

광유도도금을 이용한 스크린 프린팅 결정질 실리콘 태양전지의 효율 향상

정명상^{1,2}, 강민구², 장효식^{1,a}, 송희은^{2,a}

¹ 충남대학교 녹색에너지기술전문대학원

² 한국에너지기술연구원 태양에너지연구단

Efficiency Improvement in Screen-printed Crystalline Silicon Solar Cell with Light Induced Plating

Myeong Sang Jeong^{1,2}, Min Gu Kang², Hyo Sik Chang^{1,a}, and Hee-eun Song^{2,a}

¹ Graduate School of Green Energy Technology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

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

(Received January 17, 2013; Revised February 1, 2013; Accepted February 5, 2013)

Abstract: Screen printing is commonly used to form the front/back electrodes in silicon solar cell. But it has caused high resistance and low aspect ratio, resulting in decreased conversion efficiency in solar cell. Recently the plating method has been combined with screen-printed c-Si solar cell to reduce the resistance and improve the aspect ratio. In this paper, we investigated the effect of light induced silver plating with screen-printed c-Si solar cells and compared their electrical properties. All wafers were textured, doped, and coated with anti-reflection layer. The metallization process was carried out with screen-printing, followed by co-fired. Then we performed light induced Ag plating by changing the plating time in the range of 20 sec~5min with/without external light. For comparison, we measured the light I-V characteristics and electrode width by optical microscope. During plating, silver ions fill the porous structure established in rapid silver particle sintering during co-firing step, which results in resistance decrease and efficiency improvement. The plating rate was increased in presence of light lamp, resulting in widening the electrode with and reducing the short-circuit current by shadowing loss. With the optimized plating condition, the conversion efficiency of solar cells was increased by 0.4% due to decreased series resistance. Finally we obtained the short-circuit current of 8.66 A, open-circuit voltage of 0.632 V, fill factor of 78.2%, and efficiency of 17.8% on a silicon solar cell.

Keywords: Crystalline silicon solar cell, Screen printing, Light induced plating

1. 서론

a. Corresponding authors: hschang@cnu.ac.kr, hsong@kier.re.kr

Copyright ©2013 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.

현재 결정질 실리콘 태양전지 산업에서는 용이한 공정과 빠른 속도로 전극을 형성할 수 있는 스크린 프린팅 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 스크린 프린팅 방식으로 제작된 태양전지의 효율을 향상시키기 위해서는 크게 전기적 손실과 광학적 손실을 줄이는 방법이

있다 [1,2]. 스크린 프린팅에 사용되는 금속 페이스트는 소성을 거쳐 기판과 저항성 접촉 (ohmic contact)을 형성한다. 이 과정에서 페이스트의 성분들이 burn-out된 후, 재결정 과정에서 다공성 (porous) 구조가 생성되고 이는 전기적 손실을 발생시키는 원인이 된다 [3-5]. 이런 구조와 전극의 낮은 종횡비 (aspect ratio)는 전극의 저항을 높이는 요인으로 작용하여 태양전지의 효율을 저하시키는 원인이 된다.

이러한 전기적 손실을 줄이기 위하여 도금을 이용한 전극 형성 방법이 있다 [4,6]. 빛을 이용한 도금인 LIP (light-induced plating) 방법은 수용액 내 이온들의 산화·환원 반응을 이용한 방법으로 태양전지에 빛이 조사되면 태양전지 내부에서 전자·정공 쌍이 형성되고, 형성된 전자·정공 쌍은 내부 전계에 의해 전자와 홀이 분리되어 각각 전면과 후면으로 이동하게 된다. 이때 전면 전극 쪽으로 이동한 전자가 도금액 내의 Ag^+ 이온과 반응되면서 전극 내부 및 표면에 Ag가 증착되는 방법이다.

태양전지의 전면 전극 열처리 후 LIP 공정 추가는 소성 후 전극의 빈 공간을 채워줌으로써 실리콘과 전극 사이에 접촉 특성을 향상시키고 순수한 금속 이온으로 인해 전극의 저항을 개선할 수 있다 [7,8]. 또한 이에 따른 단락전류 (short circuit current, I_{sc}) 및 곡선인자 (fill factor, FF)의 증가로 인한 태양전지의 효율 향상을 기대할 수 있다.

