

## Light I-V 곡선을 이용한 결정질 태양전지의 이상계수와 직렬 저항 특성 분석

정수정<sup>1</sup> · 김수민<sup>1</sup> · 강윤묵<sup>2†</sup> · 이해석<sup>1†</sup> · 김동환<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 신소재공학과, <sup>2</sup>고려대학교 그린스쿨대학원(에너지환경정책기술학과)

### Use of a Transformed Diode Equation for Characterization of the Ideality Factor and Series Resistance of Crystalline Silicon Solar Cells Based on Light I-V Curves

Sujeong Jeong<sup>1</sup>, Soo Min Kim<sup>1</sup>, Yoonmook Kang<sup>2†</sup>, Hae-seok Lee<sup>1†</sup> and Donghwan Kim<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

<sup>2</sup>KU-KIST Green School, Graduate School of Energy and Environment, Korea University, Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

(Received February 24, 2016 : Revised July 4, 2016 : Accepted July 4, 2016)

**Abstract** With the increase in installed solar energy capacity, comparison and analysis of the physical property values of solar cells are becoming increasingly important for production. Therefore, research on determining the physical characteristic values of solar cells is being actively pursued. In this study, a diode equation, which is commonly used to describe the I-V behavior and determine the electrical characteristic values of solar cells, was applied. Using this method, it is possible to determine the diode ideality factor ( $n$ ) and series resistance ( $R_s$ ) based on light I-V measurements. Thus, using a commercial screen-printed solar cell and an interdigitated back-contact solar cell, we determined the ideality factor ( $n$ ) and series resistance ( $R_s$ ) with a modified diode equation method for the light I-V curves. We also used the sun-shade method to determine the ideality factor ( $n$ ) and series resistance ( $R_s$ ) of the samples. The values determined using the two methods were similar. However, given the error in the sun-shade method, the diode equation is considered more useful than the sun-shade method for analyzing the electrical characteristics because it determines the ideality factor ( $n$ ) and series resistance ( $R_s$ ) based on the light I-V curves.

**Key words** Si solar cell, ideality factor, measurement, light I-V.

## 1. 서 론

화석연료의 제한적 용량과 환경 파괴에 대한 문제가 제기되면서 지속적이고 친환경적인 신재생 에너지에 대해 많은 연구가 진행되었다. 그 중 신재생 에너지원으로써 큰 비중을 차지하고 있는 태양광 발전은 오랜 기간 연구되어 왔으며, 현재 산업적인 위치로써도 차지하고 있는 역할이 크다. 안정적인 에너지 수급을 위한 대량 생

산 기술의 측면에서, 고효율 태양전지의 제작 및 설계를 위해 물리적 혹은 전기적인 특성을 이해하는 것이 점점 중요해지고 있다.<sup>1-4)</sup> 현재 이러한 태양전지의 특성을 측정하는 방법으로 Light I-V, Dark I-V, QE, UV-spectroscopy 등이 알려져 있다.<sup>5)</sup>

일반적으로 태양전지의 특성을 측정할 경우 그 측정 결과에는 태양전지 특성과 관련되어 있는 다양한 요인들이 포함되어 있다. 예를 들어 Light I-V 측정 방식은 태

<sup>†</sup>Corresponding author

E-Mail : ddang@korea.ac.kr (Y. Kang, Korea Univ.)

lhseok@korea.ac.kr (H. Lee, Korea Univ.)

solar@korea.ac.kr (D. Kim, Korea Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

