

## 고효율 단결정 Si 태양전지 제작을 위한 은 페이스트의 제조 및 열 공정 최적화

피지희<sup>1</sup>, 김성진<sup>2</sup>, 손창록<sup>2</sup>, 권순용<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 한국교통대학교 신소재공학과/친환경에너지 부품소재센터

<sup>2</sup> (주)유진코리아

### Manufacturing and Thermal Process Optimization of Ag-paste for Fabricating High Efficiency Mono-Si Solar Cell

Ji-Hee Pi<sup>1</sup>, Sung-Jin Kim<sup>2</sup>, Chang-Rok Son<sup>2</sup>, and Soon-Yong Kweon<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Materials Science & Engineering/ReSEM, Korea National University of Transportation,  
Chungju 380-702, Korea

<sup>2</sup> Eujene Korea Co., Ltd, Yongin 446-916, Korea

(Received January 7, 2013; Revised January 9, 2013; Accepted January 14, 2013)

**Abstract:** A New Ag-pastes were developed for integrating the high efficiency mono-Si solar cell. The pastes were the mixture of 84 wt% Ag, 2 wt% glass frit, 11 wt% solvent of buthyl cabilol acetate, and 3 wt% additives. After fabricating the Ag-pastes by using a 3-roll mill, they were coated on a SiN<sub>x</sub>/n+/p- stacks of a commercial mono-Si solar cell. And the post-thermal process was also optimized by varying the process conditions of peak temperature. The optimized solar cell efficiency on a 6-inch mono-Si wafer was 18.28%, which was the one of the world best performances. It meant that the newly developed Ag-paste could be adopted to fabricate a commercial bulk Si solar cell.

**Keywords:** Ag-paste, Glass frit, Mono-Si solar cell, Electrical properties, High efficiency

#### 1. 서 론

최근에는 환경 문제가 대두되면서 벌크 실리콘 (bulk Si), 박막 실리콘 (thin film Si), Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS), CdTe 등의 다양한 종류의 태양전지 기술이 연구 개발되고 있고, 개발 기술의 산업화도 급속도로 진행되고 있다. 그런데 현재 산업화가 진행되고 있는

태양전지 기술은 주로 벌크 (bulk) 실리콘 웨이퍼 (wafer)를 이용하는 기술이다 [1,2].

상용화된 벌크 실리콘 태양전지의 전극형성에 가장 널리 사용되고 있는 형성 기술은 스크린 프린팅 (screen printing) 법이다. 이 도포 기술은 비교적 단위공정 장비가 저가이며 다량의 제품을 대 면적으로 빠른 시간에 생산할 수 있는 등의 많은 장점을 갖고 있다 [3,4]. 따라서 벌크 실리콘 태양전지의 전면 전극은 은 (Ag) 페이스트 (paste)를 스크린 프린팅법으로 선택적으로 도포한 후에 후속 열 공정을 거쳐서 형성된다. 은 페이스트는 80 wt% 이상의 은 분말, 1~5 wt% 정도의 유리 분말 (glass frit), 소량의 용제

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

(solvent) 및 기타 첨가제 등으로 구성된다 [5,6]. 여기에서 은 페이스트에 포함된 유리 분말 성분은 녹는 점이 낮고, 실리콘 위에 증착된 반사 방지막을 에칭하는 특성이 있어서, 추가적인 마스크 (mask) 없이 전극을 형성하는데 매우 중요한 역할을 한다 [5,6]. 즉 은 페이스트 도포 후에 열처리 공정을 거치면서 유리 분말은 웨이퍼의 반사방지막과 에미터 층을 에칭하며, 그 아래로 Ag/Si 계면의 접촉 저항을 낮추어 양호한 전극구조를 형성한다. 그러나 유리 분말에 의하여 전극의 배선 저항 (series resistance)이 증가되는 단점을 갖고 있어, 결과적으로 태양전지의 전체적인 효율을 감소시키는 요인이 되기도 한다 [7,8].

