

결정질 실리콘 태양전지의 효율 향상을 위한 다층 전면 전극 형성

홍지화^{1,2}, 강민구², 김남수¹, 송희은^{2,a}

¹충북대학교 대학원 반도체공학과

²한국에너지기술연구원 태양에너지연구단

Multi-layer Front Electrode Formation to Improve the Conversion Efficiency in Crystalline Silicon Solar Cell

Ji-Hwa Hong^{1,2}, Min Gu Kang², Nam-Soo Kim¹, and Hee-eun Song^{2,a}

¹ Dept. of Semiconductor Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

² Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

(Received October 30, 2012; Revised November 24, 2012; Accepted November 24, 2012)

Abstract: Resistance of the front electrode is the highest proportion of the ingredients of the series resistance in crystalline silicon solar cell. While resistance of the front electrode is decreased with larger area, it induces the optical loss, causing the conversion efficiency drop. Therefore the front electrode with high aspect ratio increasing its height and decreasing is necessary for high-efficiency solar cell in considering shadowing loss and resistance of front electrode. In this paper, we used the screen printing method to form high aspect ratio electrode by multiple printing. Screen printing is the straightforward technology to establish the electrodes in silicon solar cell fabrication. The several printed front electrodes with Ag paste on silicon wafer showed the significantly increased height and slightly widen finger. As a result, the resistance of the front electrode was decreased with multiple printing even if it slightly increased the shadowing loss. We showed the improved electrical characteristics for c-Si solar cell with repeatedly printed front electrode by 0.5%. It lays a foundation for high efficiency solar cell with high aspect ratio electrode using screen printing.

Keywords: Crystalline silicon solar cell, Metallization, Multi-layer front electrode, Screen printing, Shadowing loss, Series resistance, Aspect ratio, Fill factor

1. 서 론

태양전지는 기본적으로 p-n접합 구조로 이루어져

있으며, 빛이 태양전지 내부로 잘 흡수되도록 하기 위한 반사방지막과 실리콘 내부에서 만들어진 전자-정공 쌍을 외부로 끌어내기 위한 전면 전극 및 후면 전극으로 구성된다.

고효율 태양전지를 만들기 위해서는 태양전지의 효율을 저하시키는 요인을 줄여야한다. 태양전지의 효율 손실은 크게 광학적 손실, 전자 정공의 재결합 손실, 저항 성분에 의한 손실로 나눌 수 있는데 광학적 손실을 야기하는 요인의 첫 번째는 태양광의 파장에 따라 실

a. Corresponding author; hsong@kier.re.kr

리콘 표면에서 일어나는 반사로 이를 방지하기 위한 방법으로는 표면 조직화와 반사 방지막 형성이 있다. 두 번째는 태양전지 내부로 들어온 빛을 100% 활용하지 못하는 데에서의 손실이며 마지막은 전면 전극으로 인한 그림자 손실이다. 일반적인 태양전지는 빛이 입사되는 전면에 전극을 형성하게 되는데, 전극이 형성된 부분에서는 빛을 흡수할 수 없기 때문에 그림자 손실이 발생하게 된다. 재결합 손실은 반도체 내부와 표면에서 일어날 수 있는데, 반도체 내부의 불순물과 결함(defect)에 의해 유발되거나 표면에서 결정구조의 깨짐으로 인한 불순물, 금속 전극과의 접촉, 표면의 도펀트 등에 의해 발생한다. 또한 태양전지의 저항 성분은 직렬 저항과 shunt 저항으로 나눌 수 있으며 각각의 손실들을 줄이는 연구가 다양하게 진행되고 있다 [1]. 태양전지의 직렬저항은 태양전지의 에미터와 베이스의 수직 저항 성분과 금속전극과 에미터, 베이스 사이의 접촉저항, 전면 및 후면 금속전극의 저항과 같은 세 가지 원인에 의해 발생된다. 큰 직렬저항에 의해 태양전지의 단락전류가 감소하기는 하지만 직렬저항에 의해 주된 영향을 받는 파라미터는 곡선인자 (fill factor, FF)이다 [2,3].

