

결정질 실리콘 태양전지의 전극 종횡비 개선과 전극 간 간격이 효율에 미치는 영향 분석

김민영¹, 박주억², 조해성¹, 김대성³, 변성균³, 임동건^{1,3,a}

¹ 한국교통대학교 전자공학과

² (주)맥사이언스

³ 한국교통대학교 정보기술융합학과

The Analysis on the Effect of Improving Aspect Ratio and Electrode Spacing of the Crystalline Silicon Solar Cell

Min Young Kim¹, Ju-Eok Park², Hae Sung Cho¹, Dae Sung Kim³, Seong Kyun Byeon³, and Donggun Lim^{1,3,a}

¹ Department of Electronic Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea

² Engineering of Engineer, McScience Inc, Suwon 443-702, Korea

³ Department of IT Convergence, Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea

(Received January 22, 2014; Revised March 21, 2014; Accepted March 24, 2014)

Abstract: The screen printed technique is one of the electrode forming technologies for crystalline silicon solar cell. It has the advantage that can raise the production efficiency due to simple process. The electrode technology is the core process because the electrode feature is given a substantial factor (for solar cell efficiency). In this paper, we tried to change conditions such as squeegee angle 55~75°, snap off 0.5~1.75 mm, printing pressure 0.6~0.3 MPa and 1.6~2.0 mm finger spacing. As a result, the screen printing process showed an improved performance with an increased height higher finger height. Optimization of fabrication process has achieved 17.48% efficiency at screen mesh of 1.6 mm finger spacing.

Keywords: Solar cell, Screen printing, Co-firing, Paste, Mesh, Metalization

1. 서론

세계적으로 에너지 수요가 지속적으로 증가하면서

재생 가능한 에너지 활용이 크게 부각되고 있다. 신재생에너지 부분에서도 태양광에 관심이 가장 높는데 그 이유는 자원의 무한함과 깨끗한 환경, 유지보수 비용이 저렴하고 안전하기 때문이다 [1]. 대표적으로 제조단가가 낮고, 양산 속도가 빠른 태양전지가 있다. 태양전지에 전체적인 성능을 결정짓는 것은 전극 형성이며, 가장 널리 사용되고 있는 방법은 기존 방식에 비해 비교적 공정이 간단하며 단가가 저렴한 장점

a. Corresponding author; dglim@ut.ac.kr

Copyright ©2014 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.

이 있는 스크린 인쇄법이다 [2]. 스크린 인쇄법에 의해 형성된 태양전지의 금속전극은 표면에서의 빛의 반사 및 직렬저항 성분에 큰 영향을 주기 때문에 전극의 설계 시 선폭 및 전극의 간격 등 다양한 변수를 고려해야 한다. 전면 그리드를 설계할 때에는 전극의 선폭을 줄여 태양광을 받는 면적을 넓게 하는 방법과 전면전극 그리드 사이의 간격을 줄여 캐리어가 받는 저항을 줄여주는 방법이 있다. 그러나 전극 그리드 간격을 줄일 경우 상대적으로 광의 유효입사 면적이 감소하기 때문에 이를 고려하여 전극을 설계해야 고효율 태양전지를 제작할 수 있다 [2]. P형 실리콘 태양전지의 경우 스크린 프린팅 공정에서 후면전극에는 Al 페이스트를 이용하고 전면은 Ag 페이스트를 이용해 전극을 형성한다. 태양전지의 후면 전극으로 Al 페이스트를 사용하는 이유는 고농도 불순물 doping 효과로 인해 실리콘과의 접촉저항을 줄이는 후면 전계 (back surface filed, BSF)를 형성하기 때문이다. 후면전계는 p형 웨이퍼 후면에 P+층을 형성하는 것을 말하며, P+층으로 도핑된 농도에 의해 내부 전위차가 생기고 후면 쪽으로 캐리어의 이동이 어려워져 재결합을 막아주게 되므로 개방전압이 상승하게 된다 [3]. 반대로 전면전극 형성에 사용되는 Ag 페이스트는 석영질 성분 (glass frit)의 함유로 인해 온도에 민감하여 열처리 과정에서 반사방지막층을 에칭하고 재결정화 된다. 재결정화된 Ag는 에미터 층과 음성 접촉을 하게 되며 분리된 캐리어를 수집하는 역할을 하게 된다 [4,5].

