


레이저 스크라이빙에 의한 결정질 실리콘 태양전지의 분할 및 특성 분석

박지수, 오원제, 이수호, 이재형 

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Separation and Characterization of Crystalline Silicon Solar Cell by Laser Scribing

Ji Su Park, Won Je Oh, Soo Ho Lee, and Jae Hyeong Lee

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received January 4, 2019; Revised February 10, 2019; Accepted February 11, 2019)

Abstract: Advances in laser technology have enabled ultra-high-speed ultra-precise processing, thus expanding potential applications to the semiconductor, medical, and photovoltaic industries. In particular, laser scribing technology has been applied to the production of shingled solar modules. In this work, we analyze the effect of laser scribing conditions, e.g., scribing depth, on the characteristics of the resulting divided solar cells. When the scribing depth was greater than 100 μm , the solar cells were well separated. In addition, the desired scribing depths were reached in fewer scans when the laser spot overlap was 100%. The efficiency of the divided cells decreased due to the high series resistance at scribing depths of less than 100 μm . However, at scribing depths of approximately 100 μm , the series resistance was low and efficiency reduction was minimized.

Keywords: Laser scribing, Shingled photovoltaic module, Scribing depth, Laser spot overlap

1. 서론

레이저 가공은 고밀도의 열원인 레이저를 이용하여 조사되는 소재를 물리적으로 변형시켜 주는 비접촉 가공 기술을 의미한다 [1]. 레이저 가공은 비접촉 방식이기 때문에 재료에 물리적인 힘 또는 충격을 가하지 않고 소재 가공이 용이하여 철강, 자동차, 조선, 항공 산업 등 주요 산업분야에 널리 사용되고 있다 [2,3]. 또한 레이저 기술의 발전에 따라 초고속, 초정밀 가공이 가능하게 되어 반도체 의료 및 태양광 산업분야까지 적용이 확대되었다. 특히, 싱글드(shingled) 태양광 모

듈의 제작 공정에서 레이저 가공 기술을 이용한 모듈의 고출력 및 고밀도 특성이 구현되고 있다 [4-6].

싱글드 태양광 모듈은 6인치 크기의 태양전지를 레이저로 분할한 셀을 전도성 접착제인 ECA (electrically conductive adhesives)를 통해 접합하여 제작된다 [7,8]. 싱글드 모듈은 분할된 셀의 전면 버스바(busbar)를 따라 ECA를 도포하고 다른 분할 셀의 후면 Ag pad와 겹쳐서 접합하는 방식으로, 전류를 생성할 수 없는 버스바 영역이 없어지고 유효 수광 영역이 증가하기 때문에 모듈의 효율을 상승시킬 수 있다 [9,10]. 또한 분할된 셀은 다른 분할 셀과 겹쳐져 연결되기 때문에 기존의 태양광 모듈에 비해 동일 면적 많은 수의 셀을 집적할 수 있어 고출력 모듈을 구현할 수 있다 [11]. 그러나 레이저 스크라이빙 과정에서 열에 의한 손상으로 인하여 분할된 태양전지의 특성이 저하될 수 있다 [12,13].

고효율 및 고출력의 싱글드 태양광 모듈을 제작하기

✉ Jae Hyeong Lee; jaehyeong@skku.edu

위해서는 레이저 스크라이빙(scribing) 이후 셀의 기계적 절단이 원활하게 이루어져야 하며, 분할 이후에도 셀 특성을 유지해야 한다 [14]. 또한 산업적인 측면에서 셀 분할에 소요되는 시간이 빠를수록 유리하기 때문에 레이저 스크라이빙 공정의 신속성도 고려해야 한다.

따라서 본 논문에서는 레이저의 스캐닝 횟수를 바꾸어 스크라이빙 깊이를 변화시켰고 셀 분할에 적합한 스크라이빙 깊이를 조사하였다. 또한 공정의 신속성을 위해 레이저 스캐닝 속도를 변화시켜 레이저 빔 스팟(spot)의 오버랩(overlap)에 따른 스크라이빙 깊이를 조사하였다. 게다가 다양한 스크라이빙 조건에서의 분할 셀의 특성을 분할 전과 비교함으로써 레이저 공정이 셀에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 면적 156×156 mm², 두께 210 μm의 붕소가 도핑된 p타입 웨이퍼로 제조된 단결정 실리콘 태양전지(NSP 3BB Mono, IHUAX.CN, China)를 셀 분할에 사용하였다. 그림 1은 실제 실험에 사용된 분할 전 태양전지의 사진으로, 셀 전면에는 빛을 받아 생성된 전류를 수집하는 3개의 버스바가 존재한다.