이러한 다양한 손실 요인 중에서도 태양전지의 전면 전극으로 인해 발생하는 손실로는 전극으로 인한 광학적 손실과 직렬저항으로 인한 손실이 있다. 일반적인 태양전지의 전극은 스크린 프린팅 방법으로 형성하는데, 전면은 은 (Ag), 후면은 알루미늄 (Al)를 이용한다. 본 논문에서는 스크린 프린팅 방법을 이용하여 전극을 반복하여 인쇄함으로써 전극의 높이를 보다 높게 형성하여 전극의 aspect ratio를 증가시키고 전극의 저항을 줄이기 위한 연구를 수행하므로써 반복 인쇄에 따른 인쇄 품질과 태양전지의 전기적 특성에 미치는 영향 대해 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 태양전지의 직렬 저항과 전면 전극의 aspect ratio에 대한 이론적 고찰

태양전지의 직렬저항은 태양전지의 에미터와 베이스의 수직 저항 성분과 금속 전극과 에미터, 베이스 사이의 접촉저항, 전면 및 후면 금속전극의 저항과 같은 세 가지 원인에 의해 발생된다 [2]. 직렬저항이 커짐에 따라 태양전지의 단락전류가 감소하기는 하지만, 주된 영

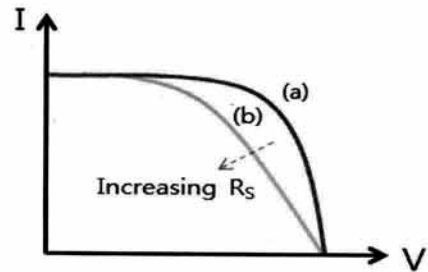
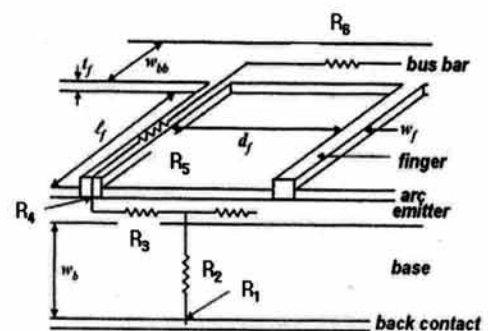


Fig. 1. Effect of series resistance in current-voltage curve for solar cell.



R_1 : Rear contact resistance, R_2 : Base resistance, R_3 : Sheet resistance, R_4 : Front contact resistance, R_5 : Grid finger resistance, R_6 : Busbar resistance.

Fig. 2. Series resistance in solar cell [4].

향을 받는 파라미터는 곡선인자이다. 즉 직렬저항은 태양전지의 개방전압에 큰 영향을 미치지 않지만, 개방전압 부근에서의 전류-전압 곡선은 직렬저항에 의해 크게 영향을 받는다 [3]. 그림 1에 나타냈듯이 직렬저항이 증가하면 전류-전압 곡선이 (a)에서 (b)로 이동하여 곡선인자가 감소하게 된다.

그림 2는 태양전지의 직렬저항 성분을 나타낸 것이다. 태양전지의 저항은 각 저항 성분의 합이며, 이 중 전면 전극에서의 저항이 가장 높은 비중을 차지한다 [4,5]. 전면 전극에 의한 직렬저항은 그림 2에서의 성분 R_5 이다. 전극 저항은 전극의 폭이 넓고 전극의 높이가 높을수록 줄어든다. 하지만 전극의 폭이 넓은 경우 그림자 손실이 커질 뿐만 아니라 스크린 프린팅을 이용하여 전극을 인쇄할 경우 높이가 높은 전극 형성이 쉽지 않다 [6,7]. 전면 전극 형성 시 전극 저항과 함께 고려해야 할 중요한 요소는 aspect ratio라 불리는 전극의 폭 대비 높이의 비다. 낮은 aspect

