


# 싱글드 모듈 제작을 위한 고효율 실리콘 태양전지의 레이저 스크라이빙에 의한 영향

이성은<sup>1</sup>, 박지수<sup>2</sup>, 오원제<sup>2</sup>, 이재형<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> 성균관대학교 화학공학/고분자공학부

<sup>2</sup> 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Effect of Laser Scribing in High Efficiency Crystal Photovoltaic Cells to Produce Shingled Photovoltaic Module

Seong Eun Lee<sup>1</sup>, Ji Su Park<sup>2</sup>, Won Je Oh<sup>2</sup>, and Jae Hyeong Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Koera

<sup>2</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received January 28, 2020; Revised March 5, 2020; Accepted March 9, 2020)

**Abstract:** The high power of a shingled photovoltaic module can be attributed to its low cell-to-module loss. The production of high power modules in limited area requires high efficiency solar cells. Shingled photovoltaic modules can be made by divided solar cells, which can be produced by the laser scribing process. After dividing the 21% PERC cell using laser scribing, the efficiency decreased by approximately 0.35%. However, there was no change in the efficiency of the solar cell having relatively lower efficiency, because the laser scribing process induce higher heat damages in solar cells with high efficiency. To prove this phenomena, the  $J_0$  (leakage current density) of each cell was analyzed. It was found that the  $J_0$  of 21% PERC increased about 17 times between full and divided solar cell. However, the  $J_0$  of 20.2% PERC increased only about 2.5 times between full and divided solar cell.

**Keywords:** Shingled photovoltaic module, Laser scribing, High efficiency solar cell, Divided solar cell

### 1. 서론

태양전지는 태양 빛을 전기로 변환하는 소자로, 기존의 화석연료의 대체재 중 하나이다 [1]. 태양전지는 성장 속도가 매우 빠르며 친환경적이고 재생 가능한 에너지원이다 [2]. 한 개의 태양전지에서 생산되는 전력은 작아서 다수의 태양전지를 직병렬로 연결하여 높은 출력력을 가지는 태양광 모듈(photovoltaic module)로 제

작하여 사용한다. 태양광 모듈을 제작할 때, 연결되는 태양전지들의 출력을 더한 만큼 모듈 출력이 나오지 않으며, CTM (cell-to-module) 손실이 발생한다 [3]. 따라서 태양광 모듈의 출력을 높이기 위해서는 태양전지 효율뿐만 아니라 CTM 손실을 줄여야 한다.

싱글드 태양광 모듈(shingled photovoltaic module)은 싱글링 기술을 이용하여 CTM 손실을 효과적으로 줄이는 방법이다 [4]. 그림 1은 싱글드 태양광 모듈 제작 과정을 간략하게 보여준 것이다. 싱글드 태양광 모듈은 태양전지를 여러 개로 분할한 후, ECA (electrically conductive adhesive)로 분할된 태양전지를 접합하는 방식으로 제작된다. 싱글드 태양광 모듈은 분할 셀들을 접합 시 전면의 버스바(busbar)와 후면의 Ag 패드(pad)

✉ Jae Hyeong Lee; [jachyeong@skku.edu](mailto:jachyeong@skku.edu)

Copyright ©2020 KIEEME. 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.

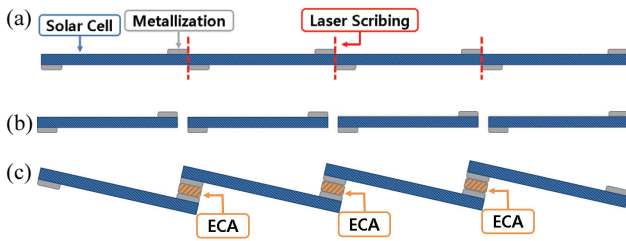
가 겹쳐지므로 버스바로 인한 광학적 음영 손실(optical shading loss)을 감소시킬 수 있다 [5]. 따라서 싱글드 태양광 모듈은 기존 태양광 모듈에 비해 동일한 면적에서 더 많은 출력을 나타낼 수 있다.