이상에서 알 수 있듯이, 은 전극 형성에서 유리 분말 성분의 종류 및 양은 금속 페이스트 개발에 핵심 기술 중의 하나이다. 현재 상업화되어 있는 은 페이스트에 첨가되는 유리 분말의 조성은 주로 납 (Pb)을 함유하는 것을 사용하고 있고, 이러한 유연 페이스트는 주로 듀폰 (DuPont)과 페로 (Ferro) 사가 세계 시장의 거의 대부분을 점유하고 있다. 이들 회사에서는 납을 함유하는 유리 분말을 사용하여 페이스트의 혼합 조성 변화를 통한 지속적인 태양전지 효율 증가를 위하여 노력하고 있다 [9,10]. 또한 향후의 환경 규제에 대응하기 위하여 비납계에 대한 연구도 진행되고 있지만, 아직은 Pb 계 유리 분말을 적용한 경우에 비하여서는 다소 특성이 낮은 것이 현실이다 [11,12].

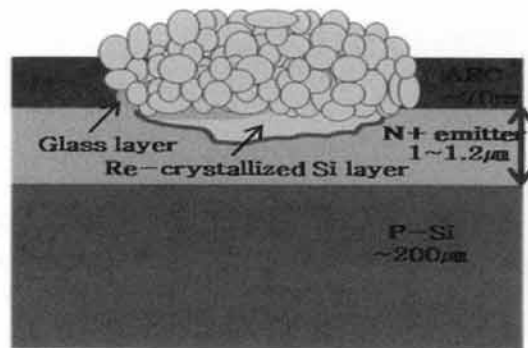
이러한 페이스트의 연구는 혼합 조성에 따라 태양전지 특성이 매우 민감하게 변하지만, 노-하우 (know-how)에 많은 부분을 의존하고 있어 재현이 불가능한 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 상업용 은 페이스트를 개발하고, 새로 개발된 은 페이스트를 위한 최적의 열 공정 조건을 확립하고자 하였다. 또한 이러한 열 공정을 적용하여 제작된 상업용 태양전지의 효율을 측정하여 상업용 페이스트로의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

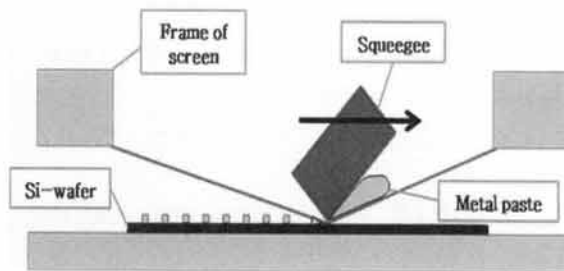
표 1은 본 연구에서 최적화된 전면 전극용 은 페이스트의 조성을 보여주고 있다. 은 분말의 순도는 99.9% 이상이고, 입자 크기는 직경 0.1~0.4 μm 정도의 것을 사용하였다. 유리 분말은 Pb 계 (PbO-SiO<sub>2</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 조성을 적용하였다. 여기에서 사용된 유리 분말은 상용 제품을 구입하여 사용하였다. 또 첨가제로 에틸 셀룰로오

**Table 1.** Chemical composition for manufacturing the silver paste.

Ingredient	Composition	Remarks
Ag powder	84 wt%	Purity >99.9%
Glass frit	2 wt%	Pb-based
Solvent	11 wt%	Buthyl cabitol acetate
Additive	3 wt%	Ethyl cellulose etc.



**Fig. 1.** Schematic diagram of the integrated Si solar cell structure.



**Fig. 2.** Schematic drawing for explaining the screen printing process.

스 (ethyl cellulose)를 사용하였고, 용제로는 부틸 케비톨 아세테이트 (buthyl cabitol acetate)를 사용했다.

은 분말 (84 wt%), 유리 분말 (2 wt%), 첨가제 (3 wt%) 및 용제 (11 wt%)를 주어진 비율로 칭량하여 혼합기로 무기물과 유기 결합제를 균일하게 혼합한 뒤, 3단 롤밀 (3 roll-mill)을 사용하여 입자들의 분산 특성을 극대화하여 은 페이스트를 제조하였다.

양산 라인에서 본 연구로 제작한 은 페이스트를 평가하기 전에 먼저 실험실에서 간이로 페이스트의 열처리 후의 특성들을 평가하였다. 이는 양산라인의 장비와 달라서 다소 실험적인 오차는 발생할 수 있지만,

