

Aluminum 및 Aluminum-Boron 후면 전극에 따른 단결정 실리콘 태양전지 특성

홍지화*, 백태현**, 김진국*, 최성진***, 김남수*, 강기환***, 유권중***, 송희은***

*충북대학교 대학원 반도체공학과 (hongji8884@hanmail.net, jinkuk_kim@kier.re.kr, nsk@chungbuk.ac.kr)

**충북대학교 대학원 전기공학과 (baek_th@naver.com)

***한국에너지기술연구원 (sjchoi@kier.re.kr, ghkang@kier.re.kr, y-gj@kier.re.kr, hsong@kier.re.kr)

Characteristics of Mono Crystalline Silicon Solar Cell for Rear Electrode with Aluminum and Aluminum-Boron

Ji-Hwa Hong*, Tae-Hyeon Baek**, Jin-Kuk Kim*, Sung-Jin Choi***, Nam-Soo Kim*,
Gi-Hwan Kang***, Gwon Jong Yu***, Hee-eun Song***

*Dept. of Semiconductor Engineering, Chungbuk University

(hongji8884@hanmail.net, jinkuk_kim@kier.re.kr, nsk@chungbuk.ac.kr)

**Dept. of Electrical Engineering, Chungbuk University (baek_th@naver.com)

***Korea Institute of Energy Research

(sjchoi@kier.re.kr, ghkang@kier.re.kr, y-gj@kier.re.kr, hsong@kier.re.kr)

Abstract

Screen printing method is a common way to fabricate the crystalline silicon solar cell with low-cost and high-efficiency. The screen printing metallization use silver paste and aluminum paste for front and rear contact, respectively. Especially the rear contact between aluminum and silicon is important to form the back surface field (Al-BSF) after firing process. BSF plays an important role to reduce the surface recombination due to p⁺ doping of back surface. However, Al electrode on back surface leads to bow occurring by differences in coefficient of thermal expansion of the aluminum and silicon. In this paper, we studied the properties of mono crystalline silicon solar cell for rear electrode with aluminum and aluminum-boron in order to characterize bow and BSF of each paste. The 156*156 mm² p-type silicon wafers with 200 μm thickness and 0.5-3 Ω cm resistivity were used after texturing, diffusion, and antireflection coating. The characteristics of solar cells was obtained by measuring vernier callipers, scanning electron microscope and light current-voltage. Solar cells with aluminum paste on the back surface were achieved with V_{OC} = 0.618V, J_{SC} = 35.49mA/cm², FF(Fill factor) = 78%, Efficiency = 17.13%.

Keywords : 결정질 실리콘 태양전지(Crystalline Silicon Solar Cell), 전극 형성(Metallization), 스크린 프린팅 (Screen Printing), 후면 전계 (Back Surface Field ; BSF)

기 호 설 명

FF	: Fill factor
Voc	: Open-circuit voltage
Isc	: Short-circuit current
LIV	: Light current-voltage
SEM	: Scanning electron microscope

1. 서 론

태양전지란 태양의 에너지를 직접 전기 에너지로 바꾸는 장치를 말한다. 태양전지는 무한한 태양에너지를 이용하여 전기를 생산하고, 다른 발전 시스템과 달리 가동부분이 없어 조용하며 안전한 친환경적 시스템으로 미래형 재생 가능 에너지원으로 주목받고 있다.¹⁾

태양전지는 기본적으로 p-n접합의 구조로 이루어져 있으며, 빛이 태양전지 내부로 잘 흡수되도록 하기 위한 반사방지막과 실리콘 내부에서 만들어진 전자·정공쌍을 외부로 끌어내기 위한 전면 전극 및 후면 전극으로 구성된다.

