ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 66, No. 5, pp. 851~856, 2017
http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.5.851

레이저 스크라이빙 공정을 이용한 실리콘 태양전지의 측면분리 효과

Edge Isolation Effects on Silicon Solar Cells using a Laser Scribing Process

주 재 홍* · 정 순 원** · 김 광 호**†
(Jae-Hong Joo · Soon-Won Jung · Kwang-Ho Kim)

Abstract - Research on the edge isolation process of typical polycrystalline silicon solar cells was carried out using laser scribing equipment. The voltage-current characteristics of the solar cell before and after laser scribing were analyzed using a solar simulator. Current density and efficiency increased as the fill factor of the solar cell remained constant after the laser scribing process. The efficiency of the solar cell can be increased in a short time by the edge isolation process performed via a laser scribing process. The polycrystalline silicon solar cell was made into a series electrode, and the efficiency of the solar cell increased because the width of the solar cell was narrowed and the active region was widened by the laser scribing process.

Key Words : Laser scribing, Edge isolation, Silicon solar cell, Efficiency

1. 서 론

태양광 산업은 유럽을 필두로 한 강력한 발전차액지원 정책(FIT, Feed-in-Tariff)[1-3]과 신재생 에너지 공급의무화 제도(RPS, Renewable Portfolio Standard)[4,5]를 기반으로 석유자원 에너지를 대체할 수 있는 신재생에너지 개발의 붐을 타고 고속 성장을 이루어왔다. 최근에는 지원정책 약화와 글로벌 경기불황, 중국의 저가격화 공세, 대기업의 턴키 수주 등이 나타나면서 다소 신규수요가 위축되고 있으나, 미국, 중국, 일본, 인도 등으로 확대 및 신흥 시장의 성장에 힘입어 2014년 글로벌 태양광 설치 수요는 43.8 GW로 확대되었다[6]. 태양광 산업의 핵심이 되는 태양전지는 크게 실리콘 태양전지와 화합물 태양전지로 나눌 수 있다. 실리콘 태양전지는 단결정 및 다결정 실리콘, 비정질 및 결정질 실리콘 박막 등으로 나눌 수 있고, 화합물 태양전지는 CIGS (copper indium galium selenide), CdTe (cadmium telluride), GaAs (gallium arsenide) 등의 태양전지가 있다. 특히, 결정질 실리콘을 이용한 태양전지는 전체 태양전지 시장의 85 % 이상을 차지하고 있으며, 향후에도 이러한 시장 점유율이 크게 바뀌지 않으리라는 의견이 많다[7]. 결정질 실리콘 태양전지의 점유율이 높은 이유는 원료 물질의 풍부함으로 인한 저비용으로 구현이 가능하다는 것과 현재까지 반도체 산업에서 가장 널리 사용된 재료로서 축적된 연구를 통한 이해도가 높으며, 제조공정이 확립되어 있기 때문이다[7].

