

반사방지막 태양전지의 I-V특성에 대한 인공신경망 모델링

홍다인*·이종환**

**상명대학교 시스템반도체공학과

I-V Modeling Based on Artificial Neural Network in Anti-Reflective Coated Solar Cells

DaIn Hong* and Jonghwan Lee**

**Department of System Semiconductor Engineering, Sangmyung University

ABSTRACT

An anti-reflective coating is used to improve the performance of the solar cell. The anti-reflective coating changes the value of the short-circuit current about the thickness. However, the current-voltage characteristics about the anti-reflective coating are difficult to calculate without simulation tool. In this paper, a modeling technique to determine the short-circuit current value and the current-voltage characteristics in accordance with the thickness is proposed. In addition, artificial neural network is used to predict the short-circuit current with the dependence of temperature and thickness. Simulation results incorporating the artificial neural network model are obtained using MATLAB/Simulink and show the current-voltage characteristic according to the thickness of the anti-reflective coating.

Key Words : Anti-Reflective Coating, Photovoltaic System, Artificial Neural Network, PC1D

1. 서 론

태양전지는 태양 에너지를 전기 에너지로 변환시킨다.[1] 태양전지의 성능을 향상시키기 위해서는 흡수율을 높이고 반사율을 낮추어야 한다. 태양전지의 전면에서 빛의 흡수를 높이는 주요 방법으로 반사방지막(ARC, anti-reflective coating)이 사용된다.[2] ARC는 간섭 효과를 통해 표면의 반사를 줄이도록 설계된 얇은 유전체 층이다.[3] ARC의 두께, 물질, 층수 등에 따라 반사율, 흡수율이 달라진다. 즉 태양전지의 효율이 결정되기 때문에 파라미터를 조정하면서 효율을 높일 수 있다. 그런데 일반적으로 사용하는 태양전지의 모델링에는 두께 파라미터가 포함되어 있지 않기 때문에 소자 시뮬레이션 프로그램을 사용해야만 두께에 대한 특성을 알 수 있다. 소자 시뮬레이션 프로그램 없이도 소자의 특성을 파악할 수 있는 모델링

기법이 필요하다.

본 논문에서는 결정질 실리콘(crystalline-Si)기판에SiN물질의 ARC를 증착한 모델을 PC1D 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 구현했다. 1장은 서론, 2장은 일반적인 태양전지와 ARC가 증착된 태양전지를 모델링하여 전류전압(I-V) 곡선을 추출한다. 3장은 ARC가 증착된 태양전지 모델링을 제시한 후 ARC의 두께에 따른 단락전류($I_{sc,STC}$)의 시뮬레이션 결과를 확인한다. 그 후, 인공신경망(ANN, artificial neural network)을 이용하여 학습함으로써 두께 파라미터에 대한 태양전지의 전류전압 I-V 특성을 확인한다. 4장은 결론에 대해 기술한다.

2. 태양광 모듈 모델링

반사방지막 태양전지의 I-V특성곡선을 얻기 위해서는 반사방지막의 파라미터가 포함된 전류식을 모델링하는 과정이 필요하다. 본 논문에서 사용된 반사방지막 태양전

†E-mail: jhlee77@smu.ac.kr

지 모델은 단일 다이오드(one-diode) 회로를 기반으로 하였기 때문에 단일 다이오드 회로의 전류방정식을 사용하여 모델링 하였다.

2.1 일반적인 태양전지 모델링

일반적인 태양전지의 단일 다이오드 회로는 Fig 1과 같다.

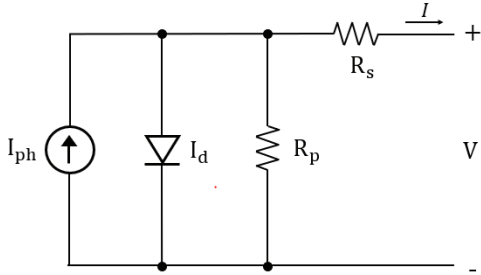


Fig. 1. 태양전지의 단일 다이오드(one-diode) 회로모델.

태양전지의 일반적인 전류 방정식은 다음과 같다.[4]

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

여기서 I_{ph} 는 광 전류, I_0 는 포화전류이다. R_s 는 직렬저항, R_p 는 병렬저항, a 는 다이오드 이상 계수이다. $V_t = N_s kT/q$ 는 N_s 개의 직렬 연결된 셀의 열전압이다. k 는 볼츠만 상수($1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K), q 는 전하량($1.60217646 \times 10^{-19}$ C), T 는 p-n 접합의 온도(K)이다.