본 논문에서는 스크린 프린팅으로 전극을 형성한 결정질 실리콘 태양전지에 LIP 방법을 추가한 연구를 진행하였으며 도금 시간과 조사된 빛의 세기가 태양전지의 전기적 특성에 미치는 영향에 대해서 분석하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 비저항 $0.5 \sim 3.0 \Omega \cdot \text{cm}$, 두께 $200 \mu\text{m}$, 6" 크기의 단결정 Cz 웨이퍼를 사용하였으며, 결정질 실리콘 태양전지의 공정 순서는 그림 1과 같다. 우선 빛의 흡수를 늘리기 위해 웨이퍼 표면조직화 (surface texturing)를 실행하였다. KOH, IPA (isopropyl alcohol), DI water를 혼합한 용액으로 웨이퍼 표면을 식각 (etching)시켜 피라미드 구조를 형성하였다. 표면 조직화 이후 p-n 접합을 형성하기 위해 POCl_3 용액을 고온에서 확산시켜 $60 \Omega/\text{sq}$ 의 저항을 갖는 에미터 (emitter)층을 형성한 후, 10% HF 용액을 이용하여 확산 공정 중에 생긴 PSG (phosphorus silicate glass)를

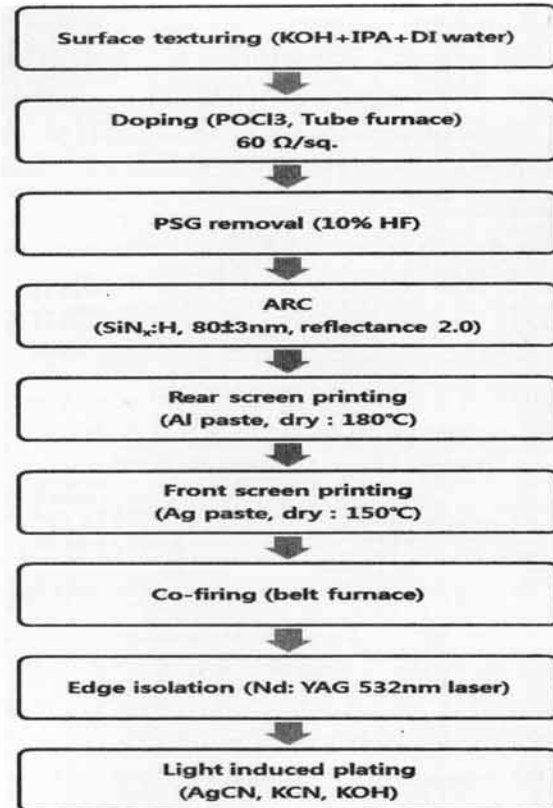


Fig. 1. Fabrication process for crystalline silicon solar cell.

Table 1. Experimental condition for light induced plating.

Condition	Time (min)	pH	Temp (°C)
Dark condition			
Fluorescent lamp condition	1 ~ 5	12.5	25
LED lamp condition	1 ~ 5 20 ~ 50 (sec)		

제거하였다. PSG는 확산 공정 동안 생긴 불순물을 포함하고 있기 때문에 태양전지의 특성 저하를 방지하기 위해 제거해야 한다.

이 후 빛의 반사를 최소화시키고 패시베이션 역할을 할 수 있는 반사방지막을 형성하기 위하여 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition)를 사용하였으며, SiH_4 과 NH_3 를 이용하여 실리콘질화막 (SiN_x , 굴절률 2.0 @ 630 nm, 두께 $80 \pm 3 \text{ nm}$)을 증착하였다.

전극을 형성하는 과정에서는 스크린 프린팅 방식을 이용하였으며, 후면에는 Al 페이스트, 전면에는 Ag 페이스트를 사용해 전극을 인쇄하였다. 전극 인쇄 후 후면 전극과 전면 전극은 벨트 소성로 (belt furnace)를 사용하여 고온에서의 열처리를 통해 저항성 접촉을 형성하였다.