나노초 펄스의 green 레이저(AVIA NX 532-65, Coherent, USA)를 사용하여 6인치 크기의 태양전지를 그림 2와 같이 스크라이빙 선을 설정하여 공정을 진행하였다. 셀의 전면을 스크라이빙 할 경우, 전면의 수광 영역이 레이저로 인해 손상을 받기 때문에 셀의 후면을 스크라이빙 하였다.

표 1은 본 연구에서 셀 분할에 사용한 레이저 스크라이빙 조건을 나타낸 것이다. 레이저 빔 스팟의 오버랩 비율을 조절하기 위해 주파수 200 kHz, 출력 23.2 W로 고정한 상태에서 스캐닝 속도를 변화시켰다. 스캐

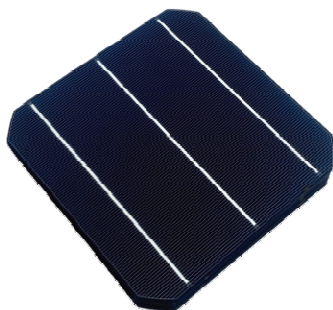


Fig. 1. Photographs of mono crystalline silicon solar cell.

닝 속도가 빠를수록 레이저 빔 스팟의 오버랩 비율이 낮아지기 때문에 속도를 3,375, 3,000, 2,700 mm/s로 줄여서 오버랩 비율을 60, 80, 100%로 변화시켰다. 또한 각 오버랩 조건에서 레이저의 스캐닝 횟수를 조절하여 스크라이빙 깊이를 변화시켰다.

레이저 조건에 따른 스크라이빙 폭 및 깊이는 광학현

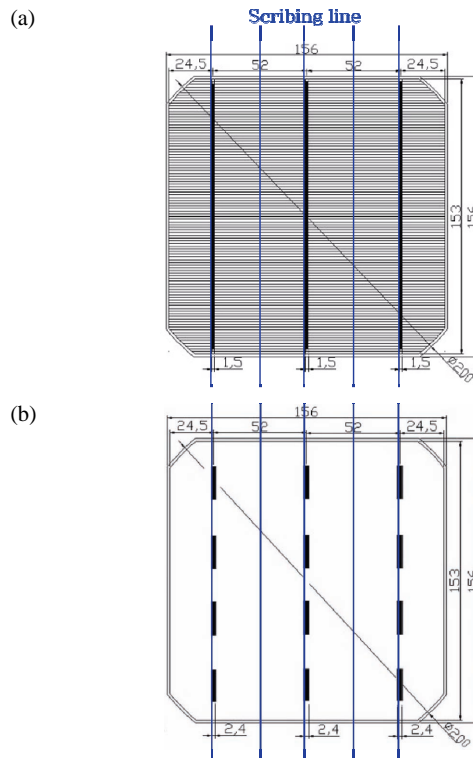


Fig. 2. Laser-scribed lines on (a) the front and (b) rear side of the solar cells.

Table 1. Laser scribing conditions.

Scanning speed (mm/s)	Overlap (%)	Scanning count (times)	Depth (μm)	Freq (kHz)	Power (W)
3,375	60	13	77	200	23.2
		16	85		
		21	114		
		28	130		
3,000	80	12	70		
		15	96		
		19	115		
		23	126		
2,700	100	10	66		
		12	85		
		16	106		
		23	128		

미경으로 측정하여 확인하였다. 분할 전 및 후의 태양전지 특성 변화는 솔라 시뮬레이터(WXS-155S-L2, WACOM, Japan)와 전류-전압 분석기(DKSCT-3T, Denken, Japan)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 레이저 빔 스팟의 오버랩 비율에 따른 스크라이빙 깊이의 변화를 나타낸 것이다. 레이저 스크라이빙 깊이는 오버랩 비율에 상관없이 스캐닝 횟수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다. 하지만 오버랩 비율에 따라 레이저의 스캐닝 속도가 다르기 때문에 동일한 스캐닝 횟수에도 스크라이빙 깊이는 차이가 있다. 스팟 오버랩 비율이 높을수록 레이저의 스캐닝 속도는 느리기 때문에 오버랩 비율이 100%인 조건에서는 다른 조건들에 비해 상대적으로 작은 스캐닝 횟수에서 더 깊게 스크라이빙 되었다. 그러나 오버랩 비율이 60%인 조건은 레이저 스캐닝 속도가 상대적으로 빠르기 때문에 동일 스크라이빙 깊이를 얻기 위해서는 보다 많은 레이저 스캐닝 횟수가 필요한 것을 알 수 있다.

