 있으며 2개의 도핑 프로파일을 연결하여 모델링하게 된다. 실제 실험을 통한 도

핑 프로파일은 그림 3과 같은 형태를 나타내므로 PC1D 프로그램을 통해 비슷한 형태를 모델링 하였고 특성을 분석하였다.

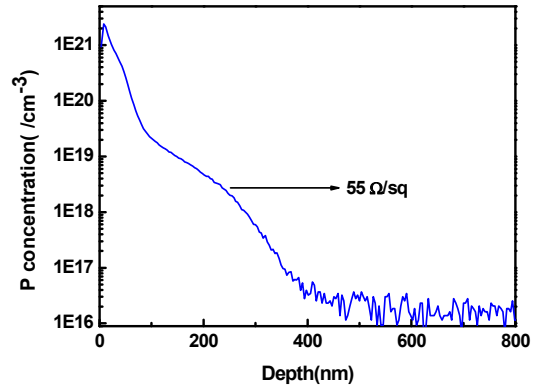


그림 3. 실제 실험에 의한 도핑 프로파일 형태 (확산로를 이용한 POCl₃ 도핑, R_s=55Ω/sq)

2.3 결과 및 고찰

그림 4는 표 2의 첫 번째 실험조건에 따라 도핑 프로파일을 모델링 한 것으로 표면에서의 깊이와 도핑 농도를 나타내고 있다. 표면에서의 도핑농도는 2.5 E21의 같은 값으로 고정하였고 gaussian 함수를 사용하여 도핑 프로파일을 모델링하였다. 접합깊이의 변화에 따른 도핑 프로파일을 확인할 수 있으며 접합깊이는 50nm의 차이를 두었다.

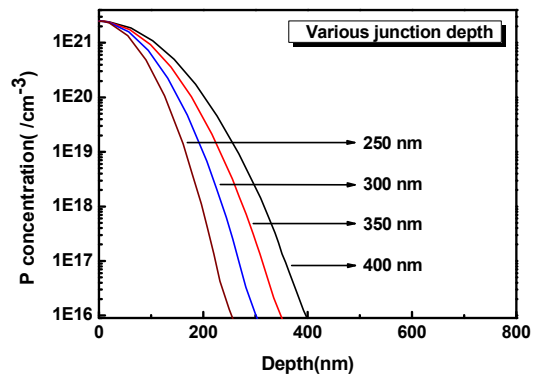


그림 4. 접합 깊이에 따른 도핑 프로파일 형태 (PC1D modeling)

표 3은 그림 4의 도핑 프로파일의 적용하여 도출해 낸 시뮬레이션 결과 값으로 광 조사에 따른 전기적 특성을 보여주고 있다. 접합 깊이의 증가에 따라 개방전압은 증가하고 있으나 단락전류 밀도는 감소하고 있다. 접합 깊이의 증가는 도핑농도의 증가를 의미하므로 built in potential이 증가하게 되고 결국 개방전압이 증가하게 되는 것이다.[3] 그러나 표면에서의 n형 도핑농도의 증가로 인해 전자의 반송자 수명이 감소해 단락전류 밀도는 감소하게 된다.[4] 광 변환효율은 가장 낮은 250 nm의 접합깊이에서 가장 높은 19.2%를 기록하였고 이는 결정질 실리콘 태양전지에서 shallow emitter 형성의 중요성을 말해주고 있다.

표 3. p-n junction depth에 따른 태양전지의 전기적 특성 (광 조사 특성)

Junction depth (nm)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	η (%)
250	36.8	626.6	19.2
300	36.2	628.3	18.9
350	35.6	629.6	18.6
400	35	630.7	18.4

그림 5는 표 2의 두 번째 실험조건에 따라 도핑 프로파일을 모델링 한 것으로 표면에서의 깊이와 도핑 농도를 나타내고 있다. 접합 깊이는 400nm로 고정하였고 표면에서의 도핑 농도를 변화시켰다. gaussian 함수를 사용하여 도핑 프로파일을 모델링하였고 표면에서의 도핑 농도차이를 확인할 수 있다. 각 조건마다 0.5 E21의 도핑 농도차이를 두었다.

표 4는 그림 5의 도핑 프로파일의 적용하여 도출해 낸 시뮬레이션 결과 값으로 광 조사에 따른 전기적 특성을 보여주고 있다. 표면에서의 도핑농도 증가에 따라 개방전압과 단락전류 밀도가 감소하고 있으며 이에 따라 광 변환효율 역시 감소하고 있다. 농도증가에 따라 전자의 반송자 수명이 감소하여 단

락전류 밀도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 그리고 표 3의 광 조사 특성과 달리 표면에서의 도핑농도 증가는 공핍층의 전계형성에 크게 기여하지 못함을 예측할 수 있으며 이는 개방전압의 변화를 통해 확인할 수 있다.