전극 형성 후 LIP를 진행하였으며, 공정조건은 표 1과 같다. 빛에 대한 영향을 알아보기 위하여 빛이 없는 암 상태일 경우와, 일반적으로 사용하는 형광등이 있는 클린룸에서의 LED 램프 조사 유무에 따른 전기적 특성을 비교하였다. 또한 도금 시간 가변을 통하여 도금 시간이 태양전지의 전기적 특성에 미치는 영향에 대하여 관찰하였다.

실험에 사용된 LIP 용액의 주성분으로는 AgCN을 사용하였고, 환원제로는 KCN을 사용하였으며, pH 조절을 위해 KOH를 첨가하였다 [9]. 도금 용액의 pH 및 온도는 일정하게 유지시켰으며, LIP가 스크린프린팅된 전극에 미치는 변화를 알아보기 위해 광학 현미경 (optical microscope, OM)으로 전극 폭의 변화를 관찰하였으며 솔라 시뮬레이터 (solar simulator)를 이용하여 태양전지의 light I-V 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

표 2는 태양전지 도금 전·후의 전기적 특성을 나타낸 것이다. 도금은 4분 동안 진행되었으며 암 상태에서의 I_{sc} 는 0.02 A, 저항과 밀접한 관련이 있는 FF는 0.4% 증가한 것을 확인하였다. 이러한 결과로 인해 효율이 0.2% 증가하였으며, 암 상태에서도 무전해 도금을 통해 태양전지의 전기적 특성을 향상시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 일반적인 형광등이 있는 클린룸에서 형광등 빛으로만 4분간 도금을 한 결과에서는 I_{sc} 가 암 상태에서의 증가량과 같이 0.02 A 증가 했지만, FF는 0.8% 증가한 것을 확인할 수 있었고, 효율 또한 0.3% 증가하였다. 효율이 증가되는 원인으로서는 고온의 소성과정 동안 미세하게 갈라진 전극의 틈 사이로 도금액 속에 있는 Ag^+ 이온들이 환원되면서 전극 내부의 다공성 공간을 채워줌으로써 저항이 감소되고 이로 인해 FF가 상승하여 효율이 증가되는 것이라 생각된다 [4].

두 실험을 통해 빛이 조사되었을 때 동일한 시간 동안 도금을 한 결과 더 많은 효율 상승을 나타냈으며, 이러한 이유는 빛으로 인해 태양전지 내부에 더 많은

Table 2. The electrical properties of c-Si solar cell before and after light induced Ag plating with different light conditions.

		I_{sc} (A)	FF (%)	Eff (%)
Dark condition	before	8.61	76.6	17.2
	after	8.63	77.0	17.4
Fluorescent lamp condition	before	8.58	77.8	17.4
	after	8.60	78.6	17.7
LED lamp condition	before	8.52	79.2	17.6
	after	8.46	79.0	17.4

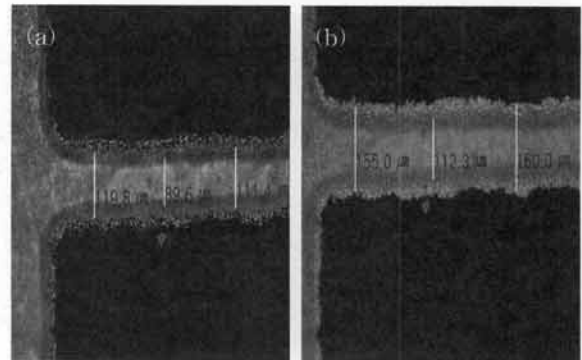


Fig. 2. Optical microscope image for Ag electrode width before (a) and after light induced Ag plating with LED lamp radiation (b).

전자·정공 쌍이 생성되어 Ag^+ 이온들과 반응되면서 효율이 증가하는 결과를 얻은 것이라 여겨진다.