실리콘 태양전지 제조공정에서 p-n 접합 공정은 매우 중요하다. 고온의 확산로(furnace)를 이용하여 p형 웨이퍼에 n형 영역을 형성하기 위해 $POCl_3$ 용액을 확산시키는 공정이다. n형 영역은 태양전지 앞, 뒷면에 형성이 되고, 효율을 증가시키기 위해서는 앞, 뒷면 사이에 재결합통로가 만들어져 누설전류가 발생하는 것을 막아야 한다. 기존의 p-n 접합 측면분리 방법으로는 플라즈마 에칭과 습식에칭을 많이 사용하였으나, 공정과정에서의 손상율이 크다는 문제점이 있어 공정 개선의 여지가 있었다[8]. 최근, 레이저 스크라이빙 방법을 이용하여 공정 시간 단축 및 공정 인라인화를 이루고, 측면분리(edge isolation) 공정을 통해 태양전지의 효율을 증가시킬 수 있다는 보고가 나타나고 있다[9-11]. 레이저 스크라이빙 공정을 하는 근본적인 이유는 태양전지를 직렬형태의 전극으로 만드는 것이며, 태양전지의 폭이 좁을수록 활성영역이 넓기 때문에 태양전지의 효율을 증가 시킬 수 있기 때문이다[11]. 레이저 공정은 실리콘 표면에 빔을 조사하여 발생한 에너지가 재료에 흡수되고, 에너지는 표면열원이 되어 가열, 용융현상들로 인하여 가공이 이루어진다. 따라서 레이저가 조사된 영역 주변에는 열변형층(heat affected zone)이라 불리는 변형이 일어나기 때문에, 열손상이나 구조변화를 일으키지 않게 재료를 제거하기 위해서는 최소한의 에너지를 찾아 공정하는 것이 중요하다[12-14]. 결정질 실리콘 태양전지의 경우 태양전지의 가장자리 테두리를 격리시키기 위해 레이저 빔으로 스크라이빙하거나, 표면을 거칠게 가공해 태양광의 입사면적을 넓히고 있다. 최근에는 레이저 빔이 집속된 부분만 선택적으로 도핑되게 함으로써 더욱 미세한 전극을 형성해 효율을 증가시키기도 한다. 또한 태양전지 모듈 생산에도 레이저 기술이 활발하게 접목되고 있다. 이러한 레이저 기술들이 접목된 솔루션은 태양광 시장의 새로운 블루칩으로 성장할 것으로 전망돼 큰 기대

† Corresponding Author : Dept. of Solar & Energy Engineering, Cheongju University, Korea
E-mail : khkim@cju.ac.kr
* Dept. of Energy Convergence, Cheongju University, Korea
** Dept. of Solar & Energy Engineering, Cheongju University, Korea
Received : March 31, 2017; Accepted : April 14, 2017

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

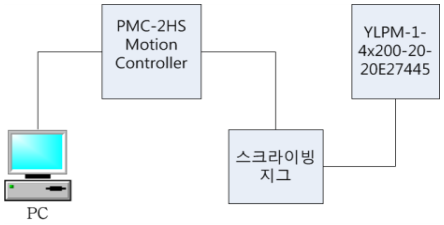
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

를 걸고 있다.

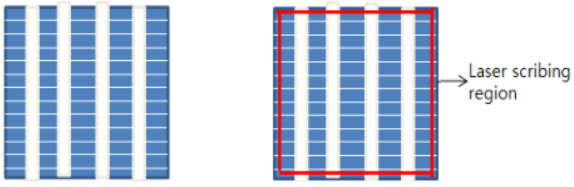
본 논문에서는 공정 조건 변화를 통하여 측면분리 횟수에 따른 태양전지의 효율을 비교하였으며, 그 결과를 보고한다.

2. 실험 방법

그림 1(a)는 본 연구에서 사용한 레이저 스크라이빙 장비의 구성을 나타낸 것이다. 레이저 스크라이빙 장비는 모션 콘트롤러의 프로그램을 실행시키기 위한 컴퓨터, 스크라이빙 지그의 위치 및 속도를 제어하기 위한 PMC-2HS(Programmable Motion Controller-2-Axis High Speed), 태양전지를 핸들링하기 위한 지그, 레이저 콘트롤러인 YLPM(Ytterbium Laser Pulsed Mode)으로 구성된다. 레이저는 파장 1064λ, 파워 20 W, 주파수 1000