본 연구에서는 스크린 인쇄 조건에 따라 전극의 종횡비를 개선하여 광의 유효 입사 면적을 증가시킴으로써 변환효율을 향상시키고 전극의 그리드 간격에 따른 효율 변화를 분석하는데 그 목적이 있다.

2. 실험 방법

2.1 결정질 실리콘 태양전지 제작 방법

본 연구에서는 $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ 크기의 Si 기판 (P-type $1.57\text{--}2.48 \Omega \cdot \text{cm}$)을 사용하였다. 기판의 불순물 제거를 위한 세정 공정은 아세톤, 메틸알콜, 초순수의 순서로 10분씩 초음파 세척기로 세정을 하였고, HCl 10% 용액으로 금속 불순물 제거와 HF 10% 용액으로 자연 산화막을 제거한 후 초순수로 충분히 헹군 다음 질소로 완전히 건조시켰다. 그 후 표면절삭결합

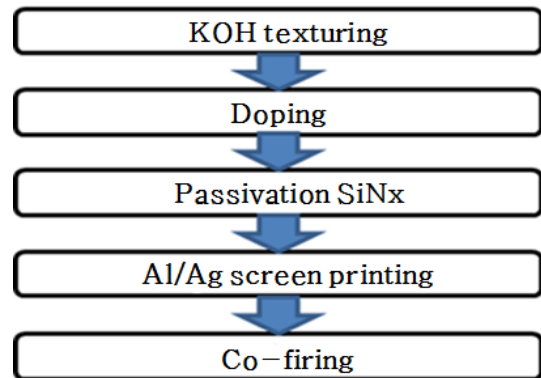


Fig. 1. Solar cell fabrication processes.

을 80°C 로 중탕한 이중 구조의 챔버에서 KOH 2 wt%, IPA 7.5 vol.% 용액을 희석하여 30분 간 표면 조직화 공정을 진행하였다. 에미터의 형성은 소결로에서 POCl_3 용액을 이용하여 확산 공정을 진행하였다. 도핑 시 불순물의 농도가 너무 높으면 광 생성된 캐리어의 수명이 짧아지고 불순물의 농도가 너무 낮으면 광 생성된 캐리어의 수명은 길어지지만 직렬저항이 높아져 캐리어의 수집에 안 좋은 영향을 미치게 된다. 따라서 면저항을 최적화하는 것이 중요한데 결정질 실리콘 태양전지 제작 시 면저항 $60 \Omega/\square$ 를 갖는 것이 가장 좋다. 본 연구에서는 도핑 공정 열처리 온도를 824°C , 도핑 공정시간을 56분으로 조절하여 면저항 $60 \Omega/\square$ 를 형성하였다. 도핑 공정 이후 질화규소 (silicon nitride) 박막을 PECVD 장비를 이용하여 실리콘 웨이퍼에 증착시켰다. SiH_4 , NH_3 , Ar 가스를 이용하여 RF 파워 300 W, 공정압력 380 mtorr, 300°C 에서 64초 간 실험을 진행하였다. 반사방지막 증착 이후 전극은 스크린 프린팅 방법을 이용하여 전·후면 전극을 형성한 후 급속 열처리 장비를 이용하여 전·후면 전극을 동시에 열처리하였다. 스크린 프린팅 공정 및 열처리 공정에 대해서는 다음 절에서 설명하도록 하겠다.

그림 1에 태양전지 셀 제작 공정도를 나타내었다.

2.2 스크린 프린팅 공정 방법

스크린 프린팅 공정은 패턴이 형성되어 있는 스크린 마스크 위에 페이스트를 스퀴지로 일정한 압력을 가하면서 이동시켜 스크린의 개구부를 통해 압출시켜 전극을 형성하는 공정이다. 전극 형성에 영향을 미치

는 주요 변수로는 페이스트의 점도, 스크린 메쉬, 스퀴지 각도, 인쇄 압력, 인쇄 속도, 제판과 기판과의 거리 등이 있다.