양전지의 전환효율을 얻을 수 있는 직접적인 측정방식이지만, 태양전지를 구성하는 에미터의 특성에 대해서는 분석하기 어려운 단점을 가진다. 이에 반하여 Dark I-V 측정 방식은 태양전지의 에미터를 평가할 수 있는 이상계수(n)를 영역별로 구할 수 있으며, 직렬/병렬 저항을 추출할 수 있다. 하지만 이상계수(n)의 추출 시, 추출하는 데이터의 범위에 따라 큰 오차범위를 가질 수 있으며, 추출하는 모델의 이론적인 해가 6가지가 존재하기 때문에 선형적인 정해를 구하는데 많은 어려움을 가지게 된다. 이러한 이유로 Dark I-V 방식은 측정자 혹은 분석자의 주관적인 판단에 따라 결과값의 오차가 커질 수 있으며 정확한 분석을 위한 추가적인 장비가 요구되어 분석에 많은 시간과 노력이 요구된다. 상기에 기술한 바와 같이 태양전지 업계에서 일반적으로 사용하는 측정 방법에는 내부 전기적 구조의 특성 분석 혹은 최종 구조체의 전환 효율 분석에 있어 측정 시간과 분석 자원의 한계를 어느 정도 가지게 된다.

본 연구에서는 태양전지의 특성 평가와 내부 구조의 특성 평가를 한번의 측정으로 수행하기 위하여, One diode equation을 이용하여 결정질 실리콘 태양전지의 Light I-V 분석 결과를 해석하였다. 이러한 해석 기법을 활용하여 후면 전극 태양전지와 상업용 스크린 프린트 태양전지의 다이오드 이상계수(n)와 직렬저항( $R_s$ )값을 추출하여 비교해 보았다.

## 2. 실험 방법

태양전지는 다이오드와 저항을 포함한 등가회로로 치환하여 정의할 수 있다. 태양전지에 빛이 조사된 경우에 이러한 등가 회로는 Fig. 1에 나타낸 것과 같은 구조를 형성하게 되고 이 때 외부 부하를 타고 흐르는 전류 밀도(Current density)는 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$J = J_0 \exp\left[\frac{q}{nkT}(V - R_s J)\right] + \frac{V - R_s J}{R_{sh}} - J_L \quad (1)$$

여기서,  $J_L$  은 빛의 조사로 인하여 발생하는 광생성 전류 밀도 값을 의미하고,  $J_0$ 는 다이오드 내부로 흐르는 포화전류밀도를 의미한다. 온도는 T로 나타내었으며, q는 전하량을 의미하고, 볼츠만 상수를 k로 나타낸다. 다이오드의 이상계수 값을 n으로 나타내었으며, 직렬/병렬 저항값을  $R_s/R_{sh}$ 로 정의 하였다.

태양전지의 전기적 특성을 나타내는 식 (1)번을 이용하여 다이오드의 이상 계수(n)와 직렬 저항( $R_s$ ) 성분을 추출하기 위하여 다음과 같이 식을 변경할 수 있다.

$$\ln\left(J - J_L - \frac{V - R_s J}{R_{sh}}\right) = \ln(J_0) + \frac{q}{nkT}(V - R_s J) \quad (2)$$

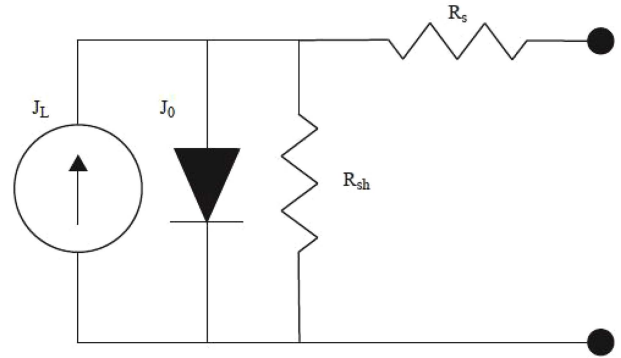


Fig. 1. One diode circuit model for crystalline silicon solar cell which have series resistance and shunt resistance.