(a)레이저 스크라이빙 장비



(b) 다결정 실리콘 태양전지 (c) 측변분리 한 실리콘 태양전지

그림 1 레이저 스크라이빙 장비 및 실리콘 태양전지

Fig. 1 Configuration of laser scribing equipment and polycrystalline solar cells

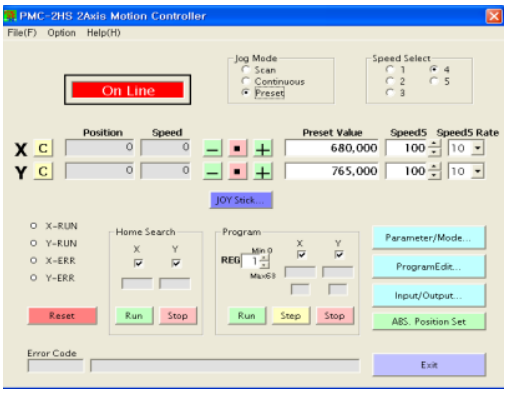


그림 2 모션 콘트롤러의 메인화면

Fig. 2 Main screen of motion controller

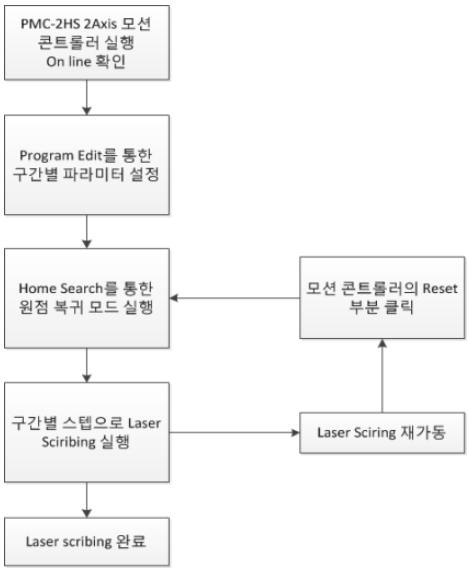


그림 3 레이저 스크라이빙 공정 순서도

Fig. 3 Flow-chart of laser scribing process

kHz를 사용하였다. 그림 1(b)는 일반적인 다결정 실리콘 태양전지 셀을 보인 것이고, 그림 1(c)는 본 연구를 통한 레이저 스크라이빙을 진행하여 태양전지 셀의 표면을 가공한 다결정 실리콘 태양전지 셀을 개략적으로 보인 것이다.

그림 2는 레이저 스크라이빙을 위한 장비의 모션 콘트롤러 메인 프로그램을 나타낸 것이다. 레이저 스크라이빙을 위하여 원점으로 지그를 이동시킬 수 있으며, 지그의 이동 속도제어 및 파라미터 값 설정을 통하여 원하는 x축과 y축으로의 이동이 가능하다. 또한, YLPM 콘트롤러를 이용하여 레이저의 파워 및 주파수를 설정할 수 있다. 레이저의 파워 및 주파수에 따른 레이저 스크라이빙 조건에 따른 실리콘 태양전지 표면의 스크라이빙되는 깊이와 폭을 확인하여 분석하였다.

그림 3은 레이저 스크라이빙 공정의 실험 순서도를 나타낸 것이다. 첫째, PMC-2HS 모션 콘트롤러를 실행하여 모션 콘트롤러의 on line 상태를 확인하고, 프로그램 에디트를 통해 각 구간별 파라미터 값를 설정한다. 둘째, 원점 복귀 모드를 실행하여 초기 위치를 확인하고, 설정된 조건대로 레이저 스크라이빙 공정을 진행한다. 반복적인 레이저 스크라이빙을 위해서는 모션 콘트롤러의 Reset 버튼을 눌러 원점 복귀 모드를 실행한다. 상술한 일련의 과정을 1 cycle로 하여 레이저 스크라이빙 실험을 1번, 2번, 3번 반복적으로 진행하였고, 그 결과를 분석하여 비교하였다. 또한, 스크라이빙 전/후의 결과를 확인하기 위해 태양전지 시뮬레이터로 시뮬레이션하여 효율을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 레이저 스크라이빙 공정의 레이저 파워에 따른 다결정 실리콘 태양전지의 스크라이빙되는 깊이 및 폭의 변화를 보인