한편, 태양광 모듈은 한정된 공간에서 더 고출력을 내기 위해 고효율 태양전지를 사용할 필요가 있다. 태양전지는 효율을 높이기 위해 여러 기술이 적용되고 있으며, 특히 PERC (passivated emitter rear cell) 은 태양전지의 효율을 높이기 위해 설계된 구조 중 하나이다 [6]. 그림 2는 일반 태양전지와 PERC 태양전지의 구조를 비교한 그림이다 [7]. PERC 태양전지는 일반 태양전지와 달리 전면뿐만 아니라 후면에도 패시베이션층이 적용되어 있다. 따라서 후면에서의 재결합에 의한 광생

성 캐리어의 손실을 줄일 수 있고, 또한 후면전극에서의 반사율을 증가시켜 전류를 더 많이 생산할 수 있다 [8].

싱글드 태양광 모듈은 태양전지 분할 및 접합 공정을 통해 제작되는데, 셀 분할은 일반적으로 후면 레이저 스크라이빙 공정을 통해 진행된다. 이때, 레이저 열에 의한 손상으로 분할 셀의 효율이 감소할 수 있다 [9]. 특히, 고효율의 PERC 태양전지는 전면뿐만 아니라 후면도 패시베이션(passivation) 처리가 되어있기 때문에 레이저 스크라이빙으로 인한 열 손상의 영향을 더 크게 받을 수 있다. 따라서 본 논문에서 고효율 싱글드 모듈에 적용할 수 있는 다양한 효율을 갖는 태양전지들의 분할 전 및 후의 특성을 조사하였다.

### 2. 실험 방법

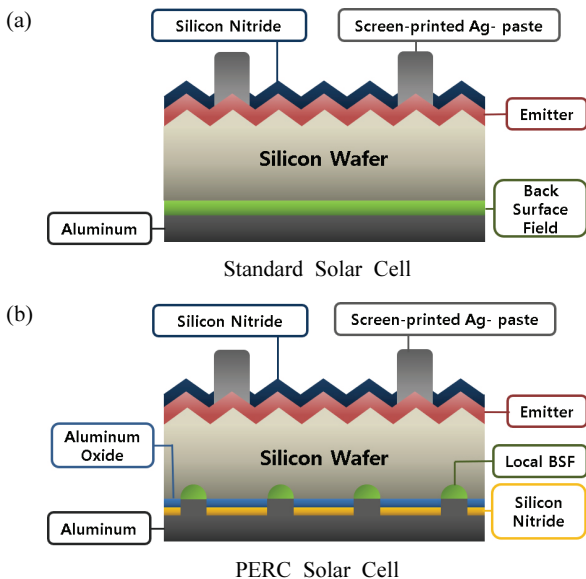


**Fig. 1.** Schematic cross-sectional structure of shingled array photovoltaic cells. (a) Laser scribing along the bus bar pattern, (b) separating the solar cell and getting singulated strips, and (c) using ECA material, attaching front bus bars on the singulated strips to the back Ag pad in contact.

본 연구에서 사용된 태양전지는 면적 156.75×156.75 mm<sup>2</sup>, p 타입 웨이퍼로 제작된 단결정 실리콘 태양전지로, 효율이 다른 3종류의 PERC 태양전지이다. 태양전지는 효율이 각각 21% (Mono TNM4-156 PERC, Topsky Energy, China), 20.7% (Mono TNM5-156 PERC, Topsky Energy, China), 20.2% (Mono PERC, Shinsung, Korea) 이다. 표 1은 실험에 사용한 태양전지의 성능을 나타냈다.