일반적인 태양전지의 전극은 screen printing 방법으로 형성하는데, 전면은 은(Ag), 후면은 알루미늄(Al)을 이용하여 전극을 형성한다. 알루미늄(Al)을 이용하여 후면전극을 형성할 경우, 전극과 실리콘 기판이 접촉하도록 하기 위한 열처리 과정인 소성(firing) 과정에서 3족에 속하는 알루미늄이 4족인 실리콘(Si) 안으로 확산되면서 후면전계(back surface field; BSF)가 형성된다.

후면전계란 p형 웨이퍼 후면에 p+층을 형성하는 것을 말하며, p영역의 전자가 뒷면으로 이동하여 재결합하게 되는 것을 방지하는 역할을 한다. 그 결과 누설전류를 줄이고, 좋은 저항성 접촉(ohmic contact)을 만들어 주게 되어 태양전지의 개방전압(Voc)과 곡선

인자(FF)의 향상을 가져오게 된다.²⁾

그러나 후면 전극물질로 주로 사용되고 있는 알루미늄의 경우, 알루미늄과 실리콘의 열팽창 계수 차이로 인해 소성 공정 후 웨이퍼 휨(bowing) 현상이 발생할 수 있으며 이로 인해 태양전지 내 크랙이 발생하거나 모듈제작 시 문제가 될 수 있다. 또한 결정질 실리콘 태양전지의 두께가 점점 얇아지는 추세에서 알루미늄 페이스트에 의한 웨이퍼 휨 현상은 반드시 해결해야 할 문제이다.

본 논문에서는 후면 전극물질로 주로 사용되는 알루미늄 페이스트와 웨이퍼 휨 현상을 보완하기 위해 알루미늄의 함량은 줄이면서 후면 전계 형성을 도울 수 있는 붕소(B)가 첨가된 알루미늄-붕소(Al-B) 페이스트를 후면 전극물질로 사용하여 태양전지를 제작하였고, 각각의 페이스트로 인한 태양전지 특성 변화를 분석하였다. 또한 후면에서의 에미터 유무에 따른 영향도 고려하였다.

2. 실험 방법

실험에서 사용된 웨이퍼는 두께 $200 \pm 10 \mu\text{m}$, 비저항 $0.5\text{--}3 \Omega \cdot \text{cm}$, 그리고 $156 \times 156 \text{ mm}^2$ 의 면적을 가지고 있는 p-type의 단결정 실리콘 웨이퍼이다.

태양전지 제작에서의 가변조건은 표 1과 같으며 2가지 다른 종류의 후면 페이스트와 후면 에미터 제거 유무에 따라 태양전지를 제작하였고 총 4개의 그룹으로 나누었다.