본 연구에서는 웨이퍼 표면과 전극의 표면장력의 일정한 비교 분석을 위해 표면 텍스처링이 적용되지 않은 기본 웨이퍼를 사용하였으며 각 인쇄 조건에 따라 전극의 형상 및 중량비를 최적화하는데 초점을 두었기 때문에 이후의 공정은 진행하지 않은 상태에서 전극을 형성하였다. 스퀴지의 각도는 각각 10° 단위씩 55°, 65°, 75°로 가변하여 실험하였으며 세 가지 각도 중 최적의 조건에서 제판과 기판의 간격을 0.5 mm ~ 1.75 mm까지 0.25 mm 단위로 가변하여 실험하였다. 그 후 스크린 프린팅 공정에서 전극 형상에 가장 중요한 영향을 미치는 변수인 인쇄 압력을 0.6 MPa ~ 0.3 MPa까지 0.1 MPa 단위로 가변하여 실험하였다. 전극형성 후에는 시간이 경과함에 따라 퍼짐현상이 발생하는 문제를 방지하기 위해 건조 공정을 거쳤으며, 이 공정은 퍼짐현상의 방지뿐만 아니라 페이스트 내의 용제를 제거하여 전극에 불순물을 최소화하기 위함이다. 만약 용제를 제대로 제거하지 않았을 경우 차후에 있을 열처리 공정에서 전극 내부에 기포를 형성해 전극과 기판 간의 저항 성분이 증가하게 된다. 전극 인쇄 후 건조 공정은 정온건조기에서 10 분 간 진행하였다.

본 연구에서는 스크린 프린팅 공정에서 각각의 인쇄 조건에 따라 전극 형상에 미치는 영향에 대하여 비교 분석하였으며 기판 표면에 페이스트가 적절하게 도포되도록 하여 중량비 및 인쇄 품질을 최적화하였다. 스크린 프린팅의 공정조건을 최적화한 후 전극 그리드의 간격을 1.6 mm ~ 2.0 mm 까지 0.2 mm 단위로 가변하여 실험하였으며 그리드 간격에 따라 효율의 편차를 비교 분석하였다. 실험에서 사용된 스크린의 제원은 다음 표 1과 같다.

Table 1. Screen mesh specification.

| Screen Mesh | | | |
|-------------|---------------|--------|--------|
| Spacing | 1.6 mm | 1.8 mm | 2.0 mm |
| Width | 70 μm | | |
| Mesh | 290 mesh | | |
| Thickness | 20 μm / 42 μm | | |
| Tension | X | Y | |
| | 1.06 | 1.04 | |

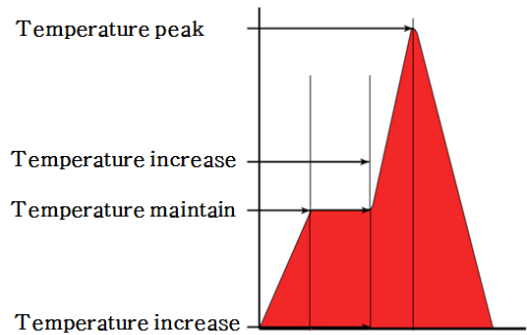


Fig. 2. RTP temperature profiles.

본 연구에서 사용한 RTP (rapid thermal processing)는 여러 단계의 열처리 구간을 삽입하여 적용이 가능하기 때문에 전극의 온도별 소성 단계를 잡아주는 번 아웃 공정을 삽입할 수 있고, 진공상태가 가능하다는 장점이 있다. 또한 기존 벨트 소결로에 비해 설비의 유지보수가 간단하며 공정 시간을 크게 단축할 수 있기 때문에 RTP 장비를 사용하여 열처리 공정을 진행하였다. 대기압 상태에서 실험이 진행되었다. 열처리 공정은 전면의 전극과 에미터층의 음성 접촉을 형성하는 중요한 과정이기 때문에 열처리 조건에 따라 태양전지 셀의 특성이 달라질 수 있는 요인이 된다. 과도한 온도에서는 Ag가 베이스층까지 파고들어 누설을 유발할 수 있고 낮은 온도에서는 에미터층과의 접촉이 불안정하여 저항 성분을 증가시킬 수 있다. RTP 공정온도는 430°C까지 초 당 10°C 상승 후 목표 온도에 도달하면 12초 동안 온도 유지 과정을 거쳐 최대 상승온도 710°C까지 초 당 30°C로 상승하도록 하였다. 기판에 가해지는 온도를 모든 샘플에 동일하게 적용하여 열처리 공정을 진행하였으며 전극의 형상과 그리드 간격의 최적화로 보다 높은 변환효율을 얻을 수 있었다. 그림 2에 RTP 공정 온도 변화 프로파일을 나타내었다.

