

## 박형 결정질 실리콘 태양전지에서의 휨현상 감소를 위한 알루미늄층 두께 조절

백태현\*, 홍지화\*\*, 임기조\*, 강기환\*\*\*, 유권중\*\*\*, 송희은\*\*\*

\*충북대학교 대학원 전기공학학과(baek\_th@naver.com, kjlim@cbnu.ac.kr), \*\*충북대학교 대학원  
반도체공학과(hongji8884@hanmail.net), \*\*\*한국에너지기술연구원(y-gj@kier.re.kr, hsong@kier.re.kr)

### Bow Reduction in Thin Crystalline Silicon Solar Cell with Control of Rear Aluminum Layer Thickness

Tae-Hyeon Baek\*, Ji-Hwa Hong\*\*, Kee-Joe Lim\*,  
Gi Hwan Kang\*\*\*, Gwon-Jong Yu\*\*\*, Hee-eun Song\*\*\*

\*Dept. of Electrical Engineering, Chungbuk National University(baek\_th@naver.com, kjlim@cbnu.ac.kr)

\*\*Dept of Semiconductor Engineering, Chungbuk National University(hongji8884@hanmail.net)

\*\*\*Korea Institute of Energy Research(y-gj@kier.re.kr, hsong@kier.re.kr)

#### Abstract

---

Crystalline silicon solar cell remains the major player in the photovoltaic marketplace with 90 % of the market, despite the development of a variety of thin film technologies. Silicon's excellent efficiency, stability, material abundance and low toxicity have helped to maintain its position of dominance. However, the cost of silicon photovoltaic remains a major barrier to reducing the cost of silicon photovoltaics. Using the crystalline silicon wafer with thinner thickness is the promising way for cost and material reduction in the solar cell production. However, the thinner thickness of silicon wafer is, the worse bow phenomenon is induced. The bow phenomenon is observed when two or more layers of materials of different temperature expansion coefficients are in contact, in this case silicon and aluminum. In this paper, the solar cells were fabricated with different thicknesses of Al layer in order to reduce the bow phenomenon. With lower paste applications, we observed that the bow could be reduced by up to 40% of the largest value with 130 micron thickness of the wafer even though the conversion efficiency decrease of 0.5 % occurred. Since the bowed wafers lead to unacceptable yield losses during the module construction, the reduction of bow is indispensable on thin crystalline silicon solar cell. In this work, we have studied on the counterbalance between the bow and conversion efficiency and also suggest the formation of enough back surface field (BSF) with thinner Al paste application.

---

## 기 호 설 명

Voc	개방전압
Jsc	단락전류밀도
FF	곡선인자(Fill Factor)
SEM	Scanning electron microscope
PECVD	plasma enhanced chemical vapor deposition

## 1. 서 론

현재 전 세계 태양광산업의 80%정도는 결정질 실리콘을 기반으로 제작되고 있다. 결정질 실리콘 태양전지는 실리콘의 풍부함과 비교적 간단한 공정과정, 높은 광 변환효율 등 여러 가지 이점을 가지고 있지만, 태양전지 제조비용 중 웨이퍼가 차지하는 비율이 약 60%로 매우 높은 비율을 차지하고 있다. 따라서 태양전지의 원가 절감과 가격 경쟁력을 높이기 위해 태양전지를 제작할 때 얇은 웨이퍼를 사용한다면 결정질 실리콘 태양전지의 경쟁력을 크게 향상시킬 수 있을 것이다. 하지만 얇은 웨이퍼를 사용할 경우 후면으로 사용하는 알루미늄과 실리콘 사이의 열팽창계수 차이로 인해 기판의 휨 현상이 발생하며 이러한 휨 현상은 태양전지 제조 공정에서의 웨이퍼의 파손율과 제조 공정 완료 후 미세 균열을 발생시켜 태양전지 모듈 제조 공정에서의 파손율을 증가시킨다. 본 연구에서는 상용 태양전지의 기판(200 $\mu\text{m}$ )보다 얇은 120 $\mu\text{m}$  웨이퍼를 사용하였고 후면 전극을 형성할 때 사용하는 알루미늄 페이스트의 용매 함량을 가변하여 후면전극인 알루미늄의 두께를 조절하여 알루미늄 층의 두께가 태양전지의 휨 현상과 전기적 특성에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서는 Czochralski, 두께 200 $\pm$ 10  $\mu\text{m}$ , 비저항 0.5~3 $\Omega\cdot\text{cm}$ , 면적 156 $\times$ 156 $\text{mm}^2$ 의 p-type 단결정 실리콘 기판을 사용하여 태양전지를 제작하였다. 실험에 사용될 120 $\mu\text{m}$ 의 얇은 웨이퍼를 구입할 수 없었기 때문에 NaOH 용액을 사용하여 식각하여 제작하였다. 태양전지 제작 과정은 표1에 나타내었다. 표면조직화 공정은 KOH와 IPA(Isopropyl alcohol), DI water 혼합용액을 사용하여 랜덤 피라미드 구조를 형성하였다. 기판의 표면 조직화 공정 이후 도핑과정에서는 diffusion furnace에 인(phosphorus)을 포함하는 POCl<sub>3</sub>와 O<sub>2</sub>를 주입하여 50 $\Omega/\square$ 의 면저항을 갖는 emitter층을 형성하였고, HF와 HNO<sub>3</sub> 용액을 혼합하여 웨이퍼의 후면을 약 3 $\mu\text{m}$  정도 식각하여 외각 접합분리를 실행하였다.