양산 라인에서 반복적인 평가가 어려운 현실을 고려한 연구 방법이다. 그림 1에 본 연구에서 은 페이스트의 특성을 평가하기 위하여 사용한 S사에서 제작한 반제품 실리콘 웨이퍼의 개략도이다. 주요 공정을 기술하면, p-형 단결정 실리콘 웨이퍼 (직경 6인치, 두께 200  $\mu\text{m}$ )에 텍스처링 (texturing)과 인 확산 공정을 거쳐 두께 1  $\mu\text{m}$  정도의  $n^+$  에미터 층을 형성한 후, 반사방지막 (anti-reflection coating, ARC)으로 두께 70 nm의  $\text{SiN}_x$ 를 화학기상 증착법 (chemical vapor deposition, CVD)으로 증착하였다. 그 다음 앞 절의 설명과 같이 제작된 은 페이스트를 스크린 프린팅법 (그림 2)으로 도포하였다. 이때 전극 형상을 위해 사용한 테스트용 스크린 마스크에서, 가는 배선인 핑거 바 (finger bar)의 선폭은 100  $\mu\text{m}$ 이었고, 굵은 배선인 버스 바 (bus bar)의 선폭은 2 mm를 적용하였다. 스크린 프린팅법으로 도포된 은 페이스트는 200 $^{\circ}\text{C}$ 로 유지되는 전기 오븐에서 10분 간 건조시켜 용제를 제거하였다. 그 다음에는 은 페이스트의 적절한 열처리 온도를 대략적으로 확인하기 위해서 실험실에 설치된 급속 열처리 장치 (ULVAC, Japan)를 이용하여 사전 평가를 실시하였다. 이때의 승온 조건을 15  $^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 로 고정하고, 소결 (sintering) 온도를 500 $^{\circ}\text{C}$ ~900 $^{\circ}\text{C}$  사이에서 다양하게 변화시키면서 2분 간 열처리하였다. 여기에서 소결 온도는 장치에서의 설정 온도를 기준으로 하였다. 다양한 온도로 소결 공정을 진행한 후에 전극의 가는 부분인 핑거 바의 형상은 광학현미경 (optical microscope, OM)으로 관찰하였고, 소결 온도 변화에 따른 은 전극의 미세 구조 변화는 주사전자현미경 (SEM, FEI-Quanta 400)으로 관찰하였다. 전극의 직렬 저항을 평가하기 위하여 넓은 면적의 전극인 버스 바 (bus bar)에서 4-점 탐침법 (4-point probe)으로 면 저항을 측정하였다.

최종적으로 태양전지의 특성을 평가하고 은 전극의 열 공정을 최적화하기 위해서는 S사의 양산 라인에서 양산 공정을 적용하였다. 은 전극을 도포하기 전의 웨이퍼는 p-형 단결정 실리콘 웨이퍼 (직경 6인치, 두께 200  $\mu\text{m}$ )에 텍스처링 (texturing)과 인 확산 공정을 거쳐 두께 1  $\mu\text{m}$  정도의  $n^+$  에미터 층을 형성한 후, 반사방지막 (ARC)으로 두께 70 nm의  $\text{SiN}_x$ 를 화학기상 증착법으로 증착한 것이다. 그 위에 본 연구에서 개발한 은 페이스트를 프린터기 (Micro-Tec, Japan)에서 도포하고 드라이기 (Heller, USA)에서 건조한 다음, 벨트로 (Despatch, USA)에서 여러 온도 조건에서 최종 열처리를 진행하였다. 다른 공정들은 S사의 양산 공정을 그대로 적용하였다. 직경 6인치의 단결정에 제작된 태양전지(셀 면적: 156  $\text{cm}^2$ )의 효율 측정은 인공광원 (solar simulator, Xe arc lamp)을 사용하였다. 효율 측정 시의 광원 조건은 AM1.5 (100  $\text{mW}/\text{cm}^2$ )이고, 측정 온도는 상온 (25 $^{\circ}\text{C}$ )의 조건에서 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

은 페이스트 제조를 위하여 은 분말과 유리 분말을 혼합한 후의 입자 크기 분포를 확인하기 위하여 입도 크기 분석기 (particle size analyzer, PSA)를 이용하여 평가하였다.

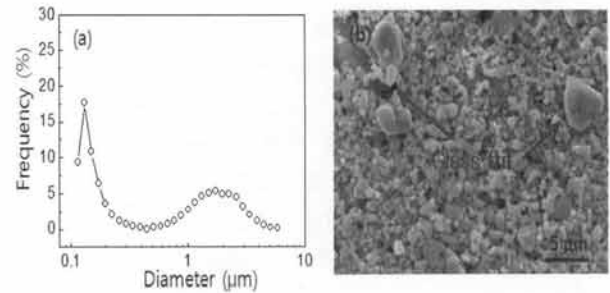


Fig. 3. The particle size distribution of the mixed powders: (a) evaluated by using a particle size analyzer, (b) SEM image.