그림 4는 서로 다른 깊이로 레이저 스크라이빙 후 분할한 셀 사진을 나타낸 것이다. 오버랩 비율에 상관없이 스크라이빙 깊이가 100 μm 미만에서는 스크라이빙 선을 따라 셀 분할이 제대로 이루어지지 않음을 볼 수 있다. 하지만 깊이가 100 μm 인 경우, 스크라이빙 선을 따라 셀 분할이 원활하게 이루어졌다. 따라서 셀 분할에 적합한 최소 스크라이빙 깊이는 대략 태양전지 두께의 절반에 해당하는 100 μm 임을 알 수 있다. 셀 분할에 적합한 스크라이빙 깊이가 100 μm 이상인 것을 고려했을 때, 그림

3에서 오버랩 비율이 100%일 때 가장 작은 스캐닝 횟수로 100 μm 깊이에 도달한다. 따라서 신속한 레이저 스크라이빙을 위해서는 스팟 오버랩 비율이 100%인 조건이 적합함을 알 수 있다.

그림 5와 6은 레이저 스캐닝 횟수에 따른 태양전지의 표면 및 분할 후의 단면 사진을 나타낸 것이다. 이

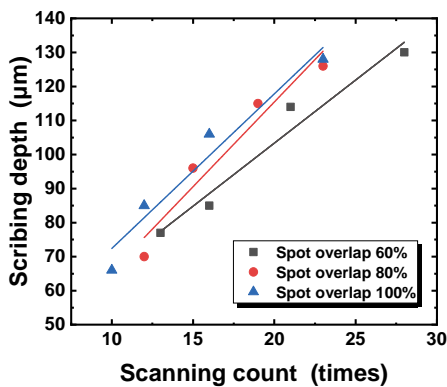


Fig. 3. Relationship between the scribing depth and the scanning count under different laser beam spot overlap ratios.

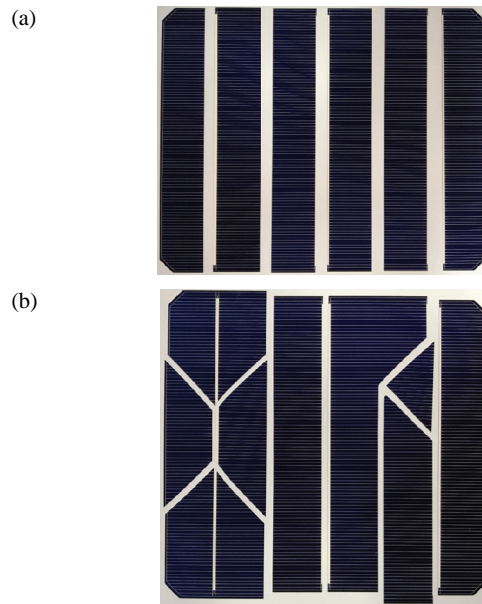


Fig. 4. Photographs of cell divided with the scribing depth of (a) 106 μm and (b) 85 μm .

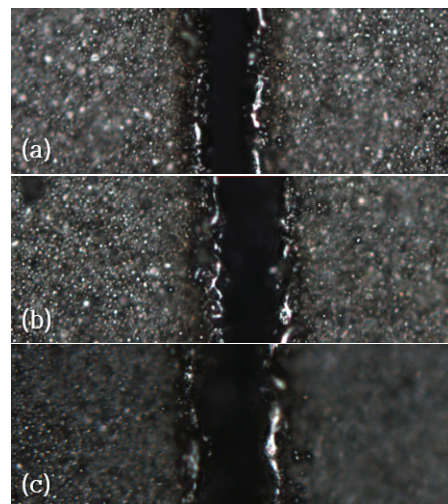


Fig. 5. Top views of the solar cell laser-scribed with various scanning counts (scribing depths): (a) 10 times (64 μm), (b) 16 times (68 μm), and (c) 23 times (77 μm).