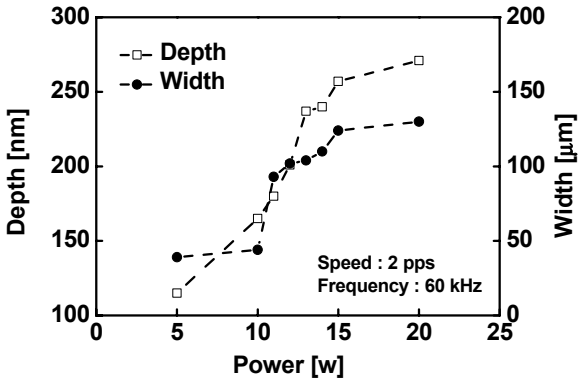


그림 4 레이저 스크라이빙 파워에 따른 다결정 태양전지의 깊이 및 폭 변화

Fig. 4 Depth and width variation of polycrystalline solar cell with laser scribing power

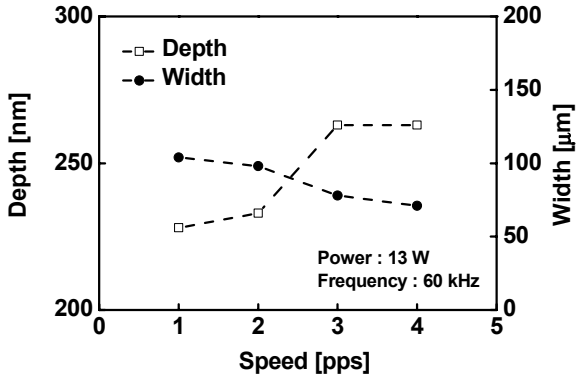


그림 5 레이저 스크라이빙 속도에 따른 다결정 태양전지의 깊이 및 폭 변화

Fig. 5 Depth and width variation of polycrystalline solar cell with laser scribing speed

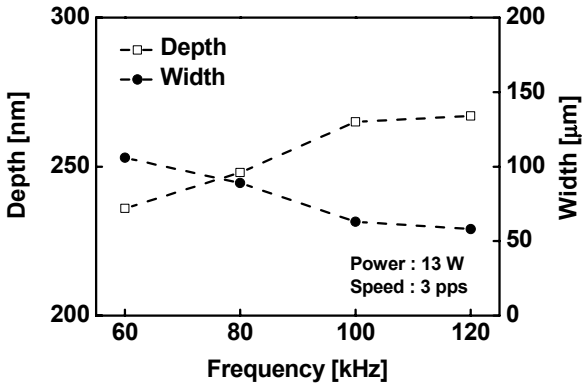


그림 6 레이저 스크라이빙 주파수에 따른 다결정 태양전지의 깊이 및 폭 변화

Fig. 6 Depth and width variation of polycrystalline solar cell with laser scribing frequency

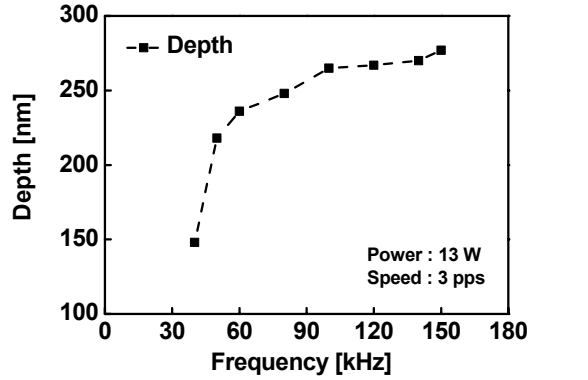


그림 7 레이저 스크라이빙 주파수에 따른 다결정 태양전지의 깊이 변화

Fig. 7 Depth variation of polycrystalline solar cell with laser scribing frequency