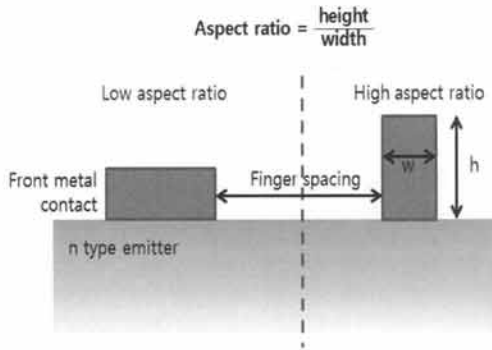


Fig. 3. The aspect ratio of the front electrode.

ratio와 높은 aspect ratio를 갖는 전극을 그림 3에 나타내었다. 형성된 전면 전극의 면적이 넓어질수록 태양전지 전면에서 빛을 받는 면적이 줄어들어 광학적 손실이 증가하게 된다. 따라서 전면 전극 형성 시에는 광학적 손실과 함께 전극저항을 고려하여 형성되는 전극의 폭은 감소시키고 높이를 증가시켜야 한다 [8].

2.2 실험 방법

그림 4는 태양전지 제작 순서와 실험 방법을 나타낸 것이다. 실험에서 사용된 웨이퍼는 두께 200±10 μm, 비저항 0.5-3 Ω·cm, 그리고 156×156 mm²의 면적을 가지고 있는 p-type의 단결정 실리콘 웨이퍼이다. 첫 번째 과정인 표면 조직화 공정에서는 단결정 실리콘 웨이퍼를 식각하기 위해 KOH와 IPA (isopropyl alcohol), DI water를 혼합하여 랜덤 피라미드 구조를 얻을 수 있었다. 기판 표면 조직화 이후 도핑 과정에서는 diffusion furnace에 POCl₃ 소스를 주입하여 50 Ω/sq의 면저항을 갖는 p-n접합을 형성하였고, PSG 제거를 위해 HF 처리를 거쳤다. 이후 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition)를 사용하여 SiN_x (질화실리콘) 반사방지막 (anti reflection coating)을 80 nm의 두께로 증착하였다. 후면 전극을 형성하기 위해 스크린 프린팅 방법으로 알루미늄 페이스트를 인쇄한 후, belt furnace를 이용하여 건조시켰다.

전면 전극을 형성하는 과정에서는 그림 5에 나타낸 그룹 별 조건에 따라 스크린 프린팅을 이용하여 전면 전극의 인쇄 횟수를 증가시켰다. 다층 전면 전극은 DEK 사의 더블 프린팅 장비로 fiducial mark를 인식하는 방식으로 finger 폭이 100 μm인 패턴을 인쇄와 건조

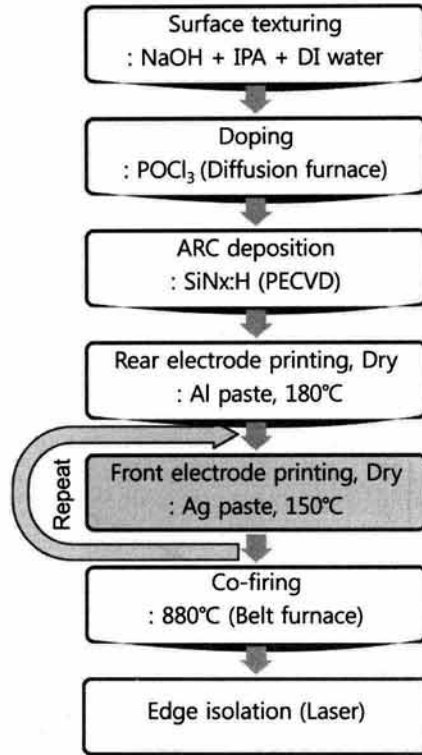


Fig. 4. Fabrication procedure of monocrystalline silicon solar cell.