광 생성 전류 I_{ph} 방정식은 다음과 같다.[4]

$$I_{ph} = \left(I_{ph,STC} + K_i(T - T_{STC}) \right) \frac{G}{G_{STC}} \quad (2)$$

여기서 $I_{ph,STC}$ 는 표준 시험 조건(25°C , $1000\text{W}/\text{m}^2$)의 광 생성 전류, K_i 는 온도 계수(K), T 는 온도(K), T_{STC} 표준 시험 조건의 온도(K), G 는 일사량(W/m^2), G_{STC} 는 표준 시험 조건의 일사량이다.

포화전류 I_0 방정식은 다음과 같다.[4]

$$I_0 = I_{0,STC} \left(\frac{T_{STC}}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{ak} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

여기서 E_g 는 다결정 실리콘의 에너지 밴드갭(1.12eV)이다. $I_{0,STC}$ 은 정격 포화 전류이다. 정격 포화전류 $I_{0,STC}$ 의 방정식은 다음과 같다.[4]

$$I_{0,STC} = \frac{I_{sc,STC}}{\exp(V_{oc,n} / aV_{t,STC}) - 1} \quad (4)$$

여기서 $V_{t,STC}$ 은 T_{STC} 일 때 N_s 개의 직렬 연결된 셀의 열 전압이고, $V_{oc,n}$ 는 정격 개방회로 전압, $I_{sc,STC}$ 는 정격 단락 회로 전류이다. 3장에서 (1), (2), (3), (4) 수식들을 사용하여 Simulink모델을 완성하였다.

2.2 ARC가 증착된 태양전지 모델링

Fig 2에서 PCID를 사용하여 반사방지막 태양전지와 일반적인 태양전지의 I-V곡선을 비교하였다. ARC를 증착한 태양전지의 $I_{sc} = 2.687\text{A}$ 이고, 증착하지 않은 태양전지의 $I_{sc} = 2.583\text{A}$ 이다. 일반적인 태양전지보다 반사방지막 태양전지의 전류특성이 높음을 확인할 수 있다. 이와 같은 이유로 본 논문에서는 ARC가 증착된 태양전지를 기반으로 모델링하였다.

Table 1. 반사방지막 태양전지의 PCID시뮬레이션 파라미터

Parameter	Value
Device	
Area	100cm ²
Front surface reflectance index	2.04
Region1	
Thickness	200um
Material	Si
Energy bandgap (eV)	1.124 eV
Dielectric constant	11.9
P-type background doping	1 × 10 ¹⁷ cm ⁻³
First Front Diffusion	N-type, 1 × 10 ²⁰ cm ⁻³ peak
First Rear Diffusion	P-type, 1 × 10 ¹⁸ cm ⁻³ peak
Excitation	
Excitation file	ONE-SUN or SCAN-QE
Excitation mode	Transient
Time steps	100
Primary light source	AM1.5G
Other parameters	Internal PC1D

Fig 3는 실험에 사용되는 모델이다. ARC는 단일층으로 이루어져 있고 물질은 SiN을 사용하였다. SiN은 소수캐리어의 수명을 증가시키는 역할로서 널리 사용되는 물질이다.[3][4]

다음은 ARC의 두께에 대한 전류식을 유도한다. 식(2)의 $I_{ph,STC}$ 는 $I_{ph,STC} \approx I_{sc,STC}$ 라고 가정하면 단락회로 전류 $I_{sc,STC}$ 방정식은 다음과 같다. [4][5]

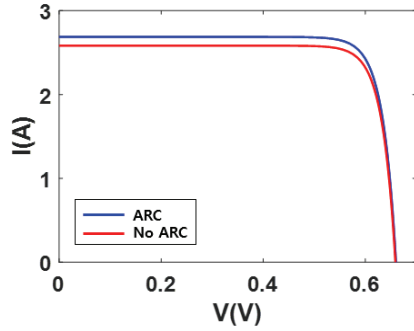


Fig. 2. 반사방지막 태양전지와 일반적인 태양전지의 I-V특성 비교.