표1. 그룹별 조건

구 분	후면 에미터	후면 전극
그룹 A	유	Al paste
그룹 B	무	
그룹 C	유	Al-B paste
그룹 D	무	

1) 이재형, 태양전지 개발동향 및 향후 전망, 한국정밀공학회지 제 25권 10호 pp.7-22

2) 이준신, 김경해, 「태양전지공학」, 도서 출판 그린, pp.50~62, pp.155~161, 2007

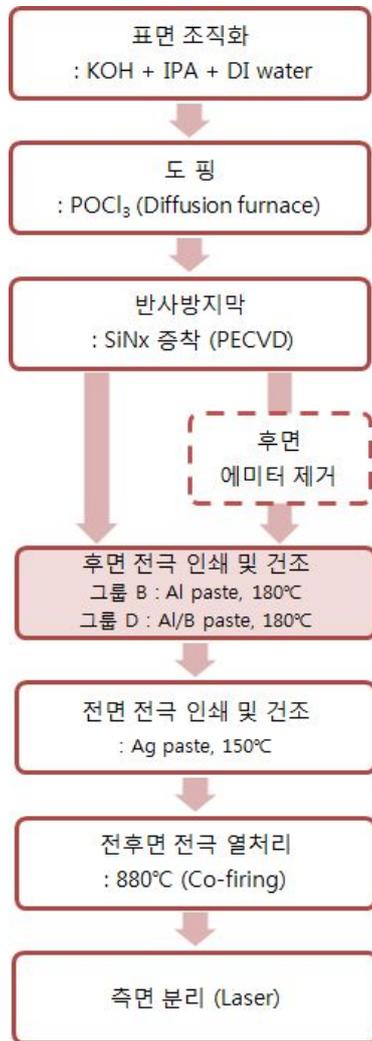


그림 1. 실험 순서

그림 1은 태양전지 제작 순서와 실험 방법을 나타낸 것으로 표면 조직화 공정에서는 단결정 실리콘 웨이퍼를 식각하기 위해 KOH와 IPA(isopropyl alcohol), DI water를 혼합하여 사용하였고 피라미드 구조를 얻을 수 있었다. 기관의 표면 조직화 이후 도핑 과정에서는 diffusion furnace에 POCl_3 소스를 주입하여 $50 \Omega/\text{sq}$ 의 면저항을 갖는 p-n접합을 형성하였다. 이후 PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition)를 사용하여 SiN_x

(질화실리콘) 반사방지막(anti reflection coating)을 형성하였고 80nm의 두께로 증착하였다. 그리고 후면 에미터 유무에 따른 영향을 알아보기 위하여 그룹 B, D(표1)는 KOH 용액을 이용하여 반사방지막 증착 후 후면 에미터를 제거하였다.

전극 형성을 위해서는 screen printing 방법을 사용하여 그룹 A와 B는 Al paste, 그룹 C와 D는 Al-B paste를 이용하여 후면전극을 형성하였다(표1). 인쇄된 후면전극을 건조시킨 뒤 같은 방식으로 Ag paste를 이용하여 전면 전극을 형성하고 건조시켰다. 전극 형성 후 전극과 실리콘 웨이퍼와의 접착을 위해 동시 소성(co-firing) 공정을 진행하였다. Co-firing 공정 후 후면 에미터가 남아있는 A, C 그룹(표1)의 태양전지들은 laser를 이용하여 측면 분리를 진행하였다.

모든 공정을 마친 후 각 그룹의 태양전지에 대한 특성을 분석하였다. Bowing 정도를 측정하기 위해 vernier callipers 이용하였고, 태양전지 후면의 단면을 관찰하기 위해 SEM 측정을 하였다. PASAN社의 solar simulator를 이용하여 광 조사에 따른 태양전지의 전기적 특성을 분석하였다. 각 그룹마다 모두 4장의 태양전지를 제작하였고 제시된 측정값은 이들의 평균값이다.

3. 결과 및 고찰

알루미늄 후면 전극과 알루미늄-붕소 후면 전극의 bowing 정도를 관찰하기 위하여 소성 후 bowing 된 웨이퍼의 높이를 vernier callipers를 이용하여 측정하였다. 그림 2는 소성 후 bowing된 웨이퍼의 높이 측정 결과를 평균값으로 나타낸 것이다. 측정 결과 알루미늄 페이스트를 사용하여 후면 전극을 형성한 A, B 그룹의 태양전지들은 약 4mm 정도의 bowing 현상이 나타났으며 알루미늄-붕소 페이스트를 사용하여 후면 전극을 형성한 C, D 그룹의 태양전지들은 약 3.2mm의

bowing 현상이 나타났다. 알루미늄 페이스트를 후면전극으로 사용한 태양전지보다 알루미늄-보론 페이스트를 사용한 태양전지에서 약 0.8mm 감소된 bowing 현상이 관찰되었다. 이는 알루미늄-붕소 페이스트가 알루미늄 페이스트에 비해 알루미늄의 함량이 낮고, 붕소로 인해 열팽창 계수 차이가 완화된 것에 기인한다.³⁾