반면에 4분 동안 LED 램프를 조사하면서 도금을 했을 때 태양전지 전기적 특성은 표 2에서 보듯이 단락전류의 하락과 함께 효율이 감소하였다. 더 큰 세기의 빛을 같은 시간 조사해 줌으로써 도금액 내의 Ag^+ 이온의 환원되는 양이 증가하였고, 더 많은 금속이 전극 표면에 증착되었다. 이로 인해 넓어진 전극은 그림자 손실을 유발하여 단락전류와 효율이 감소되었다 [4,5].

그림 2는 결정질 실리콘 태양전지의 LIP전과 4분 동안 LED 램프의 빛을 조사하면서 도금을 수행하였을 때의 태양전지 전극 폭의 변화를 광학적 현미경으로 관찰한 것이다.

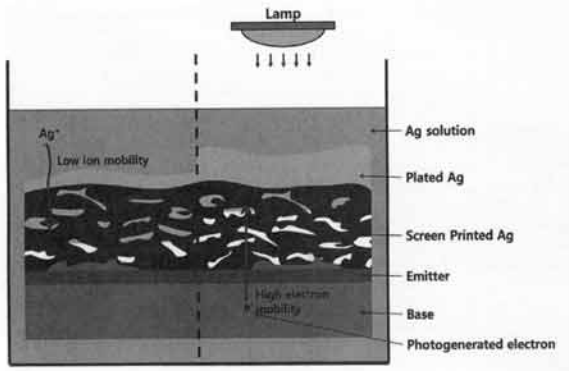


Fig. 3. Schematic drawing of the silver plating for screen-printed silicon solar cell with(top right)/without (top left) external light lamp.

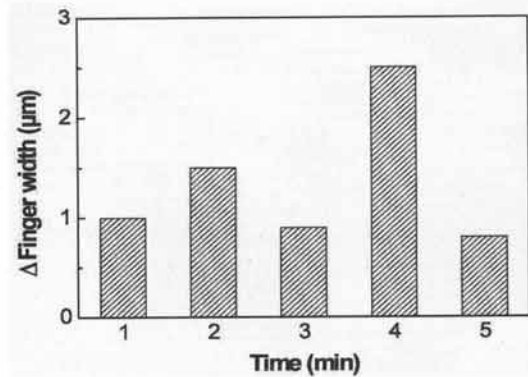


Fig. 5. The finger width difference with change of plating time under LED lamp OFF condition.

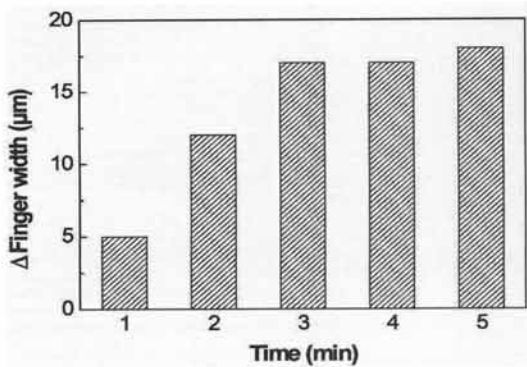


Fig. 4. The finger width difference with change of plating time under LED lamp ON condition.

LED 램프의 빛을 조사하고 도금을 했을 경우 빛을 조사하지 않았을 때보다 도금의 속도가 빠르며, 도금의 균일도가 낮아지게 된다 [10]. 도금은 전자의 생성에 비례하여 도금 반응이 촉진되는데 LED 램프의 빛을 조사하는 경우에는 생성되는 전자의 양이 암상태보다 급격하게 증가하여 Ag^+ 이온이 전극의 내부보다는 표면에서 전자와 반응할 확률이 증가하는 것으로 여겨진다. 이는 그림 3에서 보듯이 빛의 조사 여부에 따라 태양전지에서 생성되는 전자의 양이 달라지게 되고, 일정 시간에 생성되는 전자의 양이 과다한 경우에는 기판과 전극 사이의 계면에서의 반응보다 용액에 가까운 전극 표면 쪽에서의 반응이 활발하게 일어나 전극 표면 부분의 전극 폭이 넓어지게 된다. 전극의 폭이 넓어지면서 태양전지에서 전극으로 인한