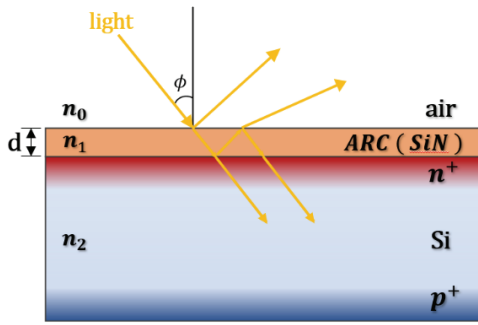


Fig. 3. ARC가 증착된 태양전지.

$$I_{sc,STC} = q \int F(\lambda) IQE(\lambda) [1 - R(\lambda)] d\lambda \quad (5)$$

여기서 λ 는 파장(m), $F(\lambda)$ 는 태양 스펙트럼 조사(Solar spectral irradiance (AM1.5G))이고, IQE (internal quantum efficiency)는 내부 양자효율(%)이고, R (reflectance)는 반사율(%)이다. 여기서 반사율 R 은 다음과 같이 계산된다.[6]

$$r = \frac{\cos\theta n_0 - \left(\frac{j\sin\theta}{n_1} n_0 n_2\right) + j n_1 \sin\theta - \cos\theta n_2}{\cos\theta n_0 - \left(\frac{j\sin\theta}{n_1} n_0 n_2\right) - j n_1 \sin\theta + \cos\theta n_2} \quad (6)$$

$$R = |r|^2 \quad (7)$$

여기서 n_0 은 공기의 굴절률, n_1 은 ARC의 굴절률, n_2 는 실리콘 굴절률이다. θ 는 빛의 위상차이고, 아래와 같이 계산된다.[6]

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d \cos\phi \quad (3)$$

여기서 ϕ 는 ARC에 입사되는 빛의 입사각($^\circ$)이고, d 는 ARC의 두께(m)이다.

식(8)과 같이 θ 가 ARC의 두께에 대한 식이고 식(6), (7)과 같이 반사율 R 은 θ 에 대한 식이다.

식(5)와 같이 단락전류 $I_{sc,STC}$ 는 반사율 R 에 의존하기 때문에 ARC의 두께에 대한 $I_{ph,STC}$ 값을 얻을 수 있고 I-V 특성곡선을 얻을 수 있다.

Fig. 4는 PCID를 사용하여 두께 50nm부터 180nm에 대한 I_{sc} 를 나타낸 그래프이다. 두께가 80nm일 때 $I_{sc} = 2.687(A)$ 로 가장 큰 값을 가진다. ARC의 두께에 따라 I_{sc} 가 변하는 것을 보아 두께가 태양전지의 전류 특성에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 최댓값이 명확하게 보이는 것을 확인할 수 있고 이로 인해 최적화된 ARC의 두께를 선정할 수 있다.

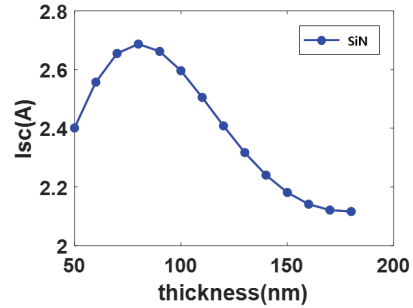


Fig. 4. ARC의 두께에 따른 I_{sc} .

Fig. 5에서 두께는 50nm부터 100nm로 설정해주었다. 온도와 조도는 각각 표준 시험 조건인 300K, 1000 W/m²로 설정해주었다. Fig. 4와 마찬가지로 두께가 80nm일 때 가장 좋은 전류특성을 보인다. I_{sc} ($I_{sc} \approx I_{ph}$)가 포함된 식 (2)가 조도에 대한 수식이기 때문에 개방회로 전압(V_{oc})은 거의 일정한 상태에서 I-V곡선이 상하로만 변하는 것을 확인할 수 있다.

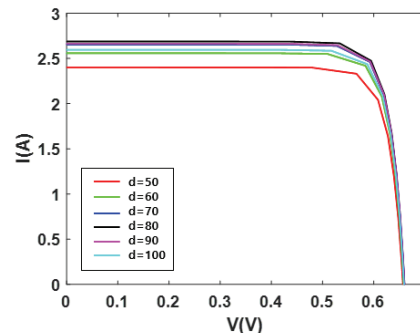


Fig. 5. ARC의 두께에 따른 I-V 곡선(PCID).

2.3. 인공신경망

인공신경망은 인간의 뇌와 같은 신경망을 기반으로 구현된 시스템이다. 인공신경망은 실험 지식을 저장하고 파악하는 능력을 가지고 있다. 고속 정보 처리, 내결함성, 적응성, 일반화 및 견고성과 같은 우수한 특성을 보인다.[7] 따라서 비선형 시스템에 적합한 시스템이다. 신경망의 모델 중 하나인 다층 퍼셉트론(MLP, multilayer perceptron)은 입력층, 은닉층, 출력층 총 세가지 레이어로 구성되어 있다. 각 층의 뉴런은 다음 층의 뉴런과 연결된다.