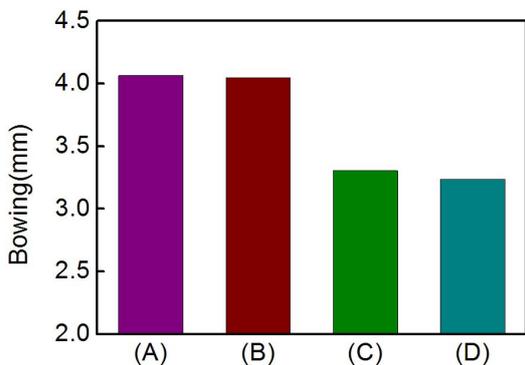


그림 2. 소성 후 측정된 태양전지의 bowing 정도 ; (A) 후면 에미터(O), 후면전극 : Al, (B) 후면 에미터(X), 후면전극 : Al, (C) 후면 에미터(O), 후면전극 : Al,-B, (D) 후면 에미터(X), 후면전극 : Al,-B

그림 3은 후면 에미터 제거 유무에 따른 후면전극 형성 모습을 관찰하기 위해 태양전지 후면의 단면을 SEM으로 측정된 사진이다. 관찰 결과, 후면 에미터를 제거하지 않은 샘플에서는 알루미늄-실리콘 합금부분에서 후면 피라미드 구조가 나타나는 반면에 후면 에미터를 제거한 샘플에서는 후면 피라미드가 존재하지 않는 평탄한 구조가 나타남을 알 수 있었다. 이는 후면의 에미터 제거 과정에서 후면 피라미드 식각되어 평탄한 상태의 구조가 되었음을 예측해 볼 수 있다. 이러한 후면 구조의 차이는 후면전극과 실리콘과의 접촉저항 차이를 발생시킬 수 있다.

3) Jalal Salami, Ben Cruz and Aziz Shaikh, PASTE DEVELOPMENT FOR LOW COST HIGH EFFICIENCY SILICON SOLAR CELLS, 16th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Modules and Process, August 6-9, 2006

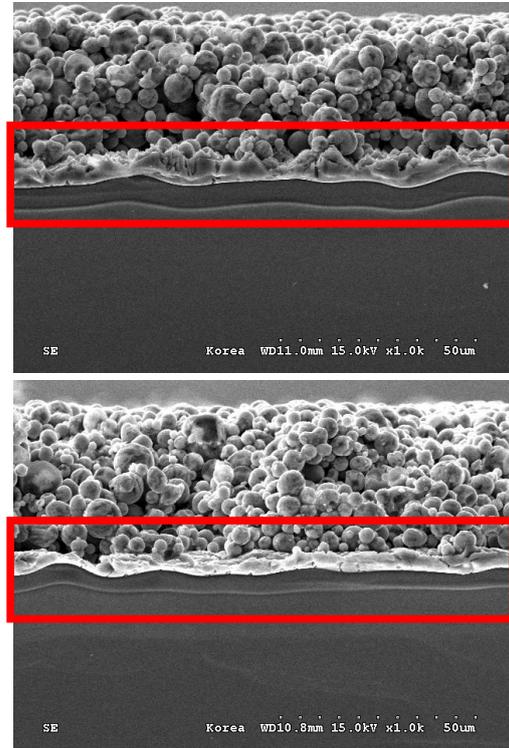


그림 3. 후면 에미터 유무에 따른 후면전극 형성 모습 (상 : 후면 에미터(O), 하 : 후면 에미터(X))

표 2는 그룹 A~D의 조건에서 제작된 태양전지의 sun simulator 측정 결과로 개방전압(V_{oc}), 전류밀도(J_{sc}), 곡선인자(FF), 광 변환 효율(conversion efficiency), 그리고 병렬저항(R_{sh})을 나타내고 있으며 이를 그림 4로 나타내었다.