것이다. 깊이 및 폭의 측정은 3D-현미경(KH-7700, 하이록스)을 이용하였으며, 레이저의 속도 2 pps, 주파수 60 kHz로 고정하고, 레이저 파워를 5/10/11/12/13/14/15/20 W로 변화시키면서 실험을 진행하였다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 레이저 파워가 5 W에서 20 W로 증가함에 따라 스크라이빙되는 실리콘 태양전지의 깊이가 증가함을 알 수 있다. 스크라이빙 폭은 10 W 이하의 약한 파워에서는 변화가 크지 않으나, 11 W 이상의 파워에서는 증가가 나타남을 확인할 수 있다. 이는 레이저 파워가 증가함에 따라 실리콘 태양전지 표면에 레이저를 조사하여 발생한 에너지가 증가하기 때문으로 판단되며, 스크라이빙에는 일정 수준 이상의 파워가 필요함을 의미한다.

그림 5는 스크라이빙 속도에 따른 다결정 실리콘 태양전지의 스크라이빙되는 깊이 및 폭의 변화를 나타낸 것이다. 실험조건은 파워 13 W, 주파수 60 kHz로 고정시키고, 속도를 1/2/3/4 pps로 변화시키며 실험하였다. 스크라이빙 속도가 1 pps에서 4 pps로 증가함에 따라 스크라이빙되는 실리콘 태양전지의 깊이는 증가하지만, 폭은 오히려 감소함을 확인할 수 있다. 이는 레이저 파워가 일정할 경우, 실리콘 태양전지 표면에 레이저를 조사하여 발생한 에너지는 시간에 비례하기 때문에, 표면의 가열, 용융현상들로 인하여 이루어지는 가공이 폭 방향보다는 깊이 방향으로 열변형이 일어난다고 판단할 수 있다. 즉, 가공되는 폭을 좁게 하기 위해서는 스크라이빙 속도를 빨리 하는 것이 필요함을 알 수 있다. 레이저 스크라이빙 공정을 진행함에 있어 폭열 손상이나 구조변화를 일으키지 않게 재료를 제거하기 위해 스크라이빙 속도를 조절하는 것이 중요함을 알 수 있다.

그림 6은 주파수에 따른 다결정 실리콘 태양전지의 스크라이빙되는 깊이 및 폭의 변화를 나타낸 것이다. 실험조건은 파워와 속도를 13 W, 3 pps로 고정하고, 주파수를 60/80/100/120 kHz로 변화시켜서 실험을 진행하였다. 그래프에서 보는 것과 같이, 주파수가 60 kHz에서 120 kHz로 증가함에 따라 스크라이빙되는 태양

전지의 깊이는 증가하고, 폭은 감소하는 경향을 나타났다. 이는 그림 5의 스크라이빙 속도 증가에 따른 결과와 일치하는 결과로서, 표면의 가열, 용융현상들로 인하여 이루어지는 가공이 폭 방향보다는 깊이 방향으로 열변형이 일어난다고 판단할 수 있다.

그림 7은 그림 6의 조건에서 주파수의 인가 범위를 더욱 넓게 설정하여 확인한 결과이다. 그림 6의 결과에서 예상할 수 있었듯이, 주파수 증가에 따라 스크라이빙 되는 깊이가 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 다만, 주파수가 40 kHz에서는 깊이가 급격하게 감소하는 결과가 나타나는데, 이는 40 kHz의 경우 표면의 가열, 용융현상들이 약하게 일어나기 때문으로 판단된다.

그림 8은 솔라 시뮬레이터(Solar Simulator, McScience SimuLight PLS600)로 측정한 레이저 스크라이빙 공정을 진행하지 않은 전형적인 다결정 실리콘 태양전지에서 얻어진 전압-전류 특성 그래프를 보인 것이다. 3개의 서로 다른 다결정 실리콘 태양전지에서 측정하였으며, 그래프 상 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 그림 8에서 측정된 결과를 표 1에 요약 정리하였다. Fill Factor 75.02 %, 전류밀도 389 A/cm^2, 효율 17.57 %로 나타났다. 또한, 션트저항은 17.25 Ω, 직렬저항은 0.0077 Ω이었다.