식 (2)를 간단하게 정의하기 위하여 다음과 같이 태양전지의 특성을 가정하였다. 우선 일반적인 태양전지의 병렬 저항( $R_{sh}$ )은 대체로 매우 큰 값을 가지기 때문에 병렬 저항( $R_{sh}$ ) 값을 생략할 수 있다. 이와 더불어 광생성 전류가 발생한 경우에 태양전지 내부에서 생성되는 포화전류밀도( $J_0$ )의 값이 상대적으로 매우 작기 때문에 역시 생략할 수 있다. 상기의 가정을 기용하여 식 (2)를 다시 정리하게 되면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln(J - J_L) = \frac{q}{nkT}(V - R_s J) \quad (3)$$

식 (3)를 V에 대하여 정리한 후 J에 대하여 미분하여 기울기를 구하게 되면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.<sup>6)</sup>

$$V = \frac{nkT}{q} \ln(J - J_L) + R_s J \quad (4)$$

$$\frac{dV}{dJ} = \frac{nkT}{q} \frac{1}{J - J_L} + R_s \quad (5)$$

상기의 결과는 Light I-V 자료를  $dV/dJ$ 와  $1/(J - J_L)$ 의 그래프로 전환할 수 있다는 것을 보여준다.  $dV/dJ$ 와  $1/(J - J_L)$ 의 그래프에서 기울기 값은  $nkT/q$  값을 나타내고 y축 절편 값은  $R_s$ 값으로 나타나게 된다. 따라서 측정된 Light I-V 자료에서 이상계수(n)와 직렬 저항( $R_s$ )을 추출할 수 있게 된다. 위 방법을 Diode method로 정의하고, 상업용 스크린 프린트 결정질 실리콘 태양전지와 후면 전극형 태양전지의 측정 결과에 적용하여 특성값을 추출 하였다. 상업용 스크린프린트 태양전지의 제작에는 초크랄스키(Czochralski)-Si p-type (100)방향의 웨이퍼를 사용하였다. 웨이퍼의 두께는 200  $\mu\text{m}$ 이고, 면적은 pseudo-square 형태로 238.95  $\text{cm}^2$ 를 가진다. 웨이퍼의 비저항값은 1.0-1.5  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 을 가진다. 전면부는 반사도를 낮추기 위해 요철(textured) 구조로 식각하였다. 상업용 스크린프린트 태양전지의 에미터 형성을 위하여 인(Phosphorus)을

웨이퍼 내부로 확산시키는 공정을 tube furnace를 통하여 수행하였다. 전/후면의 패시베이션 효과를 증가시키고 반사도를 감소시키기 위하여 Anti-Reflection Coating (ARC)을 형성하였다. ARC를 형성하기 위하여 PECVD [TES Co., Ltd, Korea, Teslar 200]를 활용하였으며 질화막( $\text{SiN}_x$ )을 약 70 nm의 두께로 형성 하였다. 증착에 사용된 조건은 13.56MHz의 주파수에서 20 W의 파워를 가지고, 챔버 내부의 압력을 1000 mTorr (133Pa)로 유지하였다.  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$  가스의 유량은 각각 35, 90, 1000 sccm을 유지하였다. 태양전지 전극의 형성은 스크린 프린트를 통해 전면전극 패턴을 은(Ag)으로 인쇄하고, 후면전극을 알루미늄(Al)로 인쇄하였다. 이후, Rapid Temperature Process[SNTEK, Korea, RTP 5000]를 이용하여 burn-out 공정을 500 °C에서 3분 유지하고, firing 공정을 800 °C에서 3초간 진행하였다.