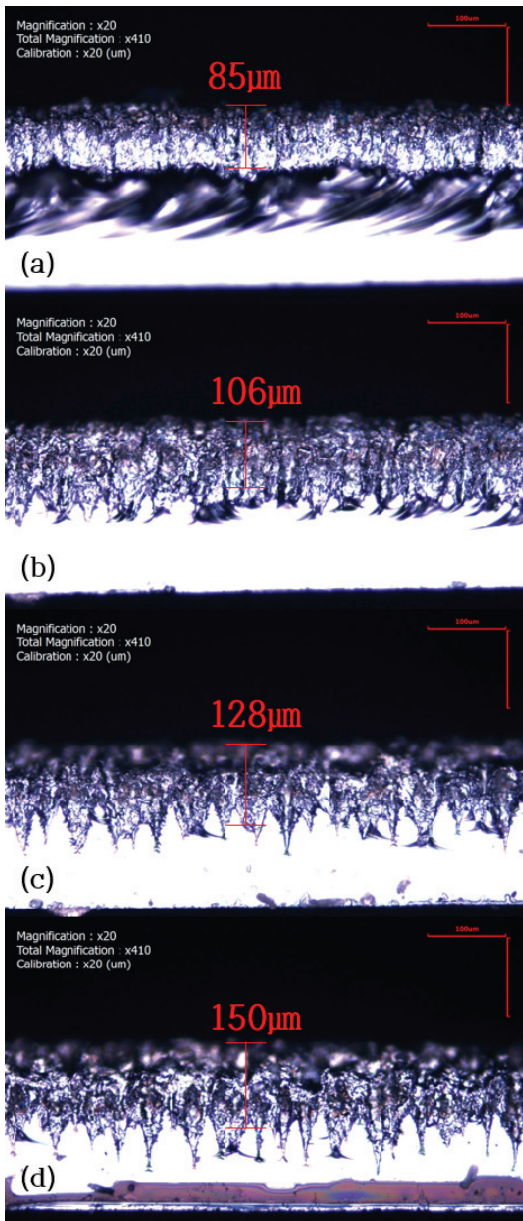


Fig. 6. Cross-section views of the divided cell with various laser scanning counts: (a) 10 times, (b) 12 times, (c) 16 times, and (d) 23 times.

때 레이저 빔 스팟 오버랩 비율은 100%로 고정하였다. 스캐닝 횟수가 많아짐에 따라 스크라이빙 깊이뿐만 아니라 폭도 동시에 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 그림 6으로부터 106 µm 이상의 스크라이빙 깊이에서는 분할 후의 셀 단면이 고르지 못함을 알 수 있다.

그림 7은 레이저 빔 스팟 오버랩 비율을 100%로 고정한 상태에서 레이저 스캐닝 횟수에 따른 분할 셀의

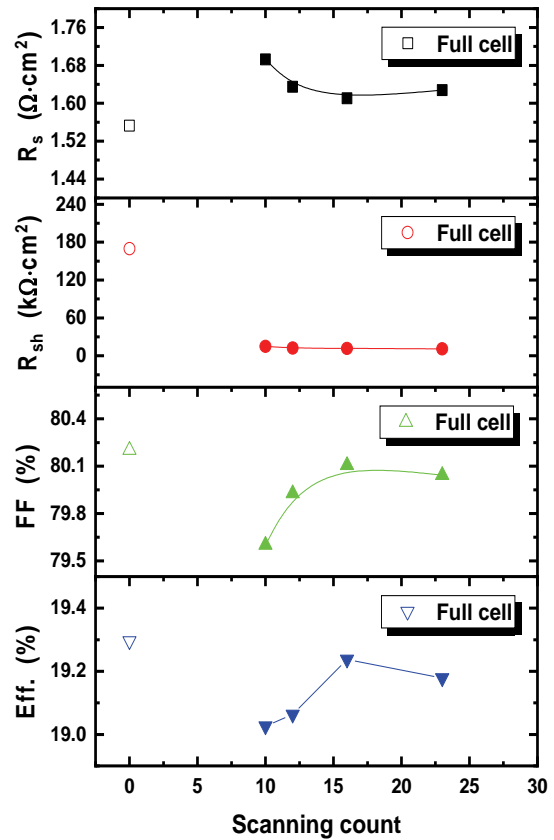


Fig. 7. Comparison of solar cell performance between cell performances of the 6 inch cell and divided cell.