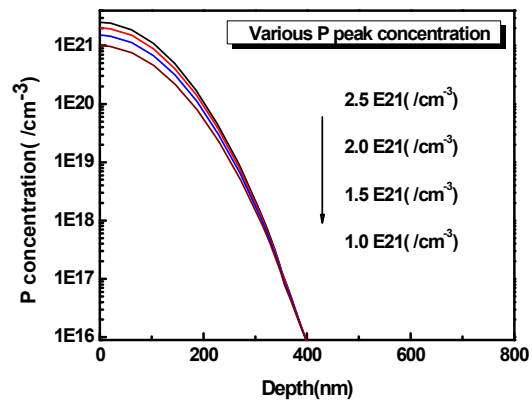


그림 5. 표면 불순물 농도에 따른 도핑 프로파일 형태 (PC1D modeling)

표 4. 표면에서의 도핑농도에 따른 태양전지의 전기적 특성(광 조사 특성)

Peak concentration of phosphorus (/cm ⁻³)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	η (%)
1.0 E21	36.5	635	19.3
1.5 E21	35.8	632.8	18.9
2.1 E21	35.4	631.6	18.6
2.5 E21	35	630.7	18.4

그림 6은 그림 3의 실제 도핑 프로파일을 구현하기 위해 gaussian 함수와 erfc 함수를 이용하여 나타낸 도핑 프로파일과 gaussian 함수 하나만을 이용하여 나타낸 도핑 프로파일을 비교한 그래프이다. 중간에 급격히 휘어있는 모습을 보이는 있는 형태를 kink and tail이라 부르며 이러한 형태의 도핑 프로파일을 모델링하기 위해서는 두 개의 함수를 적용하여 도핑 프로파일을 구현해야 한다. 두 개의 도핑 프로파일의 형태가 다르므로

전체적인 도핑 농도의 차이가 있을 것으로 예측된다.

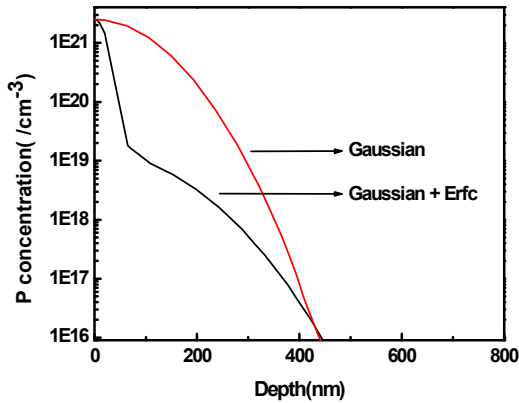


그림 6. 도핑 프로파일 비교(Gaussian, Gaussian+Erfc)

표 5는 그림 6의 도핑 프로파일의 적용하여 도출해 낸 시뮬레이션 결과 값으로 광 조사에 따른 전기적 특성을 보여주고 있다. 그림 3의 실제 측정값을 적용하여 구현한 도핑 프로파일에서 더 높은 단락전류 밀도와 개방전압을 보였고 광 변환효율 역시 높은 결과를 나타냈다. 개방전압보다는 단락전류 밀도에 차이가 더 크며, 이는 표면에서의 농도차이가 커서 단락전류에 미친 영향이 크기 때문이다.

표 5. 도핑 프로파일 함수에 따른 태양전지의 전기적 특성(광 조사 특성)

Function	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	η (%)
Gaussian	34.5	631.5	18.1
Gaussian+Erfc	38.4	629.3	20.1

3. 결 론

본 연구는 PC1D 프로그램을 사용하여 다양한 도핑 프로파일을 모델링 하였고 시뮬레이션을 통해 도핑 프로파일 형태에 따른 전기적 특성을 예측할 수 있었다. 이러한 결과는 실제 태양전지 제작에 도움을 줄 수 있을

것이다.

- (1) 접합깊이의 증가에 따라 개방전압은 증가하지만 단락전류 밀도는 감소하게 된다.
- (2) 표면에서의 도핑농도 변화에 따라 개방전압, 단락전류 밀도 그리고 광 변환효율을 같은 경향성을 보인다.
- (3) 실제 실험을 통해 얻은 도핑 프로파일과 같은 형태의 모델링은 2개의 함수를 이용하게 되며 하나의 함수를 이용한 도핑 프로파일과 비교하여 우수한 전기적 특성을 보였다.

참 고 문 헌

1. D. A. Clugston, P. A. Basore, PC1D Version 5 : 32-Bit Solar Cell Modeling on Personal Computers, the 26th IEEE PVSC, October, 1997
2. S. Wolf, R. N. Tauber, Silicon Processing for the VLSI Era, Lattice Press, 2000
3. 이준신, 김경해, 태양전지 공학, 도서출판 그린, 2007
4. S. Sivothythaman, W. Laureys, P. D. Schepper, J. Nijs, R. Mertens, Selective Emitters in Si by Single Step Rapid Thermal Diffusion for Photovoltaic Devices, IEEE electron device letters, vol. 21, no. 6, pp. 274-276, June, 2000