측정 결과, 후면 에미터가 제거된 그룹 B와 D가 후면 에미터가 존재하는 그룹 A와 C에 비해 각각 $35.49\text{mA}/\text{cm}^2$, $35.42\text{mA}/\text{cm}^2$ 로 전류밀도가 각각 $0.21\text{mA}/\text{cm}^2$, $0.03\text{mA}/\text{cm}^2$ 씩 높게 나타났다. 이는 그림 3에 보이는 바와 같이 후면 에미터가 제거된 웨이퍼의 후면 구조가 에미터가 존재하는 웨이퍼에 비해 평탄하기 때문에 후면 내부에서 장파장 영역의 투과도가 감소하여 태양전지 내로 흡수되는 빛이 증가하였기 때문인 것으로 여겨진다.⁴⁾

그룹 B와 D는 그룹 A와 C에 비해 전류밀도가 높았던 반면 곡선인자가 각각 0.73%, 1.13%씩 낮게 측정되었다. 그룹 B, D는 그룹 A, C에 비해 후면의 구조가 평탄하여 후면전극과의 접촉 면적이 감소하게 되고, 이는 곡선인자에 영향을 미치게 된다. 따라서 후면전극과 접촉하는 면적이 넓은 그룹 A, C의 태양전지가 그룹 B, D의 태양전지에 비해 높은 곡선인자를 보였다.

또한 그룹 A, B의 곡선인자가 그룹 C, D에서의 곡선인자보다 높게 나타났는데, 이는 그룹 A, B에서 사용한 알루미늄 페이스트에 비해 그룹 C, D에서 사용한 알루미늄-붕소 페이스트의 알루미늄 함량이 적어 전극의 저항 차이가 발생한 것이다.

병렬저항은 이상적인 다이오드의 경우 큰 값을 가져야하나, 태양전지 제조 공정에 따라서는 일정한 저항으로 표시되는 누설저항을 나타낸다. 이는 태양전지의 측면 테두리를 따라 형성되는 표면 누설, 접합의 오염, 금속성 불순물, 결정결함에 의한 누설전류에 기인한다.⁵⁾ 그룹 B, D가 그룹 A, C보다 병렬저항이 크게 감소하였는데, 이는 그룹 B, D의 후면 에미터 제거 과정에서 웨이퍼 가장자리의 에미터가 완벽하게 제거되지 않고 잔류하여 광 조사시 누설전류가 발생하였기 때문이다.

태양전지의 광 변환효율은 후면 에미터를 제거하고 알루미늄 페이스트로 후면전극을 형성한 그룹 B에서 가장 높은 17.13%를 보였다. 또한 후면 에미터를 제거하고 알루미늄-붕소 페이스트로 후면전극을 형성한 그룹 D는 낮은 곡선인자로 인해 가장 낮은 광 변환효율인 16.85%를 보였다. 그림 6은 본 실험에서 17.2%의 최고 효율을 보인 그룹 B의 I-V 곡선이다.

4) Youngkuk Kim, Sungwook Jung, Minkyu Ju, Kyungyul Ryu, Jinjoo Park, Hyoungkee Choi, Doohwan Yang, Yongwoo Lee, Junsin Yi, The effect of rear surface polishing to the performance of thin crystalline silicon solar cells, 2011

5) 이준신, 김경해, 「태양전지 실무 입문」, 두양사, pp.53, 2009

표 2. 그룹 A~D에 대한 light-IV 측정 결과 ;

	V _{OC} (V)	J _{SC} (mA/cm ²)	FF (%)	E _{ff} (%)	R _{sh} (Ω)
그룹 A	0.615	35.28	78.73	17.07	13.90
그룹 B	0.618	35.49	78.00	17.13	5.38
그룹 C	0.616	35.39	78.23	17.07	12.52
그룹 D	0.616	35.42	77.10	16.85	4.16

(A) 후면 에미터(O), 후면전극 : Al, (B) 후면 에미터(X), 후면전극 : Al, (C) 후면 에미터(O), 후면전극 : Al,-B, (D) 후면 에미터(X), 후면전극 : Al,-B