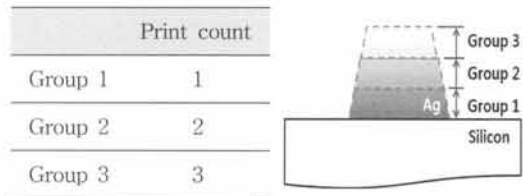


Fig. 5. Experimental conditions.

과정을 반복하여 형성하였다.

태양전지 제작 후 각 그룹의 태양전지에 대한 특성을 분석하였다. 먼저 인쇄된 전극의 무게를 알아보기 위해 인쇄 전 후의 웨이퍼 무게를 측정하였으며 인쇄된 전면 전극의 형상을 관찰하였다. 또한 PASAN사의 솔라 시뮬레이터를 이용하여 광 조사에 따른 태양전지의 변환효율 (η), 개방전압 (Voc), 단락전류 (Isc), 곡선인자 (FF) 등의 전기적 특성을 분석하였으며 Suns-Voc를 이용하여 직렬저항을 고려하지 않았을 때의 이상적인 곡선인자와 실험에서 얻은 곡선인자를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

스크린 프린팅을 이용하여 웨이퍼에 전면 전극을 반복하여 인쇄하였을 때 인쇄 횟수에 따른 전극의 무게를 측정하여 그림 6에 나타내었다. 전극의 반복 인쇄는 DEK 사의 더블 프린팅 장비로 finger 폭이 $100\ \mu\text{m}$ 인 패턴을 이용하였다. 측정 결과 첫 번째 인쇄 후 웨이퍼의 무게는 약 $0.20\ \text{g}$ 증가하였고, 그 후 두 번째와 세 번째, 네 번째 인쇄 후에는 약 $0.11\ \text{g}$ 씩 증가함을 보였다.

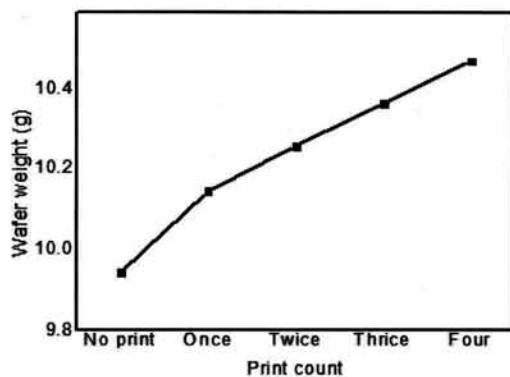


Fig. 6. Wafer weight with multiple screen-printed electrodes with Ag paste.

그림 7은 웨이퍼에 전면 전극을 반복 인쇄한 후 인쇄 횟수에 따른 인쇄 품질을 광학 현미경 (optical microscope)으로 측정한 결과이다. 인쇄 횟수가 1회에서 4회로 늘어날수록 인쇄된 전극의 finger 폭은 각각 $111\ \mu\text{m}$, $115\ \mu\text{m}$, $121\ \mu\text{m}$, $141\ \mu\text{m}$ 였으며, 이에 따른 전극의 shadowing loss는 6.7%, 7.1%, 7.4%, 8.2%로 나타났다. 인쇄가 반복될수록 전극의 폭과 shadowing loss가 증가하는 경향을 보이고, 4회 인쇄 시에는 이 값들이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 전극의 폭 증가와 이에 따른 shadowing loss의 증가는 광학적 손실로 인해 태양전지의 효율 저하를 야기할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 태양전지의 전면 전극을 형성하기 위한 인쇄 횟수를 1회에서 3회로 가변하여 연구를 진행하였다.