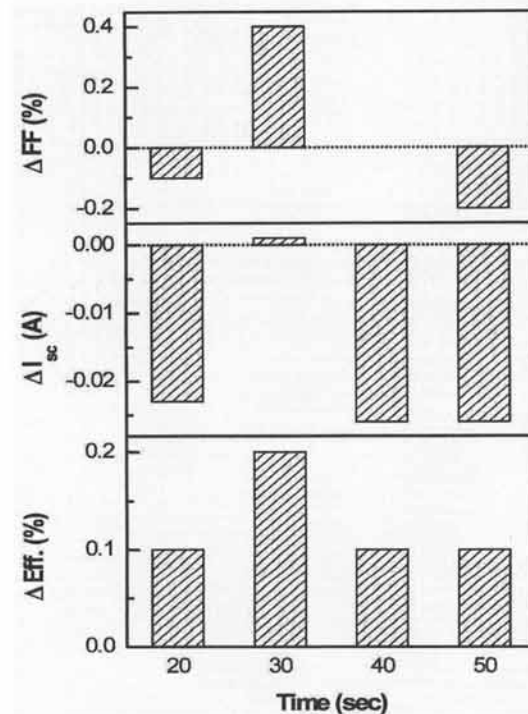


Fig. 6. The electrical values difference with change of plating time before and after light induced Ag plating under LED lamp ON.

그림자 손실이 약 6.56%에서 7.76%로 증가하게 되고, 이는 태양전지의 수광 면적을 감소시켜 단락전류를 8.52 A에서 8.46 A로의 감소시키는 주요인으로 작용하게 된다.

그림 4는 LED 램프를 이용하여 도금 시간에 따른 전극의 폭 넓이 변화량을 나타낸 것이다. 그림 2의

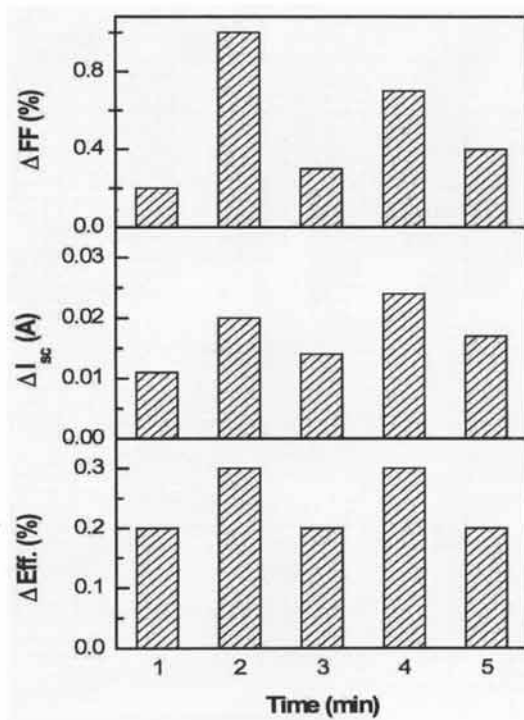


Fig. 7. The electrical values difference with change of plating time before and after light induced Ag plating under LED lamp OFF.

결과를 시간에 따라서 알아보기 위하여 1분에서 5분까지 도금 시간을 가변하여 실험한 결과 1분에서 3분까지 전극의 폭이 증가하였으나, 3분 이후부터는 많은 차이가 나타나지 않았다.

그림 5는 LED 램프를 이용하지 않고 일반적인 형광등이 있는 클린룸 조건에서만 이루어진 LIP 전·후의 태양전지 전극의 평균 폭 변화량을 나타냈다. LED 램프를 이용하였을 때 전극 폭의 증가량이 16 μm 정도였던 반면, 램프를 이용하지 않았을 때에는 변화량이 1~2 μm 이내로 변화가 크지 않은 것을 알 수 있었다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 일정 시간에 생성되는 전자의 양이 과다한 경우에 기판과 전극 사이의 계면에서의 반응보다 용액에 가까운 전극 표면 쪽에서의 반응이 활발하게 일어나 전극 표면 부분의 전극 폭이 넓어지게 된다. 따라서 그림 4와 같은 경우 LED 램프 조사 시에는 태양전지에서 생성되는 전자의 양이 많아 그림 5의 조건보다 전극의 폭이 넓어지게 된 것이다.