텍스처링된 시료는 전계방사형 주사 현미경 (FE-SEM, JSM-6700)으로 표면 분석하였고, UV-Vis spectrophotometer (SINCO, AA-13.1, diffuse reflectance)으로 반사도를 측정하였다. 인으로 도핑된 에미터 층은 4-point probe 장비 (AIT, CMT-100MP)를 이용하여 면저항을 측정하였다. SiNx 박막은 Ellipsometer (Elli-SE-F)로 두께 및 굴절률을 측정하였다. 태양광 시뮬레이터 (Mscience, Lap-50)를 이용하여 셀의 광 변환 효율을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 스크린 프린팅 공정 변수에 따른 영향

3.1.1 스퀴지 각도에 따른 영향

페이스트는 스퀴지와 스크린 기판이 접촉하는 위치에서 스퀴지의 이동으로 유동하여 스퀴지 각의 면에서 수직 방향으로 힘을 받아 이 압력이 앞으로 전달된다. 압력을 받은 페이스트는 스크린 망사의 개구부를 통해 기판에 도달하며, 유제로 둘러싸였던 공간에서는 페이스트가 충전된다. 공간에 페이스트가 충전되면 그 후의 압력을 받았던 페이스트는 반작용으로 위쪽에 흐르고, 스퀴지 면을 타고 전방으로 회전한다. 이를 페이스트의 롤링이라 하는데 스퀴지의 각도가 높을 경우 페이스트에 가해지는 힘은 인쇄 방향으로 작용하게 되고 반대로 낮을 경우 힘은 스크린 방향으로 작용하게 된다 [5]. 제판과 기판 간격은 0.5 mm, 압력은 0.3 MPa로 고정하고 스퀴지의 각도는 55°, 65°, 75°로 10°씩 가변하여 실험하였다.

그림 3은 스퀴지 각도에 따라 형성된 전극을 광학 현미경으로 분석한 사진과 종횡비를 나타내는 그래프이다.

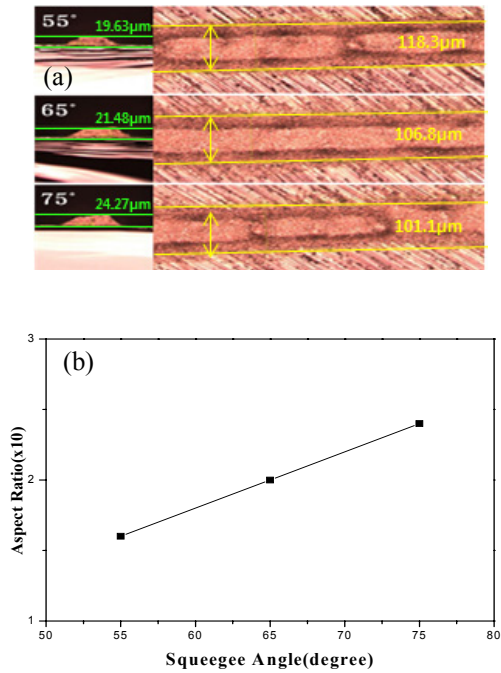


Fig. 3. Squeegee angle variation. (a) plane & cross section and (b) aspect ratio.

실험 결과, 그림 3과 같이 스퀴지 각도 55°에서 형성된 전극의 선폭은 118.25 μm , 높이 19.63 μm 를 보였으며, 65°에서는 선폭 106.77 μm , 높이 21.48 μm , 75°에서는 선폭 101.07 μm , 높이 24.27 μm 를 형성할 수 있었다. 55°의 낮은 각도에서는 페이스트에 가해지는 힘이 스크린 방향으로 높아짐으로 전극의 종횡비가 낮아지고 반대로 75°의 스퀴지 각도에서는 페이스트에 전달되는 힘이 인쇄 방향으로 증가하기 때문에 전극의 종횡비가 상승하였다. 하지만 페이스트가 스크린 방향으로 전달되는 힘이 낮아지기 때문에 인쇄품질이 저하되었으며 전자의 수집을 하는데 인쇄품질은 중요한 요소가 됨으로 종횡비와 인쇄품질을 고려할 때 65°의 스퀴지 각도에서 가장 최적임을 확인할 수 있었다.

3.1.2 제판과 기판의 간격에 따른 영향

스크린 프린팅에서 제판과 기판과의 거리는 스퀴지가 페이스트를 제판 개구부로 전이시킬 때 메쉬 장력에 작용하고 이에 따라 제판과 기판의 분리 속도에 영향을 주는 요소이기 때문에 간격을 최적화하여야 한다.