태양전지는 나노초 그린 레이저(AVIA NX 532-65, Coherent, USA)를 사용하여 분할하였다. 이때, 태양전지는 버스바를 따라 레이저 스크라이빙을 한 후 기계적 응력을 가해 분할하였다. 그림 3은 태양전지 A의 레이저 스크라이빙 라인을 나타낸 것이다. 태양전지를 스크라이빙할 때 빛을 조사받는 부분인 태양전지의 전면이 아닌 후면으로 스크라이빙하였다. 스크라이빙을 위한 레이저 조건은 표 2와 같다.

분할 전 및 분할 후 태양전지의 특성은 솔라 시뮬레이터(WXS-155S-L2, WACOM, Japan)를 이용하여 측정되었다. 솔라 시뮬레이터는 AM1.5G 스펙트럼의 빛을 조사하여 광상태에서의 전기적 특성을 분석할 수 있다. 광상태에서는 태양전지의 효율, 단락 전류밀도(short-



**Fig. 2.** Structure of (a) standard solar cell and (b) PERC solar cell.

**Table 1.** Performance of PERC and normal cell.

| Electrical performance                            | Cell A | Cell B | Cell C |
|---|--------|--------|--------|
| Efficiency (%)                                    | 21     | 20.7   | 20.2   |
| Short circuit current density (A/m <sup>2</sup> ) | 39.112 | 38.463 | 39.316 |
| Open circuit voltage (V)                          | 0.6750 | 0.6749 | 0.6662 |
| Fill factor (%)                                   | 80.213 | 79.915 | 76.986 |

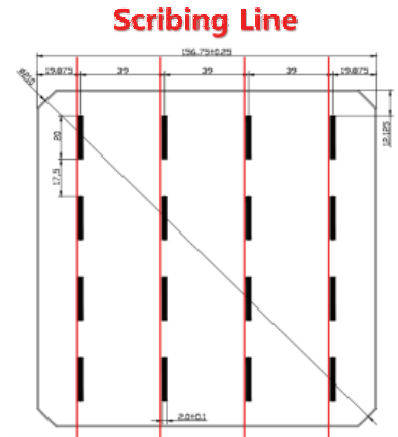


Fig. 3. Laser scribed line back of cell A.

Table 2. Condition for laser scribing.

| Condition            | Value |
|----------------------|-------|
| Scan speed (mm/s)    | 1,300 |
| Jump speed (mm/s)    | 3,500 |
| Frequency (kHz)      | 50    |
| Frequency cycle (%)  | 50    |
| Current (%)          | 80    |
| Repeat count (times) | 30    |

circuit current density,  $J_{sc}$ ), 개방전압(open-circuit voltage,  $V_{oc}$ ), 곡선 인자(fill factor,  $FF$ ) 등의 값을 얻었다. 이때, 태양전지의 전기적 특성은 효율 대별로 다섯 샘플 이상 측정하여 평균값으로 나타냈다. 또한, 솔라 시뮬레이터의 암상태에서 log I-V 특성곡선을 통해 역포화전류밀도( $J_0$ )를 계산하였다.

외부 양자효율은 분광 반응 측정 장비(Model CEP-25BX, Bunkoukeiki, Japan)를 이용하여 측정하였다. 외부 양자효율은 태양전지에 의해 수집되는 캐리어 수의 비를 의미한다. 본 연구에서 분할 전 태양전지의 외부 양자효율은 분할될 곳을 따라서 측정하였고, 분할 후 태양전지의 외부 양자효율은 분할된 곳을 따라서 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 4와 표 3은 태양전지 종류별 분할 전/후 효율을 비교한 것이다. 표 3의 효율 변화 값은 분할 후 태양전지의 효율에서 분할 전 태양전지의 값을 뺀 값이다. 가장 효율이 높은 태양전지 A의 경우, 분할 후 효

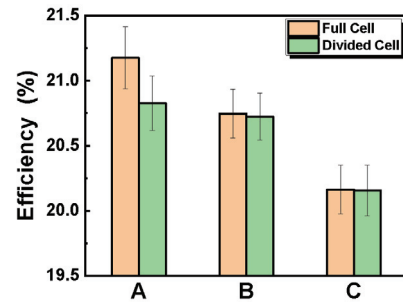


Fig. 4. Comparison of efficiency between full and divided solar cells.