다음은 결정질 실리콘 태양전지에 스크린 프린팅을 이용하여 반복적으로 인쇄한 전면 전극의 aspect ratio를 관찰하기 위하여 3D - microscope로 전극 인쇄 형상을 측정하였다. 그림 8에 나타난 바와 같이 인쇄 횟

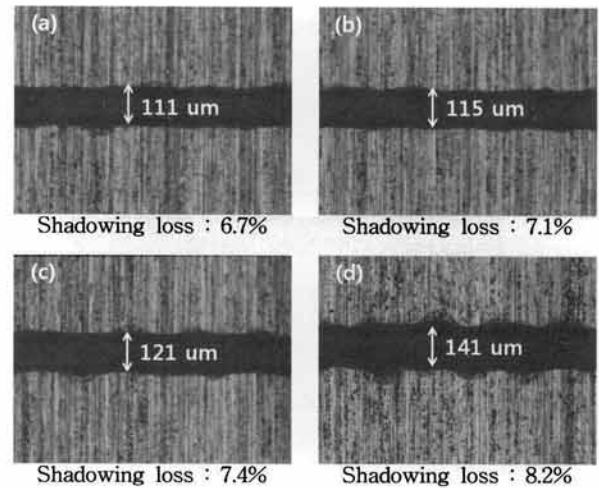


Fig. 7. Optical microscope image with multiple screen-printed front electrode (finger) and the shadowing loss for each condition. (a) once printed, (b) twice, (c) thrice, (d) four times.

수가 늘어날수록 형성되는 전극의 폭은 1회 인쇄 시보다 5% 이내에서 약간 넓어지지만 전극 중심에서의 높이는 $25\ \mu\text{m}$, $35\ \mu\text{m}$, $44\ \mu\text{m}$ 로 횟수가 증가할수록 26%, 40%씩 높아지는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 그림 6의 인쇄 횟수에 따른 전극의 무게 증가와 유사한 경향을 보였다.

이에 따라 인쇄 횟수가 늘어날수록 aspect ratio는 각각 0.21, 0.29, 0.37로 증가했다. 스크린 프린팅을 이용하여 전극을 형성할 경우 전극은 주로 직사각형이 아닌 활 모양으로 형성되지만 반복적인 인쇄를 통해 이상적인 전극의 형상인 직사각형 모양으로 전극을 형성할 수 있었다. 이런 높은 aspect ratio와 직사각형 형상을 갖는 전극은 전면 전극의 shadowing loss를 감소시키고 동시에 전극 저항을 줄일 수 있어 고효율 태양전지를 제작하는데 유용한 기술이라 할 수 있다 [7].

표 1은 그림 1~3의 조건에서 제작된 태양전지의 솔라 시뮬레이터 측정 결과로 태양전지의 전기적 특성인 개방전압 (V_{oc}), 단락전류 (I_{sc}), 곡선인자 (fill factor; FF), 광 변환 효율 (conversion efficiency) 그리고 직렬 저항 (R_s)을 나타내고 있다.

이 값들은 3개의 태양전지에 대한 평균값이다. 전반적으로 전면전극의 높이가 높아질수록 단락전류와 곡선인자가 증가하는 경향을 보였으며 이로 인해 광 변환 효율 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한

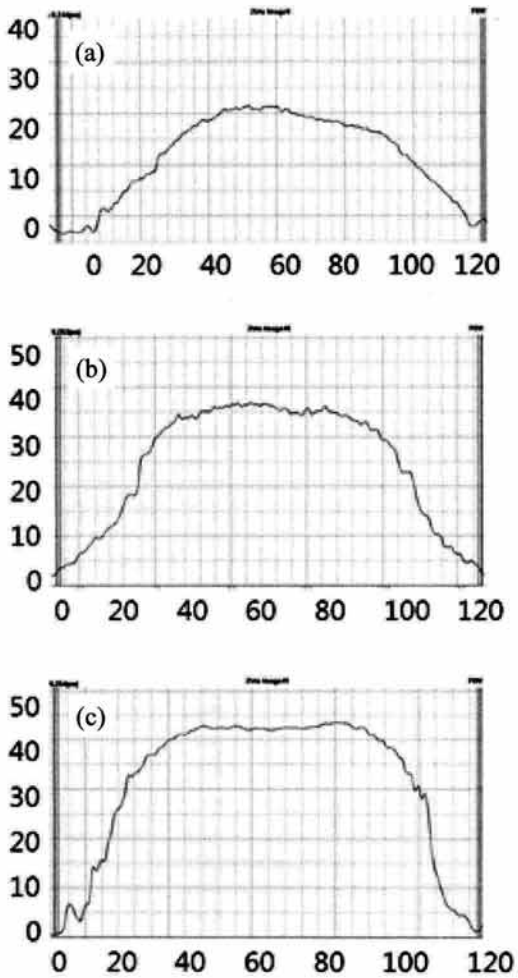


Fig 8. 3D-microscope measurement for multiple screen-printed electrodes; (a) Group 1 (once printed), (b) Group 2 (twice), (c) Group 3 (thrice).