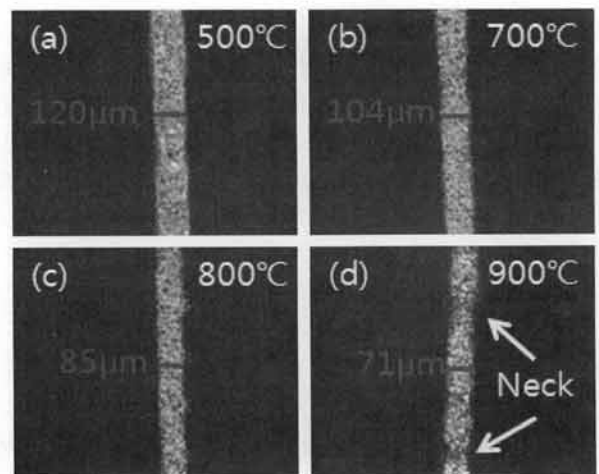


Fig. 4. Optical microscopic images inspected on the finger bar electrode of the integrated solar cell after sintering at various temperatures with a RTP system: (a) 500 $^{\circ}\text{C}$ , (b) 700 $^{\circ}\text{C}$ , (c) 800 $^{\circ}\text{C}$ , (d) 900 $^{\circ}\text{C}$ .

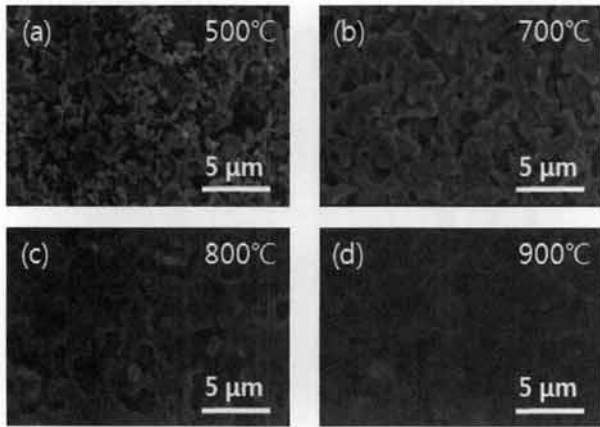


Fig. 5. SEM images inspected on the finger bar of the integrated solar cell after sintering at various temperatures with a RTP system: (a) 500°C, (b) 700°C, (c) 800°C, (d) 900°C.

그림 3(a)는 PSA를 이용하여 분석한 입도 크기 분포도이다. 그래프에서 알 수 있듯이 평균입도 0.1~0.4 μm인 은 (silver) 분말과 평균입도 1~3 μm 정도의 유리 분말이 혼합되어 있음을 확인할 수 있다.

그림 3(b)는 은 분말과 유리 분말을 혼합한 후에 관찰한 주사전자현미경 (scanning electron microscope, SEM) 사진이다. 입도 크기가 작은 은 분말과 평균입도가 비교적 큰 유리 분말이 혼합되어 있음을 확인할 수 있었다.

은 분말, 유리 분말, 첨가제 및 용제를 원하는 비율로 칭량하여 혼합기로 무기물과 유기 결합제를 균일하게 혼합한 후, 은 페이스트를 제조하고, 이를 스크린 프린팅법으로 태양전지의 상부 전극으로 제작하였다. 이 실험은 양산 공정에 적용하기에 앞서 실험실에 구비되어 있는 급속열처리 장치를 이용하였다. 그림 4는 은 페이스트를 SiNx 반사방지막 위에 도포한 후에 500°C~900°C 범위의 다양한 온도로 후속 열 공정을 진행한 후에 전극의 가는 부분인 핑거 바에서 관찰한 광학현미경 (OM) 사진이다. 실험실 평가용 전극 마스크 제작 시의 핑거 바의 선폭은 100 μm이었는데, 인쇄 후 핑거 바의 두께는 약 25 μm 이었으며, 선폭은 약 120 μm이었다. 이렇게 마스크에 비하여 도포 후의 선폭이 증가하는 것은 페이스트의 점성 유동에 의한 도포 후의 퍼짐 현상으로 이해할 수 있다. 500°C의 저온 열 공정 후에는 선폭이 거의 변화가 없었으며, 이러한 핑거 바의 선폭은 소결을 위한