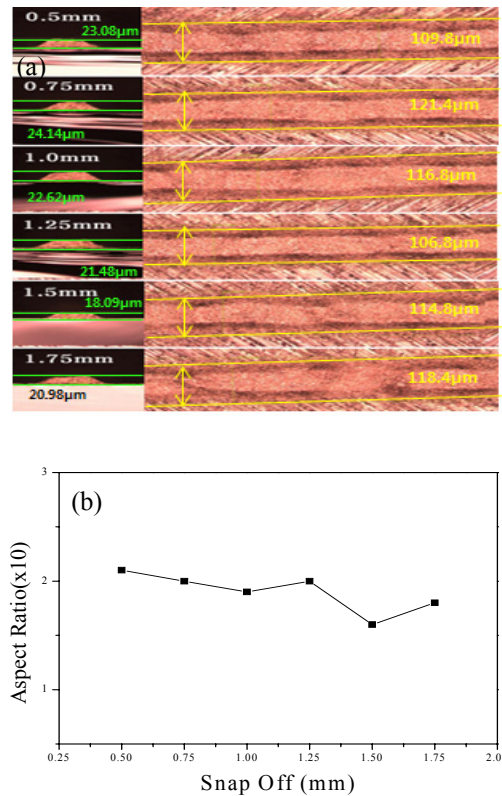


Fig. 4. Snap off variation (a) plane & cross section and (b) aspect ratio.

스퀴지 각도 변화 실험에 따라 스퀴지의 각도를 65°, 압력은 0.3 MPa로 고정하고 제판과 기관 간격에 따라 전극 형상에 미치는 영향을 분석하기 위하여 간격 0.5 mm에서 1.75 mm까지 0.25 mm 단위로 가변하여 실험하였다.

그림 4는 제판과 기관 간격에 따라 형성된 전극을 광학현미경으로 분석한 사진과 종횡비를 나타내는 그래프이다. 제판과 기관의 간격을 0.5 mm에서 1.75 mm까지 0.25 mm 단위로 가변하여 실험한 결과, 0.5 mm에서 1.75 mm의 공정 조건들 중 1.25 mm에서 전극의 높이는 높지 않았지만 선포이 약 107 μm 로 페이스트의 퍼짐이 가장 적었으며 인쇄품질과 전극의 퍼짐현상을 고려할 때 1.25 mm의 간격이 가장 최적의 조건임을 확인할 수 있었다.

3.1.3 스퀴지 인쇄 압력에 따른 영향

스크린 프린팅 공정에서 인쇄 압력은 전극 형성에 영향을 미치는 가장 중요한 변수이며 인쇄 압력에 따라 전극의 두께 및 품질이 좌우될 수 있다. 이에 따라 높은 압력에서 Ag 페이스트가 제판의 개구부로 토출될 때 전극의 품질은 우수하나 전극의 높이가 낮아지게 되므로 종횡비 개선은 어렵게 된다. 반대로 인쇄압력이 너무 낮을 경우 스퀴지에 의해 전달되는 힘이 약하기 때문에 페이스트가 제판의 개구부로 통과되기 어려워져 전극의 끊김 현상을 초래할 수 있다 [7]. 스퀴지 각도 변화 실험 결과에 따라 스퀴지 각도 65°와 제판과 기관의 간격 1.25 mm에서 고정하고 인쇄 압력을 0.6 MPa에서 0.3 MPa까지 0.1 MPa 단위로 가변하여 실험하였으며 인쇄 압력에 따라 종횡비의 변화를 비교 분석하고 최적화하였다. 다음 그림 5는 인쇄 압력에 따른 전극의 인쇄 품질을 광학현미경으로 분석한 사진이다.

인쇄 압력을 0.6 MPa ~ 0.3 MPa까지 0.1 MPa 단위로 변화하여 실험한 결과, 0.4 MPa ~ 0.6 MPa의 높은 압력에서는 전극의 높이가 낮아져 종횡비의 감소를 가져왔으며 이는 인쇄 과정에서 유제로 형성된 스크린 마스크 개구부로 페이스트가 토출되면서 압력에 의해 페이스트가 초기 점도를 유지하지 못하기 때문이다. 반대로 0.3 MPa의 낮은 인쇄 압력에서 전극의 형상은 높이가 29.7 μm 의 가장 우수한 비율의 종횡비의 인쇄 품질을 가진 전극을 형성할 수 있었다. 다음 그림 6은 최종적으로 최적화된 전극을 분석한 3D 이미지와 종횡비를 그래프화한 그림이다.