직렬저항은 그룹 3이 0.005 Ω으로 그룹 1, 2에 비해 낮게 나타났다. 하지만 실험에 사용된 솔라 시뮬레이터 장치는 측정된 직렬저항 값에 대해서 하나의 유효숫자만을 나타내기 때문에 전극의 다층 인쇄에 따른 직렬저항의 차이를 알아보기 위해서 태양전지의 전류-전압 곡선의 기울기를 이용하였다. 직렬저항은 태양전지의 전류-전압 곡선의 개방전압 점에서 기울기의 역수를 이용하여 구할 수 있는데 측정 결과 1회 인쇄 시 $5.74 \times 10^{-3} \Omega$, 2회 인쇄 시 $5.26 \times 10^{-3} \Omega$, 3회 인쇄 시 $4.99 \times 10^{-3} \Omega$ 으로 인쇄 횟수가 증가할수록 직렬저항은 감소함을 보였다. 전면전극의 저항이 직렬저항에 가장 높은 비중을 차지하므로 그룹 3의 가장 높은 전면 전극

Table 1. The electrical characteristics of silicon solar cells with multiple layer front electrodes*.

	Voc (V)	Isc (A)	FF (%)	Eff (%)	Rs (Ω)
Group 1 (once)	0.628	8.539	79.5	17.7	0.006
Group 2 (twice)	0.629	8.638	80.1	18.1	0.006
Group 3 (thrice)	0.629	8.647	80.5	18.2	0.005

*All values are average of 3 solar cells.

Table 2. Suns-Voc measurement results for solar cells*.

	PFF (%) (Suns-Voc)	FF (%)	PFF-FF (%)
Group 1	82.9	79.6	3.30
Group 2	82.9	80.1	2.80
Group 3	82.7	80.5	2.20

*Values are from best solar cell in each condition.

으로 인해 전면전극의 저항이 감소하여 직렬저항에 영향을 미친 것으로 보인다. 또한 이로 인해 곡선인자와 단락전류도 증가하는 것을 볼 수 있었다.

표 2는 제작된 태양전지의 직렬저항을 고려하지 않았을 때의 이상적인 곡선인자를 알아보기 위하여 각 그룹별 최고 효율을 나타낸 태양전지의 Suns-Voc를 측정된 것이다. 측정 결과 인쇄 횟수가 증가할수록 태양전지의 곡선인자는 이상적인 곡선인자와 실제 실험에서 얻은 값 사이의 차이 (PFF-FF)가 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서 반복 인쇄를 통한 다층 전면전극은 이상적인 곡선인자와 가까운 값을 얻는데 기여한다.

그림 9는 그룹 3의 제작된 태양전지 중 18.2%의 최고효율을 나타낸 태양전지의 외부양자 효율을 측정된 결과이다. 이는 일반적인 결정질 실리콘 태양전지와 유사한 모양의 양자효율 그래프를 나타냈다.