그림 9는 그림 8의 결과와 비교하기 위한 것으로, 솔라 시뮬레이터로 측정한 레이저 스크라이빙 공정 진행 후의 전압-전류 특성을 나타낸 것이다. 레이저 스크라이빙 공정 조건을 파워 13 W, 속도 3 pps, 주파수 100 kHz로 고정하고, 반복 스크라이빙을 진행하여 얻은 결과이다. 그림 8의 스크라이빙 전의 결과와 비교해 볼 때, 레이저 스크라이빙을 행한 경우, 전류밀도가 389 A/m^{2}에서 630 A/m^{2}으로 증가하였고, 효율은 17.57 %에서 18.20 %로 증가하였음을 알 수 있다. 이는 레이저 스크라이빙 장비를 통한 측면분리 공정을 통해 태양전지의 효율을 증가시킬 수 있다는 것을 확인한 결과라 하겠다. 레이저 스크라이빙 공정을 통해 다결정 실리콘 태양전지를 직렬형태의 전극으로 만들어, 태양전지의 폭이 좁아져 활성영역이 넓어졌기 때문에 태양전지의 효율을 증가되었음을 의미한다. 또한, 그래프에서 보는 것과 같이 3회에 걸친 반복 스크라이빙에 의해 특성이 다소 개선되고 있는 것으로 확인 되는 바, 향 후 추가적인 실험을 통하여 최적화할 필요성이 있다. 다만, 많은 횟수의 반복 스크라이빙의 경우 다결정 실리콘 태양전지가 파손되는 문제가 생길 수 있으므로 기판의 두께를 감안하여 스크라이빙되는 깊이를 주의 깊게 관찰할 필요가 있다.

그림 9에서 측정된 결과를 표 2에 요약 정리하였다. Fill Factor 75.49 %, 전류밀도 630 A/cm^2, 효율 18.20 %로 나타났다. 또한, 션트저항은 3.47 Ω, 직렬저항은 0.011 Ω이었다. 표 1과 표 2의 결과를 정리해 보면, 레이저 스크라이빙 공정을 통해 다결정 실리콘 태양전지를 직렬형태의 전극으로 만들어졌기 때문에, Fill

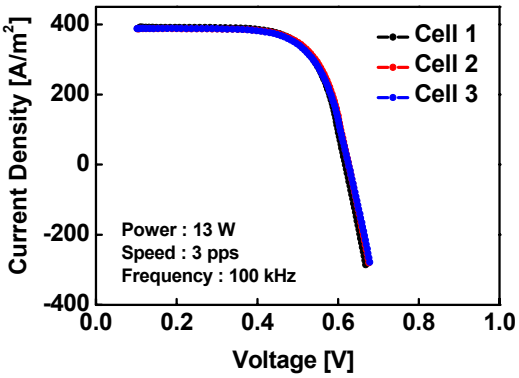


그림 8 전형적인 다결정 태양전지의 전압-전류 특성

Fig. 8 Voltage-current characteristics of the typical polycrystalline solar cells

표 1 전형적인 다결정 태양전지의 특성

Table 1 Characteristics of typical polycrystalline solar cells

Items \ Cell	Cell 1	Cell 2	Cell 3	평균
V_{oc}	0.62V	0.63V	0.63V	0.627V
I_{sc}	9.53A	9.44A	9.44A	9.47A
J_{sc}	391A/m^2	388A/m^2	388A/m^2	389A/m^2
Fill Factor	75.27%	75.43%	74.37%	75.02%
Efficiency	17.23%	17.73%	17.75%	17.57%
Shunt R	15.88Ω	10.17Ω	25.70Ω	17.25Ω
Series R	0.007Ω	0.008Ω	0.008Ω	0.0077Ω