Table 3. Comparison of efficiency between full and divided solar cells.

| Type   | Full cell      |                    | Divided cell   |                    | Efficiency change (%) |
|--------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|-----------------------|
|        | Efficiency (%) | Standard deviation | Efficiency (%) | Standard deviation |                       |
| Cell A | 21.18          | 0.28               | 20.83          | 0.21               | -0.35                 |
| Cell B | 20.75          | 0.19               | 20.72          | 0.18               | -0.03                 |
| Cell C | 20.16          | 0.19               | 20.16          | 0.20               | 0                     |

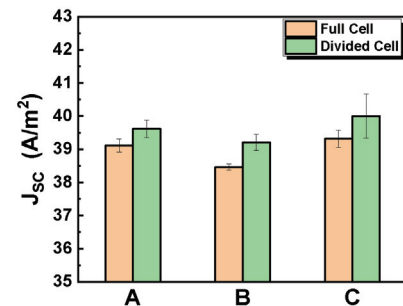


Fig. 5. Comparison of short circuit current density between full and divided solar cells.

Table 4. Comparison of short circuit current density between full and divided solar cells.

| Type   | Full cell            |                    | Divided cell         |                    | $J_{sc}$ change ( $A/m^2$ ) |
|--------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|
|        | $J_{sc}$ ( $A/m^2$ ) | Standard deviation | $J_{sc}$ ( $A/m^2$ ) | Standard deviation |                             |
| Cell A | 39.11                | 0.20               | 39.62                | 0.26               | +0.51                       |
| Cell B | 38.46                | 0.09               | 39.21                | 0.25               | +0.75                       |
| Cell C | 39.32                | 0.26               | 39.99                | 0.66               | +0.67                       |

율이 0.35% 감소한 반면, 태양전지 B 그리고 C는 A와 비교해 효율 감소가 적음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 효율이 높은 PERC은 태양전지의 후면 패시베이션 처리가 더 우수하므로, 레이저 스크라이빙으로 인한 열

손상에 더욱 취약하여 발생한다고 판단한다 [10,11].

그림 5와 표 4는 각 태양전지의 분할 전 및 분할 후 단락 전류밀도 값을 비교한 것이다. 이때, 태양전지의 종류와 관계없이 태양전지 분할 후 단락 전류밀도는 분할 전에 비해 증가하였다. 단락 전류밀도는 태양전지의 수광영역 비율보다 분할 후 태양전지의 수광영역 비율이 상대적으로 높아 증가한 것으로 보인다.

양자효율(quantum efficiency, QE)은 태양전지에 특정 파장으로 생성되는 광자와 외부 회로에 생성되는 전자의 비이다. 따라서 단락 전류에서 태양전지에 의해 생성된 전류는 입사된 빛에 의존한다. 단락 전류밀도  $J_{SC}$ 와 외부 양자효율[external quantum efficiency, EQE( $\lambda$ )]의 관계식은 다음과 같다 [12].

$$J_{SC} = q \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} bs(\lambda)EQE(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

이때,  $q$ 는 전자의 전하이고,  $bs(\lambda)$ 는 광자의 유량(flux)으로, 단위 시간과 단위 면적에 입사하는 광자 에너지의 수이다. 또한,  $\lambda_1, \lambda_2$ 는  $J_{SC}$ 가 계산될 스펙트럼의 범위이다. 그림 6은 태양전지 A의 분할 전 및 분할 후의 외부 양자효율 값을 비교한 그래프이다. 그래프를 보면 분할 전 태양전지와 분할 후 태양전지의 외부 양자효율은 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 태양전지의 외부 양자효율이 분할 전과 분할 후의 차이가 없으면 식 (1)에 의해 태양전지의 분할 전과 분할 후의 수광 영역에서 단락 전류밀도 값도 차이가 없다. 따라서 태양전지의 분할 후 효율 감소는 단락 전류밀도에 의해 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또한, 후면에서 레이저 스크라이빙을 하면 후면 패시베이션 층을 크게 손상할