후면 전극형 태양전지의 제작에는 Cz-Si n-type (100) 방향의 웨이퍼를 사용하였다. 웨이퍼의 두께는 200  $\mu\text{m}$ 이고, 면적은 pseudo-square 형태로 133.33  $\text{cm}^2$ 를 가진다. 웨이퍼의 비저항값은 1-10  $\Omega\cdot\text{cm}^2$ 을 가진다. 전면부는 반사도를 낮추기 위해 요철(textured) 구조로 식각하였다. 웨이퍼의 소수반송자수명(Minority carrier lifetime)은 1000  $\mu\text{s}$ 이며, 에미터 핑거 라인의 너비는 675  $\mu\text{m}$ 이며, 후면전계층(BSF) 핑거 라인의 두께는 225  $\mu\text{m}$ 이다. 전/후면의 패시베이션 효과를 증가시키기 위해서, 산화막( $\text{SiO}_x$ )과 질화막( $\text{SiN}_x$ )을 적층형 구조로 형성하였다. 산화막 형성은 dry oxidation 공정을 이용하였으며, tube furnace 내부에서 850 °C에서 1시간동안 유지하였다. 질화막 형성을 위하여 PECVD를 사용하였으며, 13.56MHz의 플라즈마의 주파수(RF)를 사용하고, 220 W의 파워조건이 적용되었다. 챔버 내부의 압력은 2300 mTorr(607Pa)로 유지하였고,  $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$  가스의 유량은 30/230 sccm이다. 에미터와 후면전계층을 형성하기 위하여 이온 임플란테이션 공정을 사용하였으며, 붕소(Boron)의 가속전압은 40 keV, 5 ×

$10^{13}$  ions/ $\text{cm}^2$ 의 Dose를 사용하였다. 인(Phosphorus)의 가속전압은 30 keV 조건하에서 이루어 졌으며  $2 \times 10^{13}$  ions/ $\text{cm}^2$ 의 Dose를 이용하여 전/후면전계층을 형성하였다. 주입된 에미터와 전계층의 활성화를 위한 열처리조건은 1050 °C, 산소분위기에서 90분 동안 유지하였다. 전극의 형성은 Ag plating 방식으로 제작하였다.<sup>7)</sup>

이상계수(n)와 직렬저항( $R_s$ )의 추출을 위한 Light I-V의 측정 방법은 solar simulator[WXS-155 s-10, AM 1.5G, IEC-60904, Class:AAA]를 이용하였으며, 광원의 세기를 100  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 로 정의하였으며, 25 °C에서 bias voltage sweeping으로 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

상업용 스크린프린트 태양전지의 Light I-V 측정결과는 Fig. 2(a)와 같이 나타났다. Diode method를 적용하여,  $dV/dJ$ 와  $1/(J - J_L)$ 의 그래프로 나타내었을 때의 결과는 Fig. 2(b)와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 2(b)에 나타난 것과 같이 태양전지의 성능을 추출한 결과는 1.11의 이상계수(n)와 0.416  $\Omega\cdot\text{cm}^2$ 의 직렬저항( $R_s$ )값을 가지는 것을 알 수 있다. Diode method를 통해 추출한 직렬저항( $R_s$ )값을 태양전지의 성능분석에 일반적으로 사용하는 Slope 방법과 비교하여 보았다. 실리콘 태양전지의 특성요소 중 직렬저항은 충전율(Fill factor)에 영향을 끼친다. 그 중 직렬 저항( $R_s$ )은 개방전압( $V_{oc}$ )근처의 Light I-V 그래프의 기울기를 변화시킨다. 직렬저항( $R_s$ )값이 클수록 Light I-V 그래프의 개방전압( $V_{oc}$ )근처의 기울기가 감소하고 이것은 충전율 감소로 나타난다. 따라서 Light I-V 그래프에서 개방전압( $V_{oc}$ )근처의 기울기를 구함으로써 직렬저항( $R_s$ )값을 추출할 수 있다. 위 방법을 I-V slope method라고 정의하고, 동일한 상업용 스크린프린트 태양전지의 직렬저항( $R_s$ )값을 추출하였으며 1.23  $\Omega\cdot\text{cm}^2$  값을 나타내었다. I-V slope method의 직렬저항( $R_s$ ) 추