RTP 열처리 온도가 증가함에 따라서 점점 더 많이 수축함을 확인할 수 있었다. 수축률을 계산해 보면, 700°C의 경우 약 15%, 800°C의 경우 약 30%, 900°C의 경우 약 40% 정도임을 확인할 수 있었다. 특이한 점은 900°C의 고온 열 공정 후에는 핑거 선에 잘록한 부분인 목 (neck)이 형성된다는 점이다. 이러한 목의 형성은 전선의 직렬저항을 증가시켜서 태양전지의 효율을 감소시키는 악 영향을 미칠 수 있기 때문에 바람직하지 않다. 따라서 너무 높은 온도의 고온 공정은 은 페이스트를 이용한 상부전극 제작에는 부적당한 것으로 판단되었다. 즉 상부 은 전극 형성을 위한 최적 열 공정이 존재함을 알 수 있었다.

그림 5는 은 페이스트를 도포한 후에 소결 온도 변화에 따른 은 전극의 미세 구조 변화를 주사전자현미경 (SEM)으로 관찰한 결과이다. 열처리 온도가 증가함에 따라서 큰 입자 크기를 보이는 유리 분말들은 사라지고, 작은 입자 크기를 갖는 은 분말들이 서로 합쳐져서 점점 입자 크기가 증가함을 확인할 수 있다. 그런데 특이한 점 중의 하나는 900°C 열처리 조건으로 제작한 전극 표면은 전자현미경 관찰 시에 약간의 표면 충전 (surface charging) 현상이 발생하여 사진의 선명도가 떨어졌다. 이는 은 전극의 과소결로 인하여 유리질 성분이 표면으로 방출되어 발생하는 현상으로 유추할 수 있지만, 정확한 해석을 위해서는 추가적인 분석이 필요할 것이다. 전극의 직렬 저항은 태양전지의 효율을 감소시키는 원인 중의 하나이다. 따라서 전극의 직렬 저항은 가능한 낮추는 것이 효율을 태양전지 제조를 위한 하나의 필요조건이다 [13].

그림 6은 이러한 전극의 직렬 저항을 평가하기 위하여 넓은 면적의 전극인 버스 바에서 측정한 면 저항이다. 소결 온도가 증가함에 따라서 점점 직렬 저항이 감소함을 볼 수 있다. 하지만 900°C 열 공정의 조건에서는 면 저항이 약간 증가하였다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 은 전극은 과소결이 진행되면 오히려 면 저항이 증가함을 알 수 있다. 열처리 온도 및 시간이 증가하여 Ag 원자가 과도하게 Si 웨이퍼 내로 침투하여 n+/p- 다이오드 접합 계면을 파괴되면 누설 전류 (shunt resistance,  $R_{sh}$ ) 값이 증가하여 태양전지의 효율을 감소시키는 원인으로 작용하게 된다 [13]. 따라서 전극 소결을 위한 열처리 시에는 조건을 최적화하여 SiNx 반사 방지막만 에칭하여 Ag/n+ 접착을 형성하고, Ag가 p- 층까지는 확산해 들어가지 않도록 하는 것이 중요하다.

그림 7은 여러 전극 소결온도 조건에서 Si 웨이퍼

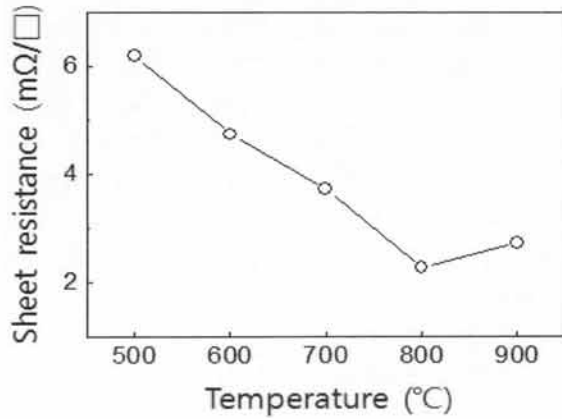


Fig. 6. The variation of the sheet resistance measured on the bus bar electrode as a function of the sintering temperature.