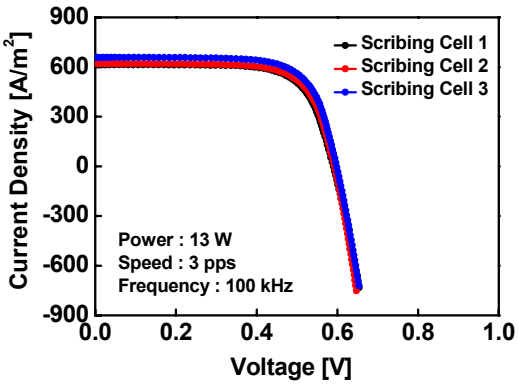


그림 9 스크라이빙 횟수에 따른 다결정 태양전지의 전압-전류 특성

Fig. 9 Voltage-current characteristics of polycrystalline solar cells according to the number of scribing

표 2 스크라이빙 횟수에 따른 다결정 태양전지의 특성

Table 2 Characteristics of polycrystalline solar cell according to the number of scribing

Items \ Cell	Scribing Cell 1	Scribing Cell 2	Scribing Cell 3	평균
V_{oc}	0.59V	0.59V	0.60V	0.593V
I_{sc}	6.20A	6.14A	6.58A	6.31A
J_{sc}	613A/m^2	619A/m^2	657A/m^2	630A/m^2
Fill Factor	75.62%	75.24%	75.62%	75.49%
Efficiency	18.06 %	18.22%	18.31%	18.20%
Shunt R	2.96Ω	3.48Ω	3.96Ω	3.47Ω
Series R	0.011Ω	0.012Ω	0.011Ω	0.011Ω

Factor는 유지되면서 도 전류밀도와 효율이 증가함을 알 수 있다. 이는 태양전지의 폭이 좁아져 활성영역이 넓어졌기 때문에 태양전지의 효율을 증가되었음을 의미한다. 또한, 레이저 스크라이빙 공정을 통해 다결정 실리콘 태양전지를 직렬형태의 전극으로 만들어졌기 때문에, 션트 저항은 감소하고, 직렬저항은 증가하였다.

4. 결 론

레이저 스크라이빙 장비를 이용하여 전형적인 다결정 실리콘 태양전지의 측면 분리 공정을 진행하였다. 솔라 시뮬레이터를 통한 레이저 스크라이빙 전후의 전압-전류 특성을 확인한 결과, 레이저 스크라이빙 공정 후의 태양전지에서 Fill Factor는 유지되면서 전류밀도와 효율이 증가함을 확인하였다. 이는 단시간의 레이저 스크라이빙 공정을 통한 측면분리 공정을 행할 경우, 태양전지의 효율을 증가시킬 수 있다는 사실을 확인하는 것이며, 레이저 스크라이빙 공정을 통해 다결정 실리콘 태양전지를 직렬형태의 전극으로 만들어, 태양전지의 폭이 좁아져 활성영역이 넓어졌기 때문에 태양전지의 효율을 증가되었다고 판단된다. 또한, 반복 스크라이빙에 의해 특성이 다소 개선되는 것으로 확인되는 바, 향후 추가적인 연구를 통하여 최적화할 필요성이 있다.

References

[1] T. Couture and Y. Gagnon, “An analysis of feed-in tariff remuneration models: Implications for renewable energy investment”, Energy Policy, Vol. 38, pp. 955-965(2010).

[2] L. Butler and K. Neuhoff, “Comparison of feed-in tariff, quota and auction mechanisms to support wind power development”, Renewable Energy, Vol. 33, pp. 1854-1867 (2008).

[3] M. P. Pablo-Romero, A. Sánchez-Braza, J. Salvador-Ponce, and N. Sánchez-Labrador, “An overview of feed-in tariffs, premiums and tenders to promote electricity from biogas in the EU-28”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 73, pp. 1366-1379(2017).

[4] H. Yin and N. Powers, “Do state renewable portfolio standards promote in-state renewable generation?”, Energy Policy, Vol. 38, pp. 1140-1149(2010).