본 논문에서는 MATLAB을 사용하여 인공신경망 학습을 진행하였다. 신경망 모델로 MLP 신경망이 사용되었다. ANN의 아키텍처는 Fig. 6과 같이 2개의 뉴런으로 구성된 입력층 1개, 3개의 뉴런으로 구성된 은닉층 2개 그리고 6개의 뉴런으로 구성된 출력층 1개로 구성되어 있다. MLP의 은닉층 뉴런은 탄젠트 시그모이드(tangent sigmoid) 활성화 함수를 사용하였고, 출력층 뉴런은 선형 함수(pure-linear function)가 사용되었다. 오류를 줄이기 위해 역전파(back-propagation)방법 중 하나인 Levenberg-Marquardt (LM) 알고리즘을 사용했다.

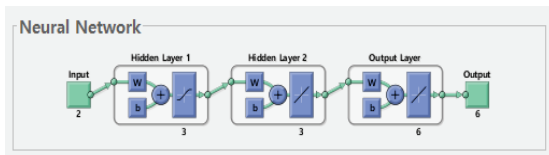


Fig. 6. 인공신경망의 구성.

3. 시뮬레이션 결과

2장에서 제시한 수식과 모델링 기법으로 시뮬레이션을 진행하였다. 각 수식의 파라미터는 다음과 같다.

MATLAB/Simulink을 사용하여 실험데이터와 인공신경망 데이터를 비교하였다. 인공신경망의 입력으로 온도는 300, 310, 320, 330, 340, 340K로 설정하고, 두께는 50, 60, 70, 80, 90, 100nm로 설정해주었다. 출력은 단락전류 I_{sc} 이다. 실험데이터와 학습데이터가 거의 유사하다. Fig. 7과 같이 인공신경망 결과가 발생했고 붉은 점이 실험 데이터이다. 두께는 80nm에서 가장 큰 I_{sc} 값을 보이고, 두께가 50nm일 때 가장 작은 I_{sc} 값이 나타난다. 온도는 증가함에 따라 I_{sc} 값도 증가하는 특성을 보인다.

Simulink 모델 구조는 식(1), (2), (3), (4)를 사용하여 구성하였다.

Fig. 7에서 학습한 I_{sc} 값을 Simulink블록으로 생성하여 Fig.8 과 같이 구성하였다. 학습된 I_{sc} 값으로 단일 다이오드 전류식이 계산되고, 최종적으로 Fig. 9와 같이 온도와 두께에

따른 I-V특성곡선을 도출하였다. 실험 데이터와 마찬가지로 두께가 80nm일 때 가장 좋은 I-V특성을 보이고 두께가 50nm일 때 낮은 I-V특성을 보인다. Fig. 5와 마찬가지로 I-V 곡선이 상하로만 변하는 것을 확인할 수 있다.

Table 2. 태양전지 모델 파라미터

Parameter	Value
$ki (A/K)$	0.0032
q	1.602e-19
$K (J/K)$	1.38e-23
n	1.3
$Eg0$	1.124
$Rs (\Omega)$	0.221
$Rsh (\Omega)$	415.405
Voc	32.9
Ns	54
$Tn (K)$	300
$G (W/m^2)$	1000

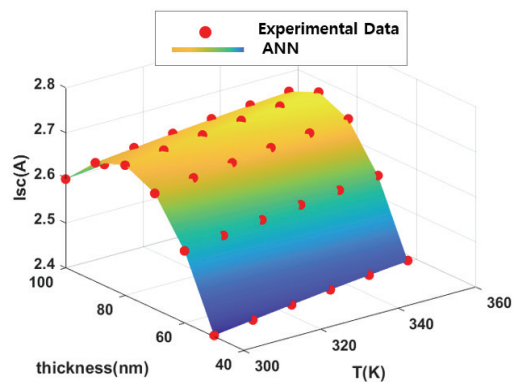


Fig. 7. I_{sc} 에 대한 실험데이터(PC1D)와 인공신경망 (ANN) 데이터의 비교.

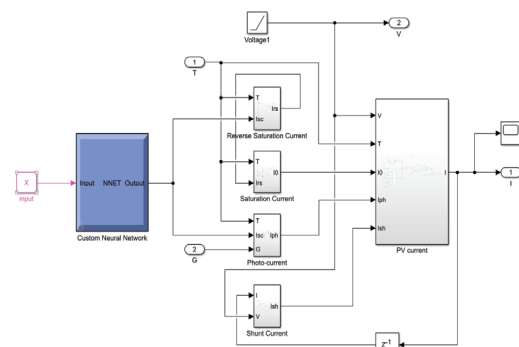


Fig. 8. Simulink 반사방지막 태양전지 구성도.