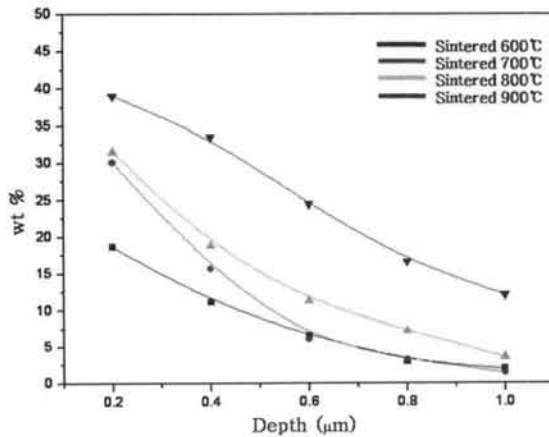


Fig. 7. The variation of the silver content measured by using a EDX analysis as a function of the depth from the  $\text{SiN}_x/\text{Si}(n^+)$  interface.

내의 깊이에 따른 Ag 원자의 침투량을 분석한 결과이다.  $n^+$  층의 두께는 대략  $1\ \mu\text{m}$ 이므로  $\text{SiN}_x/n^+$  계면으로부터  $1\ \mu\text{m}$  깊이까지 분석하였다. 분석은 주사전자현미경 (FEI-Quanta 400)에 장착되어 있는 EDS (energy dispersive X-ray spectrometer, Bruker AXS Co., QUANTX 200) 분석 장치를 이용하였다. 소결 온도가 증가함에 따라서 Si 내의 Ag 원소의 침투량은 증가함을 알 수 있다.  $800^\circ\text{C}$ 의 경우에는  $\text{SiN}_x/n^+$  계면 부근의 Ag 침투량은 증가했지만,  $n^+/p^-$  계면

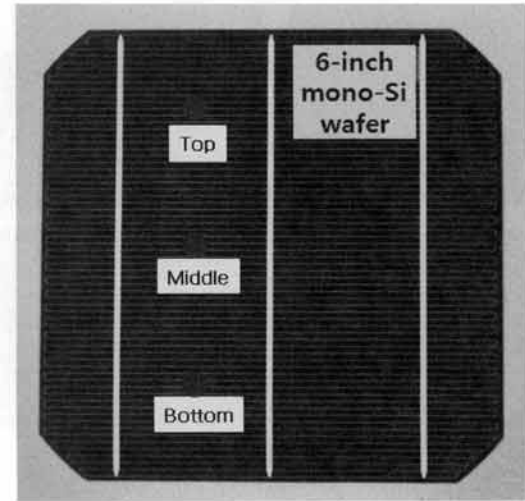


Fig. 8. Si solar cell fabricated on 6-inch mono-Si wafer (●: measured point).

부근인 깊이  $1\ \mu\text{m}$ 에서는 거의 변화가 없다. 그런데  $900^\circ\text{C}$  소결 조건에서는  $n^+/p^-$  계면 부근인 깊이  $1\ \mu\text{m}$ 에서도 Ag 침투량이 14 wt% 정도로 상당히 증가했다. 이러한  $n^+/p^-$  계면 부근에서의 Ag량의 증가는 p-n 다이오드 접합을 불량하게 하여 누설 전류를 증가시키고 이는 태양전지의 효율을 감소시키게 되므로 적합하지 않다.

이상의 분석 결과들을 종합해 보면 스크린 프린팅 방법으로 도포된 은 전극을 양산공정에 적용할 경우, 후속 열 공정 온도는  $800^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$  부근에서 최적값을 나타낼 것으로 예상되었다. 따라서 6인치 단결정 실리콘 웨이퍼 위에 국내 S사의 양산 공정을 적용하여 태양전지를 제작하고, 양산라인에 적용되는 벨트로 (belt furnace)에서 최종적으로 후속 열 공정을 최적화하고자 하였다.

그림 8은 국내 S사의 양산 라인에서 6인치 단결정 웨이퍼 위에 제작한 Si 태양전지 사진을 보여주고 있다. 은 전극을 도포하기 전의 웨이퍼는, 실험 방법에서 기술한 바와 같이, p-형 단결정 실리콘 웨이퍼에 텍스처링과 인 확산 공정을 거쳐 두께  $1\ \mu\text{m}$  정도의  $n^+$  에미터 층을 형성한 후, 반사방지막으로 두께 70 nm의  $\text{SiN}_x$ 를 화학기상 증착법으로 증착한 것이다. 그 위에 본 연구에서 개발한 은 페이스트를 프린터기에서 압력 0.4 MPa, 속도 50 mm/sec로 도포하였다. 그 다음 드라이기에서  $275^\circ\text{C}$ 에서 건조한 다음, 벨트로에서 여러 온도 조건에서 최종 열처리를 진행하였다.