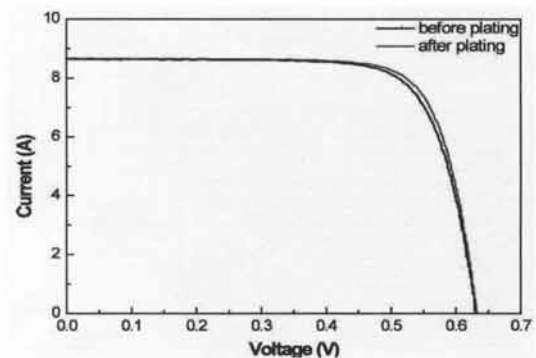


Fig. 8. Crystalline silicon solar cell current-voltage properties with light induced Ag plating.

그림 6은 LED 램프 조사 시 도금 속도의 영향을 고려하여 도금 시간을 1분 이하에서 가변했을 때 얻은 태양전지의 전기적 특성을 나타냈다. 20초 조건에서는 전극 내부와 표면에 도금으로 전극이 증착하기 시작하면서 효율이 0.1% 가량 상승하였고, 30초에서는 효율이 0.2% 상승하는 결과를 보였다. 40초와 50초 조건에서는 30초 동안 도금했을 때보다 효율이 오히려 감소하는 것을 확인하였다. 이는 도금이 진행되면서 30초 이후부터는 전극의 폭 증가로 인한 그림자 손실에 의해 단락 전류가 감소한 것으로 여겨진다. 도금이 진행되면서 전극 내부의 다공성 공간보다 전극 표면에 증착되는 Ag 양이 많아지면서 그림자 손실이 생기는 것이다. 결과적으로 빈 공간을 채워 얻는 전기적 특성의 이점과 그림자 손실로 인한 효율 감소의 상충 관계가 발생하게 되는 것이다.

그림 7은 LED 램프 없이 LIP한 결과를 나타내었다. LED 램프의 빛을 조사하지 않았을 경우 단락 전류가 모두 상승하는 것을 볼 수 있는데 이것은 앞서 설명한 것과 같이 빛을 조사하지 않았을 경우 도금속도가 천천히 진행됨으로써 LED 램프 조사 시 태양전지 전극 표면에서의 반응으로 인해 전극의 폭이 넓어지는 것과 달리 전극 내부의 빈 공간에서 Ag^+ 이온이 환원되어 전극의 다공성을 감소시켜 전극의 저항을 감소시키고 이로 인해 단락전류와 효율이 증가되는 것이라 여겨진다 [4].

이 후 LED 램프의 빛을 조사하지 않은 태양전지의 직렬저항 변화를 보기 위하여 TLM [10-12]패턴으로 접촉저항을 측정된 결과 14.1 Ωcm^2 에서 13.6 Ωcm^2 으로 직렬저항이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 결과

적으로 Ag가 전극 내부의 빈 공간을 감소시켜 주고 이로 인해 저항이 감소하고 FF가 증가함으로써 태양 전지의 효율까지 상승하는 효과를 얻을 수 있었다.

그림 8은 태양전지의 전기적 특성을 인공광원을 이용하여 측정한 그래프를 나타냈다. 결정질 실리콘 태양전지의 LIP 후 태양전지의 효율이 17.4%에서 17.8%로 0.4% 상승한 것을 확인할 수 있었다. 이 때 결정질 실리콘 태양전지의 전기적 특성 값 I_{sc} 는 8.64 A에서 8.66 A, FF는 76.7%에서 78.2%로 증가하였다.