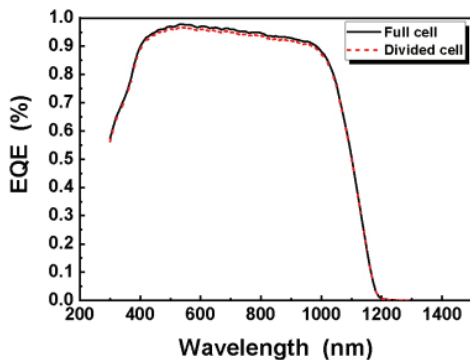


Fig. 6. Comparison of external quantum efficiency between full and divided cells in cell A.

것이라 예상했다. 하지만 그림 6은 외부 양자효율이 단파장 영역과 장파장 영역에서 차이가 없음을 보여준다. 이는 후면에서 레이저 스크라이빙을 진행하는 것이 후면 패시베이션층에 손상이 거의 없음을 의미한다.

그림 7과 표 5는 태양전지들의 분할 전/후 개방전압을 나타낸 것으로, 모든 종류의 태양전지에서 개방전압의 감소는 매우 작음을 볼 수 있다. 이 실험에 사용된 p 타입 태양전지의 개방전압은 아래의 도핑 농도와 캐리어 농도의 함수로 표현할 수 있다 [13].

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{(N_A + \Delta n)\Delta n}{n_i^2}\right) \quad (2)$$

P 타입 실리콘 셀의 경우,  $kT/q$ 는 열 전압,  $N_A$ 는 p 타입 웨이퍼의 도핑 농도,  $\Delta n$ 는 p-n 접합에서 빛 조사시 생성되는 과잉 캐리어 농도이며,  $n_i$ 는 실리콘의 진성 캐리어 농도이다. 결정질 실리콘 태양전지의 웨이퍼 도핑 농도와 과잉 캐리어 농도는 셀 종류와 관계없이 거의 일정하고, 레이저 스크라이빙에 의해 변화가 없을 것이기 때문에 식 (2)로부터 개방전압은 셀 분할 전후 크게 변화되지 않는다.

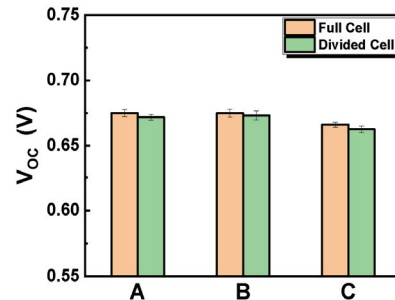


Fig. 7. Comparison of open circuit voltage between full and divided solar cells.

Table 5. Comparison of open circuit voltage between full and divided solar cells.

| Type   | Full cell |                    | Divided cell |                    | Voc change (mV) |
|--------|-----------|--------------------|--------------|--------------------|-----------------|
|        | Voc (mV)  | Standard deviation | Voc (mV)     | Standard deviation |                 |
| Cell A | 674.96    | 0.0027             | 671.79       | 0.0024             | -3.17           |
| Cell B | 674.94    | 0.0031             | 673.13       | 0.0034             | -1.81           |
| Cell C | 666.17    | 0.0019             | 662.59       | 0.0024             | -3.59           |

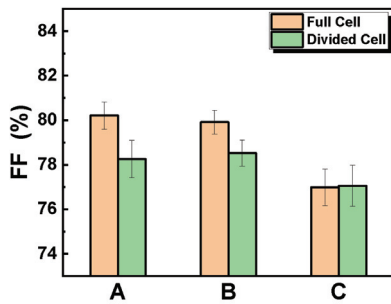


Fig. 8. Comparison of fill factor between full and divided solar cells.