본 논문에서는 결정질 실리콘 태양전지의 스크린 프린팅을 이용한 전면 전극의 다층 인쇄로 기존의 장치를 활용하여 매우 용이한 방법으로 태양전지의 변환 효율을 상승시킬 수 있는 방법을 제안하는 연구를 수행하였다. 하지만 현재의 방식으로 전극의 인쇄 횟수를 지나치게 증가시킬 경우 인쇄된 전극의 퍼짐으로 인한 shadowing loss로 인해 오히려 태양전지 효율을 저하시킬 수 있다. 뿐만 아니라 많은 양의 페이스트로 인해 소성 공정에서 더 높은 열처리 조건이 필요하기 때문

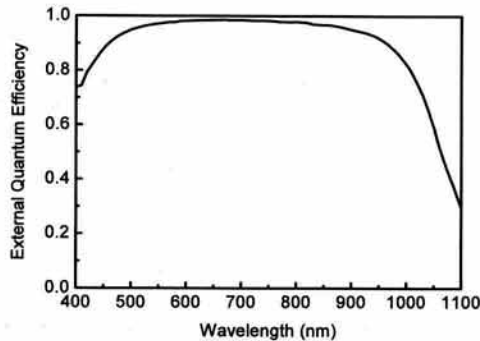


Fig. 9. External quantum efficiency for crystalline silicon solar cell.

에 전후면 동시 소성 시 후면 전극에 손상을 입힐 수 있다. 또한 은의 사용량이 증가하여 태양전지 제조 단가가 높아질 것이다. 따라서 반복 인쇄될 전극의 선폴을 줄이면서 인쇄 횟수와 열처리 온도의 최적화가 이루어진다면 태양전지의 효율 상승에 기여할 수 있을 것으로 보인다. 또한 일반적인 은 페이스트에 함유되어 있는 glass frit 성분은 실리콘 질화막을 뚫고 실리콘 기판과 전극 간의 접합성을 우수하게 하는 특징을 가지고 있지만, 이 성분은 전극의 저항을 상승시킨다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 실험과 같은 다층 인쇄 기술에서 두 번째 혹은 세 번째 인쇄 시 페이스트의 glass frit 성분을 없애거나 줄인다면 본 실험의 결과보다 전극의 저항을 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다. 그리고 현재 개발되고 있는 저가형 페이스트를 적용한다면 다층 인쇄 기술은 태양전지의 원가 상승에 대한 우려 없이 고효율의 태양전지를 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 결정질 실리콘 태양전지에서 전면 전

극의 aspect ratio를 높이고 전극에 의한 전극 저항을 줄이기 위해 스크린 프린팅을 이용하여 전극을 반복적으로 인쇄하여 다층 전면전극을 형성하였다.

인쇄 횟수가 증가할수록 인쇄된 전극의 폭은 큰 변화 없이 전극의 높이가 높아져 aspect ratio가 증가함을 확인할 수 있었다. 제작한 태양전지의 직렬저항은 3회 인쇄한 그룹 3이 0.005 Ω 으로 가장 낮았으며 전면전극의 높이가 높아질수록 개방전압, 단락전류, 곡선인자가 증가하고 이로 인해 광 변환 효율 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 다층 전극 형성 시 공정 최적화와 현재 개발되고 있는 저가형 페이스트를 적용한다면 저가형 고효율 태양전지를 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] S. Wenham and M. Green, *ARC Photovoltaics Centre of Excellence University of New South Wales*, 2009 Annual Report, p. 76 (2009).
- [2] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells* (World Scientific, Singapore, 2003) p. 13-14.
- [3] M. M. Hilali, A. Rohatgi, and S. Asher, *IEEE Trans. Elec. Dev.*, 46, 1948 (1999).
- [4] J. H. Lee, *Ph.M. Thesis*, p. 29, The University of Incheon, Incheon (2006).
- [5] D. L. Meier, E. A. Good, R. A. Garcia, B. L. Bingham, S. Yamanaka, V. Chandrasekaran, and C. Bucher, *IEEE Photovolt. Energy Conversion* (Hawaii, 2006) p. 1315-1318.
- [6] V. A. Chaudhari, *Energy Systems Eng. Indian Institute of Technology Bombay*, 05417001, 3 (2006).
- [7] M. A. Green, *Solar Cells - Operating Principles, Technology, and System Applications* (Prentice-Hall, Australia, 1992) p. 96-98.
- [8] H. B. Serreze, *IEEE Photovolt. Spec.* (Washington, USA, 1978) p. 1-8.