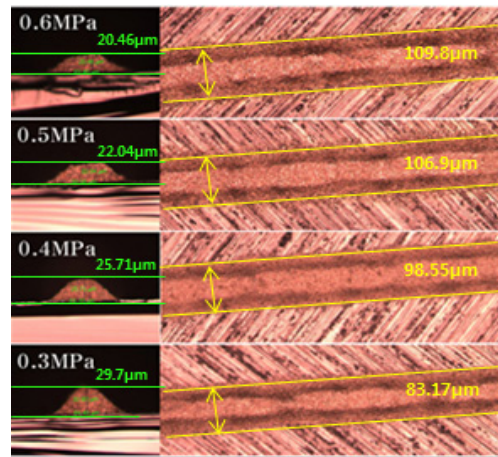


Fig. 5. Pressure variation plane & cross section.

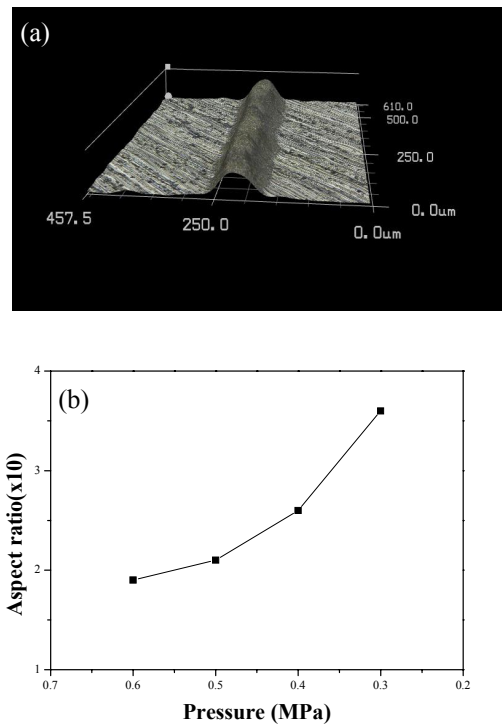


Fig. 6. Pressure variation. (a) 3D image and (b) aspect ratio.

3.2 표면 피라미드 크기에 따른 전극 퍼짐

스크린 프린팅 기법에 의한 전극 형성은 각각의 인쇄 조건에 따라 인쇄품질 및 종횡비에 영향을 주는

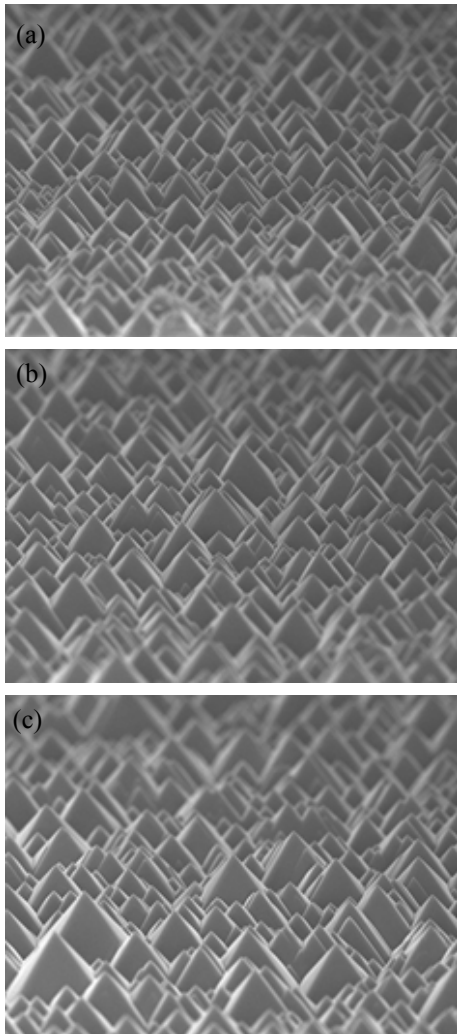


Fig. 7. Surface pyramid size (a) texturing 20 min, (b) texturing 30 min, and (c) texturing 40 min.

요소가 된다. 인쇄 조건 외에 또 다른 변수로는 전극이 형성되는 표면의 피라미드 구조 및 크기에 따라 전극의 퍼짐 정도가 다르게 형성된다. 표면 피라미드 크기에 따라 전극의 퍼짐 정도를 분석하기 위해 텍스처링 공정시간을 20분~40분까지 10분 단위로 진행하여 표면 피라미드의 크기를 각각 다르게 형성하였다. 이후 각각 다르게 형성된 표면 피라미드 구조 위에 스크린 프린터를 이용하여 전극을 형성하였다.