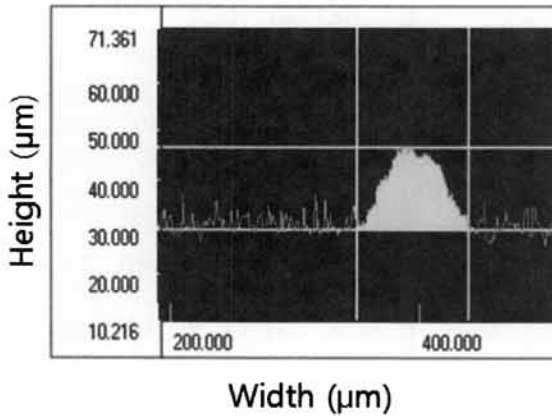


Fig. 9. The measured width and height of the finger bar fabricated on 6-inch mono-Si wafer as shown in Fig. 8.

다른 공정들은 S사의 양산 공정을 그대로 적용하였다. 양산라인에서 적용된 핑거 바의 선폭은 80 μm를 적용하였다.

그림 9는 양산 라인에서 제작한 단결정 실리콘 태양전지의 핑거 바의 선폭과 높이를 측정한 실험 결과 중 하나를 보여주고 있다. 그림 8에 나타낸 상, 중, 하의 위치에서 측정한 (선폭, 높이)는 각각 (94 μm, 20 μm), (87 μm, 19 μm), (89 μm, 17 μm)로 나타났다. 측정 결과를 보면, 80 μm로 설계된 선폭이 약간 퍼짐 현상에 의해 증가한 것을 볼 수 있다. 상부 은전극을 도포한 후의 후속 열 공정은 벨트 로에서 진행하였다. 본 연구에서 적용된 벨트 로는 아홉 개의 영역에서 개별적으로 온도를 설정할 수 있는 장치이다. 최고 설정 온도가 905°C인 경우를 예를 들면, 각 영역의 설정 온도는 360-360-360-500-550-600-650-845-905°C이다. 벨트의 이송 속도는 5.8 m/min 조건으로 진행했다. 여기에서 벨트 로의 열 공정을 최적화하기 위하여 낮은 온도 대역은 모두 같은 조건으로 진행하고 가장 높은 온도 영역인 845~905°C 영역을 여러 조건으로 변화시켜서 태양전지를 제작하였다.

표 2는 여러 온도 조건에서 제작한 단결정 실리콘 태양전지의 전기적 특성을 보여주고 있다. 태양전지 효율 측정 시의 광원 조건은 AM1.5이고, 측정 온도는 상온 (25°C)의 조건에서 수행하였다. 각 열처리 조건에서 동일 조건으로 30매씩 태양전지를 제작한 다음, 모든 웨이퍼의 전기적 특성을 측정하고 평균을 계산하여 보고한 값이다. 측정된 태양전지 효율은 벨트 로의 설정 온도가 증가함에 따라서 효율이 향상되

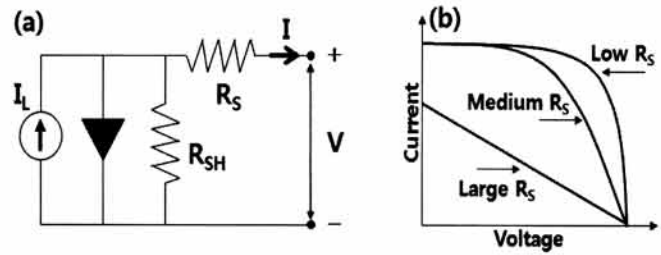


Fig. 10. Equivalent circuit of the fabricated Si solar cell (a) and the  $R_s$  effects on I-V curve of the solar cell (b).

Table 2. Solar cell performance measured by using a solar simulator with the light intensity of AM1.5 at 25°C.

Temp. split condition	815-855°C	830-890°C	845-905°C	860-920°C
Voc (V) (at open circuit)	0.630	0.632	0.632	0.632
Isc (A) (at short circuit)	8.925	8.989	8.953	8.929
$R_s$ (mΩ) (series resist.)	19.27	4.02	3.52	11.51
$R_{sh}$ (Ω) (shunt resist.)	23.42	29.51	22.44	19.01
FF (%) (fill factor)	58.8	76.6	77.2	68.01
Eff. (%) (efficiency)	13.85	18.22	18.28	16.05

다가 905°C 이상에서는 오히려 감소하는 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 태양전지의 직렬저항 ( $R_s$ , series resistance)의 변화로 잘 설명할 수 있다.