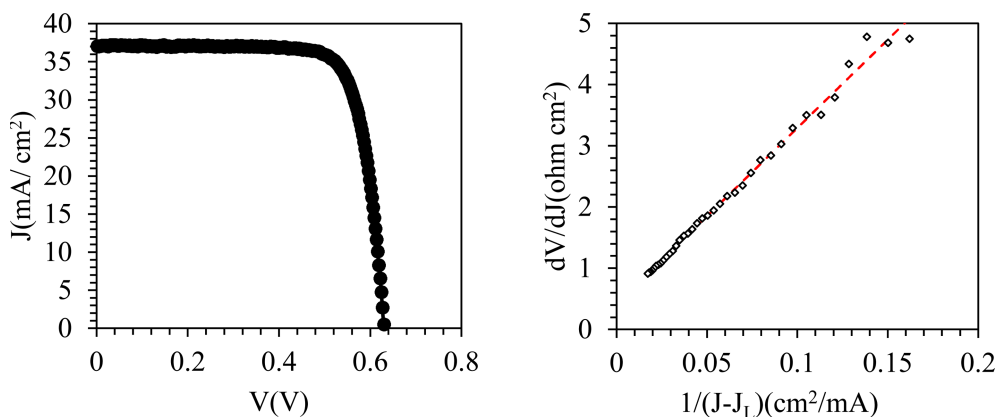


Fig. 2. (a) Light I-V graph of industrial screen-printed solar cell (b)  $dV/dJ$ 와  $1/(J - J_L)$  graph calculated from measured Light I-V data.

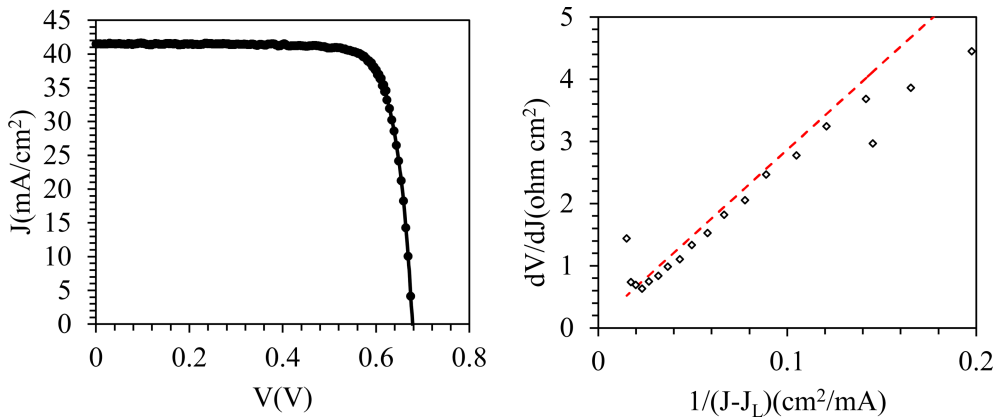


Fig. 3. (a) Light I-V graph of Interdigitated Back Contact(IBC) solar cell (b)  $dV/dJ - 1/(J - J_L)$  graph calculated from measured Light I-V data.

출값과 비교하여 보았을 때, diode method가 실제 태양전지의 특성이 반영된 직렬저항( $R_s$ )값을 추출할 수 있는 것으로 판단된다.

후면전극형 태양전지의 Light I-V 결과는 Fig. 3(a)와 같이 측정되었다. Diode method를 적용하여,  $dV/dJ$ 와  $1/(J - J_L)$ 의 그래프로 나타내었을 때의 결과는 Fig. 3(b)와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 3(b)에 나타난 것과 같이 태양전지의 성능을 추출한 결과는 1.07의 이상계수( $n$ )와  $0.109 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 직렬저항( $R_s$ )값을 가진다. 또한, 동일한 Light I-V 결과로부터 I-V method를 적용하여 직렬저항( $R_s$ )를 추출하였으며,  $0.807 \Omega \cdot \text{cm}^2$  값을 나타내었다. 후면전극형 태양전지는 두 전극이 가까이 붙어있어 측정방식에 민감한 구조를 가지고 있으므로 약간 큰 오차범위를 가지고 있는 것으로 판단된다.