Table 6. Comparison of fill factor between full and divided solar cells.

| Type   | Full cell |                    | Divided cell |                    | FF change (percentage point) |
|--------|-----------|--------------------|--------------|--------------------|------------------------------|
|        | FF (%)    | Standard deviation | FF (%)       | Standard deviation |                              |
| Cell A | 80.213    | 0.61               | 78.257       | 0.83               | -1.956                       |
| Cell B | 79.914    | 0.54               | 78.529       | 0.59               | -1.385                       |
| Cell C | 76.986    | 0.83               | 77.056       | 0.93               | +0.070                       |

그림 8과 표 6은 분할 전/후 태양전지의 곡선 인자 (fill factor,  $FF$ )를 비교한 것이다. 태양전지의 곡선 인자는 가장 높은 효율을 나타내는 태양전지 A에서 분할 전과 후의 변화가 가장 크다. 곡선 인자는 직렬저항이 클수록, 병렬저항이 작을수록 감소한다. 직렬저항은 태양전지의 도핑층 혹은 전극의 접촉 저항에 크게 영향을 받는다. 도핑층은 태양전지의 베이스(base)와 에미터(emitter)를 의미한다. 따라서 이 값은 태양전지의 종류에 따라 고유한 값이므로, 레이저 스크라이빙 때문에 변하지 않을 것이다. 접촉 저항은 태양전지를 제조하는 과정에서 생긴다. 그러므로 접촉 저항 또한 레이저 스크라이빙에 의해 바뀌지 않을 것이다. 따라서 레이저 스크라이빙으로 인해 직렬저항은 변하지 않는다. 한편, 태양전지의 병렬저항은 태양전지의 누설전류( $I_0$ )에 의해 발생한다. 태양전지의 레이저 스크라이빙 단면을 따라 형성되는 결함에 의해 태양전지에서 누설전류가 더 심해질 수 있다. 누설전류는 역포화전류밀도( $J_0$ )의 원인인데, 표 7은 분할 전 및 분할 후의 태양전지의  $J_0$  값을 나타낸 것이다.  $J_0$  값은 암상태의 log I-V 곡선에서 추출한 누설전류( $I_0$ )에서 면적을 나눈 값이다. 표 7에서 태양전지 A의  $J_0$ 는 분할 전에 비교해 분할 후가 17배 증가하였다. 이 값은 다른 태양전지에 비해 차이가 크다. 레이저 스크라이빙 과정에서 분할면에 열손상을 입힐 수 있다. 따라서 레이저 스크라이빙 과정

Table 7. Comparison of leakage current density between full and divided solar cells.

| Type   | Cell size (cm <sup>2</sup> ) | $J_0$ (A/cm <sup>2</sup> ) |
|--------|------------------------------|----------------------------|
| Cell A | Full cell                    | 244.426                    |
|        | Divided cell                 | 61.426                     |
| Cell B | Full cell                    | 244.426                    |
|        | Divided cell                 | 49.141                     |
| Cell C | Full cell                    | 244.426                    |
|        | Divided cell                 | 61.426                     |

에서 발생하는 태양전지 분할 면의 손상 때문에 누설전류가 발생한다. 고효율 PERC 태양전지일수록 태양전지의 표면 패시베이션은 더 정교한 구조를 가진다. 이때, 고효율 태양전지가 레이저로 인해 열 손상을 입으면 손상 정도가 크기 때문에  $J_0$  값이 더 큰 폭으로 증가하는 것으로 여겨진다. 따라서 이러한 누설전류의 발생은 태양전지의 곡선 인자의 감소로 이어지며 최종적으로 태양전지의 효율을 감소시킨다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