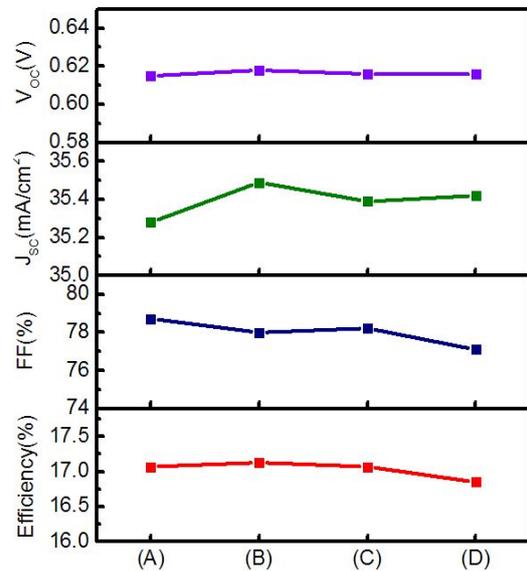


그림 5. 그룹 A~D에 대한 light-IV 측정 결과; (A) 후면 에미터(O), 후면전극 : Al, (B) 후면 에미터(X), 후면전극 : Al, (C) 후면 에미터(O), 후면전극 : Al,-B, (D) 후면 에미터(X), 후면전극 : Al,-B

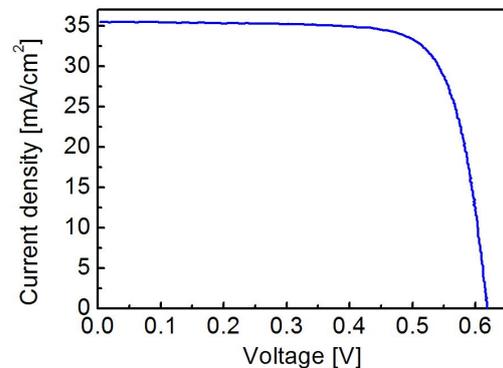


그림 6. 17.2%의 최고 효율을 보인 그룹 B의 I-V 곡선

4. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 및 알루미늄-붕소 페이스트를 사용하여 후면 전극을 형성한 후 그에 따른 단결정 실리콘 태양전지의 특성을 분석하였다. 알루미늄-붕소 후면 전극이 형성된 태양전지는 알루미늄 후면 전극의 태양전지에 비해 휨 현상이 약 0.8mm 정도 감소함을 알 수 있었다. 또한 후면 에미터를 제거하고 알루미늄-붕소 페이스트를 사용하여 후면 전극을 형성한 그룹을 제외한 나머지 그룹의 광 변환 효율은 거의 유사하게 나타났다. 따라서 알루미늄-붕소 페이스트는 얇은 웨이퍼 사용 시 휨 현상에 의한 웨이퍼 파손의 우려가 있는 알루미늄 페이스트의 단점을 보완하면서 동일한 수준의 광 변환 효율을 보이므로 알루미늄 페이스트를 대체할 수 있는 잠재력을 가지고 있는 것으로 보인다. 이런 알루미늄-붕소 페이스트의 사용은 휨 현상이 심한 얇은 웨이퍼 태양전지 제작에서 더욱더 유용할 것으로 여겨진다.

참 고 문 헌

1. 이재형, 태양전지 개발동향 및 향후 전망, 한국정밀공학회지 제 25권 10호 pp.7-22
2. 이준신, 김경해, 「태양전지공학」, 도서출판 그린, pp.50~62, pp.155~161, 2007
3. Jalal Salami, Ben Cruz and Aziz Shaikh, Paste development for low cost high efficiency silicon solar cells, 16th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Modules and Process, August 6-9, 2006
4. Youngkuk Kim, Sungwook Jung, Minkyu Ju, Kyungyul Ryu, Jinjoo Park, Hyoungkee Choi, Doohwan Yang, Yongwoo Lee, Junsin Yi, The effect of rear surface polishing to the performance of thin

crystalline silicon solar cells, 2011

5. 이준신, 김경해, 「태양전지 실무 입문」, 두양사, pp.53, 2009