다음 그림 7은 텍스처링 공정시간별 표면 피라미드 크기를 나타내는 SEM 사진이며 그림 8은 형성된 피라미드 크기 변화에 따른 전극의 퍼짐 정도를 광학현미경으로 분석한 사진이다.

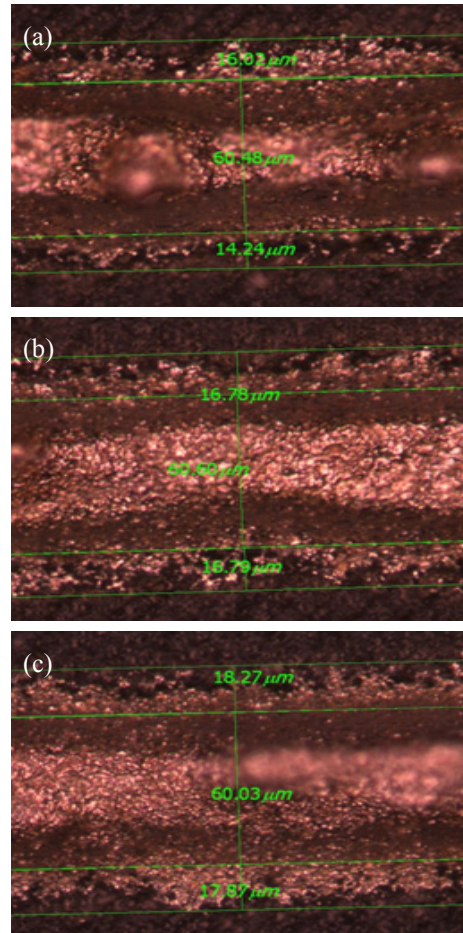


Fig. 8. Electrode spread (a) texturing 20 min, (b) texturing 30 min, and (c) texturing 40 min.

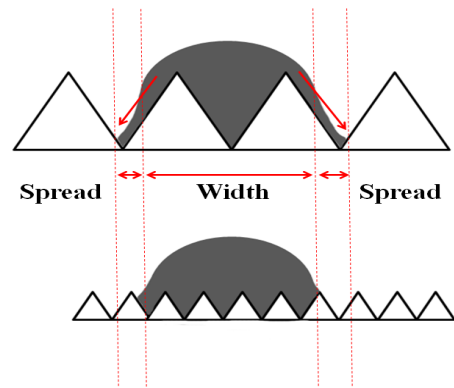


Fig. 9. The cause of spread.

그림 8에서와 같이 표면에 형성된 피라미드의 크기가 커질수록 전극의 선폭 및 퍼짐 정도가 증가하는

것을 확인할 수 있다. 이는 그림 9와 같이 표면 피라미드 크기가 증가함에 따라 기관에서의 표면장력에 영향을 주고 피라미드의 각도와 면을 따라 페이스트는 홈으로 흘러내려 메우기 때문이다. 하지만 피라미드가 너무 작을 경우 표면 반사도를 증가시키고 이후의 도핑 공정에서 균일한 도핑 깊이를 얻을 수 없으며 그에 따라 셀 특성에 영향을 미치는 인자가 됨으로 최적의 조건을 찾아야만 한다 [8].

3.3 스크린 메쉬 전극 간격에 따른 영향

스크린 프린팅에서 메쉬는 유제 두께, 전극 간격, 전극의 선폭 등에 따라서 전극의 형상 및 종횡비가 달라질 수 있으며, 그에 따른 직렬저항의 변화로 태양전지 효율에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 중요한 요소 중 하나이다. 위의 요소들 중 전극 간격은 넓을수록 빛의 유효입사 면적이 증가시킬 수 있지만 과도하게 넓어질 경우 전면전극에서 전자의 수집이 원활하지 않아 효율 하락의 원인이 되기 때문에 최적화가 필요하다 [9]. 실험에서 사용된 메쉬는 선폭 70 μm , 유제 두께 20 μm 로 고정하였으며 전극 간격만을 가변하여 실험하였다. 전극 간격을 1.6 mm ~ 2.0 mm까지 0.2 mm 단위로 각각 적용하여 전극을 형성하고 셀을 제작하였을 때 효율과의 상관관계를 해석하고 비교 분석하였다. 후면전극 형성 후 전면에 각각의 제판과 기관 간격을 가변하여 태양전지 셀을 제작한 결과, 아래의 표 2와 같은 태양전지 셀 특성을 얻을 수 있었다. 1.6 mm의 전극 간격에서 가장 높은 변환 효율인 개방전압 0.613 V, 전류밀도 37.10 mA/cm^2 , 충실도 76.77%, 변환효율 17.48%를 얻을 수 있었다. 전극 간격이 넓을수록 빛의 입사 면적을 증가시킬 수 있는 반면에 셀 면적에서 전극이 차지하는 공간이 줄어들어 shading loss 감소하지만 단락광 전류도 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Table 2. Solar cell characteristics with various electrode spacing.