[5] T. Berry and M. Jaccard, “The renewable portfolio standard: design considerations and an implementation survey”, Energy Policy, Vol. 29, pp. 263-277(2001).

[6] Global Market Oulook for Photovoltaics, 2014-2018.

[7] J. Kim, “Technology Status of Crystalline Silicon Solar Cells“, Ceramist, Vol. 8, No. 5, pp. 28-35(2005).

[8] J. Kwon, J. Yoo, K. Yoog, K. Han, S. Choi, and N. Kim, "Edge isolation of Crystalline Silicon solar cell wigh Laser application", The Korean Solar Energy Society Proceedings of the KSES 2010 Spring Annual Conference, pp. 154-156(2010).

[9] D. Kray, S. Hopman, A. Spiegel, B. Richerzhagen, G. P. Willeke, “Study on the edge isolation of industrial silicon solar cells with waterjet-guided laser”, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 91, pp. 1638-1644(2007).

[10] H. Booth, “Laser Processing in Industrial Solar Module Manufacturing”, Journal of Laser Micro/Nanoengineering, Vol. 5, No. 3, pp. 183-191(2010).

[11] D. Kyeong, M. Gunasekaran, K. Kim, H. Kim, T. Kwon, I. Moon, Y. Kim, K. Han, and J. Lee, “Laser edge isolation for high-efficiency crystalline silicon solar cells”, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 55, No. 1, pp. 124-128(2009).

[12] Y. Chen, K. Zhang, J. Huang, S. R. E. Hosseini, and Z. Li, “Characterization of heat affected zone liquation cracking in laser additive manufacturing of Inconel 718”, Materials and Design, Vol. 90, pp.586-594(2016).

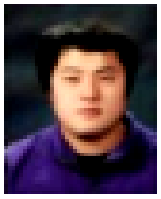
[13] D. S. Finn, Z. Lin, J. Kleinert, M. J. Darwin, and H. Zhang, “Study of die break strength and heat-affected zone for laser processing of thin silicon wafers”, Journal of Laser Applications, Vol. 27, No. 3, pp. 032004-1-032004-8(2015).

[14] X. N. Pan, C. Z. Huang, J. Wang, H. T. Zhu, and P. Yao, “Laser-Assisted Waterjet Micro-Grooving of Silicon Wafers for Minimizing Heat Affected Zone”, Materials Science Forum, Vol. 861, pp. 133-138(2016).

감사의 글

본 논문은 2015년도 청주대학교 연구장학 지원을 받아 수행된 연구임.

저 자 소 개



주 재 홍 (Jae-Hong Joo)

1989년 7월 31일생. 2015년 청주대학교 반도체공학과 졸업(학사). 2015년 3월~현재: 청주대학교 에너지융합학과(석사).

Tel : 043-229-8465

E-mail : jjh7031@naver.com

정 순 원 (Soon-Won Jung)
1976년 2월 29일생. 1998년 2월 영동대학교 정보·전자공학부(학사). 2004년 2월 청주대학교 전자공학과(박사). 2006년~2007년 영동대학교 컴퓨터공학과 전임강사. 2007년~2016년 한국전자통신연구원 책임연구원. 2016년~2017년 청주대학교 산학협력단 책임연구원. 2016년~현재 : 대한전기학회 전기설비부문회 학술이사
Tel : 042-671-8111
E-mail : swjung0582@gmail.com

김 광 호(Kwang-Ho Kim)
1958년 12월 21일생. 1983년 한양대학교 전자공학과(학사). 1987년 동경공업대학교 전자공학과(석사). 1990년 동경공업대학교 전자공학과(박사). 2001년~2002년 Yale Univ. Visiting fellow. 2013년~2014년 청주대학교 산학협력단장. 1990년~현재: 청주대학교 태양광에너지공학과 교수 및 태양광연구소장.
Tel : 043-229-8465
E-mail : khkim@cju.ac.kr