한정된 면적에서 단위 면적당 더 많은 전력을 생산하기 위해 고효율 태양전지가 싱글드 모듈에 적합하다. 고효율의 태양전지로 싱글드 모듈을 만들기 위해서 레이저 스크라이빙을 하고 태양전지를 분할하는 과정이 필요하다. 효율이 상대적으로 낮은 태양전지는 분할 후 효율 감소가 거의 없었다. 하지만 효율이 더 높은 태양전지는 분할 전과 분할 후 효율 변화가 0.35% 정도로 더 차이가 크다. 효율이 상대적으로 높은 태양전지 A의  $J_0$  값은 다른 태양전지에 비해 큰 변화를 보였다. 레이저 스크라이빙으로 인한  $J_0$  값의 변화는 태양전지의 곡선 인자를 감소하였고, 태양전지의 효율이 높을수록 태양전지의 효율이 더 많이 감소하는 결과를 만들었다.

고효율 PERC 태양전지는 효율이 상대적으로 낮은 일반 PERC 태양전지의 레이저 스크라이빙 조건을 사용하면 스크라이빙으로 인한 누설전류가 더 많이 생겨서 효율 감소가 크다는 것을 알 수 있었다. 따라서 고효율 PERC 태양전지의 레이저 스크라이빙 전/후 효율 감소를 최소화할 수 있는 새로운 공정조건을 최적화시키면, 고출력 싱글드 태양광 모듈을 만들 수 있을 것으로 기대한다.

**ORCID**

Jae Hyeong Lee

<https://orcid.org/0000-0001-7775-1142>**감사의 글**

본 연구는 한국전력공사의 사외공모 기초연구(단체)에 의해 지원되었음(과제번호: R17XA05-1).

**REFERENCES**

- [1] A. McEvoy, L. Castaner, and T. Markvart, *Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation. 2nd Edition* (Elsevier Ltd., Oxford, 2012) p. 3.
- [2] P. C. Choubey, A. Oudhia, and R. Dewangan, *Recent Res. Sci. Technol.*, **4**, 99 (2012).
- [3] M. T. Zarnai, N. N. Ekere, C. F. Oduoza, and E. H. Amalu, *Appl. Energy*, **154**, 173 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.120>]
- [4] M. Mittag, T. Zech, M. Wiese, D. Blasi, M. Ebert, and H. Wirth, *2017 IEEE 44<sup>th</sup> Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)* (IEEE, Washington, USA, 2017) p. 1531. [DOI: <https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8366260>]
- [5] J. Zhao, A. Wang, E. Abbaspour-Sani, F. Yun, and M. A. Green, *IEEE Electron Device Lett.*, **18**, 48 (1997). [DOI: <https://doi.org/10.1109/55.553040>]
- [6] F. Ye, W. Deng, W. Guo, R. Liu, D. Chen, Y. Chen, Y. Yang, N. Yuan, J. Ding, Z. Feng, P. P. Altermatt, and P. J. Verlinden, *Proc. 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (IEEE, Portland, USA, 2016) p. 3360. [DOI: <https://doi.org/10.1109/PVSC.2016.7750289>]
- [7] M. Rudolph, C. Kruse, H. Wolter, B. Wolpensinger, U. Baumann, S. Bräunig, M. Ripke, T. Falcon, R. Brendel, and T. Dullweber, *AIP Conf. Proc.*, **2147**, 060001 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5123861>]
- [8] A. W. Blakers, A. Wang, A. M. Milne, J. Zhao, and M. A. Green, *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 1363 (1989). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.101596>]
- [9] S. Eiternick, F. Kaule, H. U. Zühlke, T. Kießling, M. Grimm, S. Schoenfelder, and M. Turek, *Energy Procedia*, **77**, 340 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.048>]
- [10] S. W. Glunz, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **90**, 3276 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.09.019>]
- [11] S. Eiternick, K. Kaufmann, J. Schneider, and M. Turek, *Energy Procedia*, **55**, 326 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.08.094>]
- [12] H. Ahmed, J. Doran, and S. J. McCormack, *Sol. Energy*, **126**, 146 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.003>]
- [13] R. A. Sinton and A. Cuevas, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 2510 (1996). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.117723>]