그림 10은 제작된 실리콘 태양전지의 등가회로와 본 태양전지에서 직렬 저항이 전류-전압 곡선에 미치는 영향을 개략적으로 나타낸 것이다 [13]. 그림에서 알 수 있듯이, 직렬 저항이 높으면 태양전지 회로에서 그림 10(b)와 같이 측정되는 전류를 감소시켜 태양전지의 충전율 (fill factor)을 감소시키고, 이는 태양전지 효율의 감소로 연결된다 ( $Eff = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF / P_{in}$ ,  $P_{in} = 1 \text{ kW/m}^2$  at AM1.5). 표 2에서 직렬 저항은 845-905°C 조건에서 가장 낮고 ( $R_s = 3.52 \text{ m}\Omega$ ), 충전율 및 효율은 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 또한 직렬 저항은 전극의 열처리 조건 변화에 따른 핑거 바 전극의 저항과 가장 밀접한 연관이 있기 때문에 이 결과는 그림 6의 실험 결과와도 잘 일치함을 알 수 있다. 온도 설정 조건이 845-905°C인 경우에서, 본 연구에서 개발한 페이스트를 이용하여 제작한 태양전지의 경우에는 18.28%로 거의 세계 최고 수준의 특성을 확보할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 상용화된 벌크 실리콘 태양전지의 상부 전극 형성에 가장 널리 사용되는 은 페이스트에서, 은 분말, 유리 분말, 고분자 첨가제 등의 성분 조성 및 후속 열처리 공정을 최적화하여 상용 은 페이스트를 개발하였다. 제조된 은 페이스트를 양산 라인에 적용한 경우에서, 벨트 로의 후속 열 공정 온도는 845-905°C가 가장 적합한 것으로 평가되었으며, 이 조건을 적용하여 단결정 실리콘 웨이퍼 위에 제작된 태양전지의 효율은 18.28%로 거의 세계 최고 수준의 특성을 보였다. 따라서 본 연구에서 개발한 은 페이스트는 스크린 프린팅 기법으로 제작되는 태양전지의 양산라인에 적용 가능성이 충분히 있음을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2012년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임. 또한 본 연구는 지식경제부의 지역혁신센터사업(RIC)의 지원으로 수행된 연구 결과입니다.

#### REFERENCES

- [1] S. S. Kim, D. G. Lim, D. Y. Kim, J. M. Kim, C. Y. Won, and J. Yi, *J. KIEEME*, 10, 1034 (1997).
- [2] H. Y. Kwon, J. D. Lee, M. J. Kim, and S. H. Lee, *J. KIEEME*, 23, 571 (2010).
- [3] R. W. Vest, *Ceram. Bull.*, 65, 631(1986).
- [4] Y. Li and C. P. Wong, *Mater. Sci. Eng.*, 51, 1 (2006).
- [5] Y. Zhang, Y. Yang, J. Zheng, W. Hua, and G. Chen, *Mater. Chem. Phys.*, 114, 319 (2009).
- [6] S. B. Rane, T. Seth, G. J. Phatak, D. P. Amalnerkar, and B. K. Das, *Mater. Lett.*, 57, 3096 (2000).
- [7] P. F. Becher and W. L. Newell, *J. Mater. Sci.*, 12, 90 (1977).
- [8] S. A. Ketkar, G. G. Umarji, G. J. Phatak, T. Seth, U. P. Mulik, and D. P. Amalnerkar, *Mater. Sci. Eng.*, 132, 197 (2006).
- [9] Y. Yang, S. Seyedmohammadi, U. Kumar, D. Gnizak, E. Graddy, and A. Shaikh, *Energy Procedia*, 8, 607 (2011).
- [10] S. H. Park, D. S. Seo, and J. K. Lee, *Colloid Surf.*, 313, 197 (2008).
- [11] L. Shiyong, W. Ning, X. Wencai, and L. Yong, *Mater. Chem. Phys.*, 111, 20 (2008).
- [12] S. J. Jeon, S. M. Koo, and S. A. Hwang, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 93, 1103 (2009).
- [13] S. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt, and R. Corkish, *Applied Photovoltaics, 2nd ed.* (Centre for Photovoltaic Engineering, UNSW, 2009) p. 49.