특성을 나타낸 것이다. 비교를 위해 스캐닝 횟수가 0인 분할 전 태양전지의 특성도 함께 나타내었다. 셀의 직렬저항은 분할 이후 증가하지만 레이저 스캐닝 횟수 증가에 따라 다소 감소함을 볼 수 있다. 특히, 100 µm 이하의 스크라이빙 깊이에 해당하는 스캐닝 횟수 10, 12에서 직렬저항이 상대적으로 높게 나타났다. 이는 셀 분할에 적합한 스크라이빙 깊이에 도달하지 못한 상태에서 셀을 절단할 경우 발생하는 손상으로 인해 직렬저항 성분이 증가한 것으로 생각된다. 분할 셀의 병렬저항은 분할 전에 비해 10배 이상으로 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 분할 셀의 병렬저항 값은 대부분 10 $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 이상으로 1 $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 이상에서는 FF (fill factor)가 병렬저항의 영향을 거의 받지 않기 때문에 [15] 스크라이빙 이후 분할 셀의 FF는 상대적으로 직렬저항에 영향을 많이 받음을 알 수 있다. 스캐닝 횟수에 따른 분할 셀의 FF는 처음에는 상대적으로 높은 직렬저항으로 인해 분할 전에 비해 감소하지만, 이후 다시 증가함을 볼 수 있다. 따라서 분할 셀의 효율은

이러한 FF의 감소로 인해 분할 전에 비해 낮아지지만 레이저 스캐닝 횟수의 증가에 따라 회복됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 싱글드 태양광 모듈 제작에 적합한 레이저 스크라이빙 조건이 분할 셀에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 셀 분할이 원활히 이루어지기 위해서는 셀 두께의 절반에 해당하는 100 μm 이상으로 스크라이빙 깊이가 필요함을 알 수 있었다. 또한 레이저 빔 스팟의 오버랩 비율이 100%일 때 가장 빠르게 원하는 스크라이빙 깊이를 도달할 수 있어 신속한 분할 공정이 가능하였다. 스크라이빙 이후 분할된 셀의 특성을 확인한 결과, 레이저에 의한 손상으로 직렬저항이 증가하여 FF가 감소하였다. 그 결과, 셀의 효율은 분할 전에 비해 감소하였지만 레이저 스캐닝 횟수가 증가함에 따라 회복되어 100 μm 부근의 스크라이빙 깊이에서 효율 감소량이 가장 작음을 알 수 있었다.

본 논문에서 연구된 레이저 스크라이빙 조건을 싱글드 모듈 제작에 적용하면 공정이 신속하고 셀 절단 이후 특성의 변화도 최소화되어 고출력 및 고효율 태양광 모듈 제작이 가능할 것으로 기대된다.

ORCID

Jae Hyeong Lee

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

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.20163030014070).

REFERENCES

- [1] The Innovation Polis, *Laser Processing Market* (INNOPOLIS, Daejeon, Korea, 2017) p. 2.
- [2] M. Lee, *J. Weld. Joining*, **33**, 7 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.4.7>]
- [3] Ministry of SMEs and Startups, *Technology Roadmap for SME* (MSS, Daejeon, Korea, 2017) p. 1.
- [4] R. Steiner, *Med. Laser Application*, **21**, 131 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mla.2006.03.007>]
- [5] K. W. Cho and H. J. Park, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, **27**, 32 (2010).
- [6] H. Jee, W. Choi, J. Lee, and C. Jeong, *Curr. Photovoltaic Res.*, **5**, 95 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.21218/CPR.2017.5.3.095>]
- [7] G. Beaucarne, *Energy Procedia*, **98**, 115 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.087>]
- [8] D. Rudolph, J. Rabanal-Arabach, I. Ullmann, A. Halm, A. Schneider, and T. Fischer, *Proc. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC, Amsterdam, Nederland, 2017)* p. 880.
- [9] D. Tonini, G. Cellere, M. Bertazzo, A. Fecchio, L. Cerasti, and M. Galiazzo, *Energy Procedia*, **150**, 36 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.010>]
- [10] M. Mittan, T. Zech, M. Wiese, D. Blasi, M. Ebert, and H. Wirth, *Proc. 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (IEEE, Washington, USA, 2017) p. 1.
- [11] L. Theunissen, B. Willems, J. Burke, D. Tonini, M. Galiazzo, and A. Henckens, *AIP Conf. Proc.*, **1999**, 080003 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5049305>]
- [12] 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>]
- [13] 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>]
- [14] M. Oswald, M. Turek, J. Schneider, and S. Schoenfelder, *Proc. 28th European Photovoltaic and Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC, Villepinte, France, 2013)* p. 1807.
- [15] J. S. Lee, G. H. Kang, Y. G. Park, J. J. Park, Y. J. Lee, Y. S. Jeon, and B. D. Choe, *Solar Cell Measurement and Analysis* (Green, Seoul, 2016) p. 31.