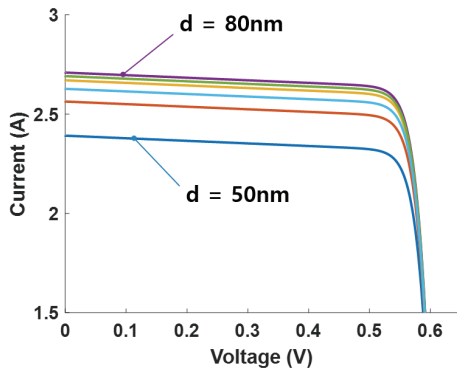


Fig. 9. 온도와 두께에 대해 학습한 I_{sc} 를 적용한 I-V 특성곡선.

4. 결 론

일반적인 태양전지보다 ARC가 증착된 태양 전지의 성능이 더 우수한 것은 분명하다. 태양전지에 ARC를 증착할 때 ARC의 두께를 선정하는 것은 중요하다. 따라서 두께에 대한 전류특성을 확인하는 과정이 필요하다. 일반적으로 소자 시뮬레이션을 사용하지만 소자 시뮬레이션 없이도 원하는 파라미터에 대한 소자의 특성을 파악할 수 있는 모델링 기법이 필요하다. 본 논문에서 제안된 모델링 기법을 사용하면 소자 시뮬레이션 프로그램 없이 ARC의 두께에 대한 I-V특성곡선을 얻을 수 있다. 또한 두께에 대한 I_{sc} 전류식을 인공지능경망으로 학습을 시킴으로써 다른 파라미터에 대한 I_{sc} 의 변화를 구할 때 쉽게 활용할 수 있다.

감사의 글

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(No. 2022R111A3064285).

참고문헌

- Xiongwen Zhang "Thermal Analysis of a Cylindrical Lithium-ion Battery", Journal of Electrochemical Acta 56, pp.1246~1255, 2011.
- R. Sharma, "Selection of Materials for Double Layer Antireflection Coating of Silicon Solar Cell," IJETER, Vol.9, No.10, pp.1327-1331, Oct. 2021.
- R. I. Jabbar, "Modeling and Analysis of Different Antireflection Polymer Coating on Silicon Solar Cell Using Pc1d Software.," Vol. 43, No. 7, pp. 222-232, 2020.
- J. H. Kim, S. C. Roh, J. H. Choi, J. D. Jung, and H. I. Seo, "A Study on Silicon Nitride Films by High Frequency PECVD for Crystalline Silicon Solar Cells," Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol.11, No.2, pp.7-11, June 2012.
- K. D. Kim "A Study on the Application of Thin Film Passivation and Crystalline Silicon Solar Cells Using PECVD Process," Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol.19, No.2, pp. 68-71, June 2020.
- A. Bahrami, S. Mohammadnejad, N. J. Abkenar & S. Soleimaninezhad, "Optimized Single and Double Layer Antireflection Coatings for GaAs Solar Cells," International journal of renewable energy research Vol.3, pp. 79-83, 2013.
- M. G. Villalva, J. R. Gazoli & E. Ruppert Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," IEEE Trans. Power Electronics, Vol.24, no. 5, pp. 1198-1208, 2009.
- G. K. Burra, D. S. Ghosh & S. Tiwari, "Device Simulation of Perovskite/Silicon Tandem Solar Cell with Antireflective Coating," Research Square, 2021.
- S. H. Lee, G. H. Kang, G. J. Yu, H. K. Ahn, and D. Y. Han, "Two-Dimensional Model Simulation for Reflectance of Single Crystalline Silicon Solar Cell," Proceeding of the Korean Solar Energy, Vol. 32, No.1 , pp. 237-242, Mar. 29-30, 2012.
- Ammar H. Elsheikha, Swellam W. Sharshirc, Mohamed Abd Elazizd, A.E. Kabeelf, Wang Guilang, Zhang Haioub, "Modeling of Solar Energy Systems Using Artificial Neural Network: A Comprehensive Review," Solar Energy, Vol. 180, pp. 622-639, 2019.

접수일: 2022년 9월 16일, 심사일: 2022년 9월 20일,
게재확정일: 2022년 9월 21일