| Spacing | Voc(V) | Jsc(mA/cm^2) | FF(%) | Eff(%) |
|---------|--------|--------------------------------|-------|--------|
| 1.6 mm | 0.613 | 37.10 | 76.77 | 17.48 |
| 1.8 mm | 0.608 | 36.62 | 77.91 | 17.36 |
| 2.0 mm | 0.609 | 36.96 | 76.67 | 17.28 |

4. 결론

본 연구에서는 스퀴지 각도와 제판과 기관의 간격, 인쇄 압력을 조절하여 웨이퍼 기관 표면에 형성되는 전면전극 형상에 미치는 영향을 분석하고 최적화하였으며, 전극 간격 변화에 따라 효율과의 상관관계를 해석하는데 그 목적이 있다. 스크린 프린팅에서 전극의 종횡비를 결정하는 여러 가지 요인들 중 가장 중요한 변수로는 인쇄 압력임을 확인할 수 있었다. 스퀴지각도와 제판과 기관 간격의 가변에서의 결과 값보다 압력변화 실험에서 전극의 형상 변화가 가장 눈에 띄게 나타났으며 끊김현상 없이 더욱 선명한 전극을 형성할 수 있었고, 최종적으로 세 가지 공정변수를 최적화하여 3.6 비율의 종횡비를 얻을 수 있었다. 스크린 프린팅 공정최적화로 형성된 전극을 적용하여 전극 간격을 1.6 mm ~ 2.0 mm까지 0.2 mm 단위로 각각 태양전지 셀을 제작하였을 때 표 2와 같이 1.6 mm의 전극 간격에서 17.48%의 가장 높은 효율을 얻을 수 있었다. 전극 간격이 증가함에 따라 빛의 입사 면적은 증가시킬 수 있는 반면, 전극 간격으로 인한 병렬저항의 증가로 개방전압 및 전류밀도의 하락을 가져왔다. 따라서 전극 간격을 늘려 유효입사 면적을 증가시키는 것도 중요하지만 전극 간격을 줄여 병렬저항을 감소시키는 것이 현재 셀 제작에 적용된 각각의 공정 조건에서 조금 더 유리하다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업의 지원을 받아 수행하였으며, 광역경제권 선도산업 육성사업의 지원을 받아 수행한 연구임.

REFERENCES

- [1] W. O. Filtvedt and M. Javidi, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **94**, 1980 (2010).
- [2] J. Szlufcik and F. Duerinckx, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **74**, 155 (2002).
- [3] M. M. Hilali, A. Rohatgi, and S. Asher, *IEEE Trans. Elec. Dev.*, **51**, 948 (2004).
- [4] M. Bahr, S. Kim, S. Sridharan, C. Khadilkar, A. Shaikh, and I. Kohler, *Proc. of the 22nd European*

- Photovoltaic Solar Energy Conference (2007)* p. 1015.
- [5] V. Shanmugam and J. Cunnusamy, *Energy Procedia*, **33**, 64 (2013).
- [6] V. Meemongkolkiat, M. Hilali, and A. Rohatgi, *Photovoltaic Energy Conversion, B*, 1293 (2003).
- [7] M. M. Hilali and A. Rohatgi, *Proc. 14th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules*, (Colorado, 2004). p. 109.
- [8] H. H. Kim and S. E. Park, *Current Appl. Phys.*, **13**, S34 (2013).
- [9] C. H. Lin, S. P. Hsu, W. C. Hsu, and L. A. Kosyachenko, *Ed* (Intech, 2011).
- [10] A. Ebong, D. S. Kim, A. Rohatgi, and W. Zhang, *Proc. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (San Diego, 2008) p. 1.