4. 결론

본 실험은 기존의 스크린 프린팅 방법을 이용하여 태양전지의 전기적 특성을 보완하고 태양전지의 효율을 향상시키기 위해 LIP법으로 전극을 개선하는 실험을 하였다. 우선 빛이 도금에 주는 영향을 알아보기 위해 암 상태의 조건과 일반적인 형광등이 있는 클린룸에서 LED 램프의 빛을 조사시키지 않았을 때와 조사시켰을 때 도금을 진행하였다. 도금 후 시간에 따른 전극의 면적과 태양전지의 전기적 특성을 비교하였으며, TLM 패턴을 이용해 직렬저항의 크기를 측정하였다. LED 빛을 조사시켜주면 도금의 반응 속도가 빨라지기 때문에 전극 내부의 빈 공간 감소로 얻는 효율 증가보다 표면에 증착되는 Ag의 양이 많아지면서 얻는 그림자 손실에 의한 효율 감소가 커지면서 결과적으로 효율이 감소했다. 도금 시간이 길어질수록 그림자 손실로 인한 효율 감소는 커지며, LED 램프의 빛을 조사시키지 않을 때 보다 더 짧은 시간 동안 공정을 진행해야 효율 상승의 결과를 얻을 수 있었다.

LED 램프의 빛을 조사시키지 않았을 때는 전극 내부로 들어가는 Ag의 양이 많아 빈 공간을 감소시켜 단락전류의 상승과, 저항이 감소되면서 FF가 상승하는 결과를 얻을 수 있었고, 최종적으로 17.4%의 태양 전지를 도금을 이용하여 17.8%의 효율을 얻었다.

이번 실험을 통해 빛의 세기와 시간 등 도금 공정 조건에 따라 스크린 프린팅된 결정질 실리콘 태양전지의 효율이 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었으며, 차후 실험에서는 빛의 세기에 따른 반응속도의 차이 및 반응 속도에 따른 태양전지의 효율 및 전극 내부의 변화를 알아보려고 한다.

감사의 글

이 논문은 한국에너지기술연구원 (No.GP2012-0002) 과 지식경제부 한국에너지기술평가원의 신재생에너지 기술개발사업 (No. 20113020010090)의 재원으로 수행 되었음.

REFERENCES

- [1] Christiana Honsberg and Stuart Bowden, *PVCDROM*, <http://www.pveducation.org/pvc/drom>
- [2] J. H. Hong, M. G. Kang, N. S. Kim, and H. E. Song, *J. KIEEME*, 25, 1015 (2012).
- [3] K. K. Hong, S. B. Cho, J. Y. Huh, H. J. Park, and J. W. Jeong, *Met. Mater. Int.*, 15, No.2, 307-312 (2009).
- [4] A. Mette, *Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Freiburg im Breisgau*, 105 (2007).
- [5] D. Pysch, A. Mette, A. Filipovic, and S. W. Glunz, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 17, 101 (2009).
- [6] H. Gerischer, *Electrochimica Acta*, 35, 1677 (1990).
- [7] J. H. Lee, Y. H. Lee, J. Y. Ahn, and J. W. Jeong, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, 95, 22 (2011).
- [8] A. Ebong, Ian B. Cooper, Brian C. Rounsaville, A. Rohatgi, M. Dovrat, E. Kritchman, D. Brusilovsky, and A. Benichou, *IEEE. Electr. Dev. L.*32, 779 (2011).
- [9] W. S. Lee, *Thesis*, p. 31-32, Cheongju University, Cheongju (2010).
- [10] J. Bartsch, M. Kamp, M. Höteis S. W. Glunz A. Gombert, and H. Reinecke, *ECS, Elec. Soc. S.*158, H651 (2011).
- [11] D. K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization, 3rd ed.* (John Wiley & Sons, New Jersey, 2006) p. 146.
- [12] E. G. Woelk, H. Kräutle, and H. Beneking, *IEEE Trans. Elec. Dev.*, ED-33, 19 (1986).
- [13] L. K. Mak, C. M. Rogers, and D. C. Northrop, *J. Phys. E: Sci. Instr.*, 22, 317 (1989).