이와 더불어, 광조사 상태에서의 이상계수( $n$ )값을 추출할 수 있는 sun-shade method방법을 적용하여 이상계수( $n$ )값을 비교하였다. Sun-shade method는 1.0Sun 조건과 0.1Sun 조건에서의 I-V 결과를 이용하여 직렬저항( $R_s$ )값을 추출할 수 있다. 또한, 1.0Sun 조건과 0.1Sun 조건에서 태양전지의 단락전류( $I_{sc}$ )값을 이용하여 이상계수( $n$ )값을 추출할 수 있다.<sup>8)</sup> Diode method 또한 광조사 상태에서 이상계수( $n$ )와 직렬저항( $R_s$ )을 구할 수 있으므로 두

방법을 비교하여 추출한 특성값을 비교평가하기에 적절할 것으로 판단하였다. 결과적으로 Diode method, sun-shade method, I-V slope method에서 추출한 이상계수( $n$ )와 직렬저항( $R_s$ )값을 Table 1에 비교하여 나타내었다. 두 상기의 결과에서 비교해볼 때 이상계수( $n$ )과 직렬저항( $R_s$ )값에서 세가지 방법 모두 크게 차이가 나지 않는 것을 확인하였다. 즉, Light I-V를 측정하는 태양전지가 diode method의 가정을 만족하는 경우, sun-shade method와 비교하였을 때, 오차범위가 크지 않아 신뢰할 만한 값을 가지는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

결정질 실리콘 태양전지의 전기적인 특성을 다이오드, 직렬저항, 병렬저항을 포함한 회로로 정의하였다. 다이오드에 흐르는 전류를 One diode equation을 통해 정의하였고, 몇 가지 가정을 통해 One diode equation으로부터 이상계수( $n$ )와 직렬저항( $R_s$ )을 추출할 수 있는 식을 도출하였다. 이 방법을 Diode method로 정의하고, 상업용 스크린 프린트 태양전지와 후면전극형 실리콘 태양전지의 Light I-V 측정 결과로부터 이상계수와( $n$ ) 직렬저항( $R_s$ )의 추출해 보았다. Diode method로 추출한 이상계수( $n$ )와 직렬저항( $R_s$ ) 값을 I-V slope method와 sun-shade method를 통해 추출한 값과 비교 평가하였다. Diode method가 대량 생산되는 태양전지의 특성을 일괄적으로 평가하는데 있어 유용한 것으로 생각된다.

Table 1. Ideality factor( $n$ ) & series resistance( $R_s$ ) extracted by Diode method & Sun-shade method & I-V slope method from industrial screen-printed solar cell and IBC solar cell.

Cell type		Diode method	Sun-shade method	I-V slope method
SP solar cell	$n$	1.11	1.03	-
	$R_s(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	0.416	0.757	1.23
IBC solar cell	$n$	1.07	1.01	-
	$R_s(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	0.109	0.388	0.807

#### Acknowledgement

This work was supported by the New & Renewable Energy Core Technology Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP)

granted financial from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea(No. 20133010011760).

## References

1. Neuhaus, Dirk-Holger and Adolf Münzer., *Advances in OptoElectronics*, **2007**, 15 (2008).
2. N. S Kim, *J. Korea Inst. Inf. Technol.*, **11**, 97 (2013).
3. J. J. Kang and D. Y. Lim, *J. Inst. Internet Broadcasting Commun.*, **6**, 51 (2006).
4. Y. S. Hong, C. S. Kim and B. J. Yun, *J. Inst. Internet Broadcasting Commun.*, **6**, 35 (2006).
5. Green, Martin A., *Solar cells: operating principles, technology, and system applications*, p.274, University of New South Wales, Sydney, (1986).
6. S. S. Hegedus and W. N. Shafarman, *Prog. Photovoltaics: Research and Applications*, **12**, 155 (2004).
7. S. M. Kim, S. Chun, M. G. Kang, H. E. Song, J. H. Lee, H. Boo, S. Bae, Y. Kang, H. S. Lee and D. Kim, *J. Appl. Phys.*, **117**, 074503 (2015).
8. D. Pysch, A. Mette and S. W. Glunz, *Sol. Energy Mater. Sol. Cell.*, **91**, 1698 (2007).