이후 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition)를 이용하여 굴절률이 2.2인 80nm 두께의 SiNx(질화실리콘)막을 증착하였다. 전극형성을 위해서는 screen printing을 사용하였으며 후면 전극으로 사용되는 Al paste에 용매를 혼합하여 paste의 점도를 낮아지게 함으로써 인쇄되는 알루미늄의 두께를 조절하였다. 이후 전면 전극은 Ag paste를 이용하였으며 인쇄 후 belt furnace를 사용하여 전·후면 동시 소결을 진행하였다. 태양전지 공정완료 후 태양전지의 변환효율( $\eta$ ), 개방전압(Voc), 단락전류밀도(Jsc), Fill-factor(FF)와 같은 전기적 특성을 분석하기 위해 PASAN사의 Solar simulator를 이용하였다. 태양전지에서의 휨 정도를 측정하기 위해 Vernier callipers를 이용하였으며 SEM(Scanning electron microscope)을 이용하여 태양전지 단면을 측정 하였다.

표1. 태양전지 제조 실험순서 및 공정요약도

실험순서	실험		
표면조직화	KOH(수산화 칼륨), DI water, IPA(이소프로판올)		
도핑	POCl3 (면저항 50 Ω/□)		
외각 접합분리	HF(불산), HNO3(질산)		
반사방지막	PECVD SiNx (굴절률2.2)		
금속 전극형성	Rear	Dry Temp 180℃	Al paste thickness 35μm
			Al paste thickness 30μm
			Al paste thickness 25μm
			Al paste thickness 20μm
	Front	Ag paste	
소성	400-425-450-550-880도		
측정방법	SEM(scanning electron microscope) solar simulator vernier callipers		

### 3. 결과 및 고찰

선행실험을 통해 용매의 양을 변화시켜 인쇄 후 형성되는 알루미늄 층의 두께 가변 조건을 찾았다. 그림 1은 태양전지 제조 공정 완료 후 vernier callipers를 이용해 bowing 정도를 측정 한 것이다. 태양전지 소결은 동일한 조건에서 진행되었으며 그림 1에서 보는 바와 같이 알루미늄 층의 두께가 감소할수록 bowing 현상이 점차 감소하였다. 이를 통해 알루미늄 층의 두께가 20μm인 태양전지는 태양전지 모듈 제작 공정에 문제가 되지 않는 3mm 미만의 bowing을 갖는 태양전지를 제작할 수 있음을 확인하였다.

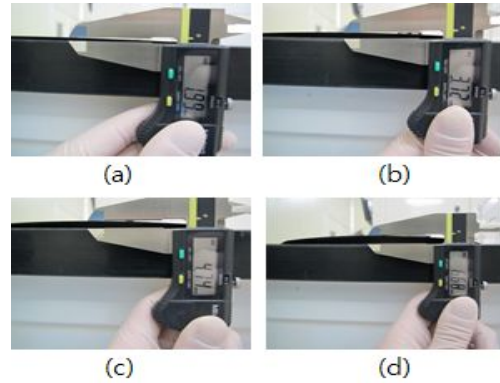
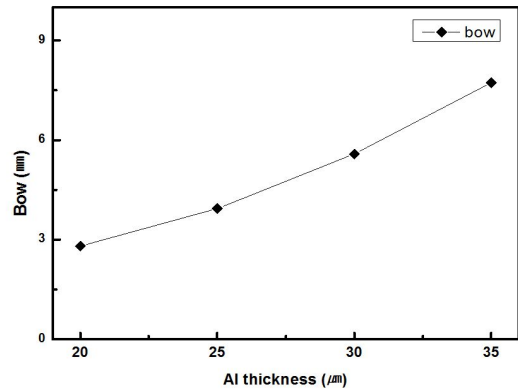


그림 1. 알루미늄 두께에 따른 결정질 실리콘 태양전지의 bowing 측정

- (a) 알루미늄 두께 20μm, (b)알루미늄 두께 25μm,
- (c) 알루미늄 두께 30μm, (d)알루미늄 두께 35μm.
- (e) 알루미늄 두께 변화에 따른 bowing감소 평균값



$$\delta = \frac{3(\alpha_b - \alpha_a)(T_f - T)(T_b + T_a)d^2}{4t_b^2 + \frac{6t_a}{t_b} + 4\left(\frac{6t_a}{t_b}\right)^2 + \left(\frac{E_a}{E_b}\right)\left(\frac{t_a}{t_b}\right)^3 + \left(\frac{E_a}{E_b}\right)\left(\frac{t_b}{t_a}\right)} \quad (1)$$

$t_a$  최상위층의 두께                       $t_b$  최하위층의 두께  
 $t_f$  소결 온도                                   $T$  측정 온도  
 $d$  구성요소의 폭                               $\alpha_b$  구성요소의 대한 열팽창계수  
 $\alpha_a$  구성요소 아래쪽의 열팽창계수  $\delta$  bowing  
 $E_a$  상단 구성요소의 탄성계수  $E_b$  하단 구성요소의 탄성계수

소결 공정 중에 발생하는 bowing 현상은 실리콘과 알루미늄과의 열팽창 계수 차이로 발생하며 이러한 bowing 현상은 식(1)로 나타낼 수 있다. 식을 살펴보면 최하위층의 두께( $t_b$ )가 증가할수록 bowing 정도가 감소하

는데 이는 그림 1에서 나타낸 실험 결과와 일치함을 알 수 있다.

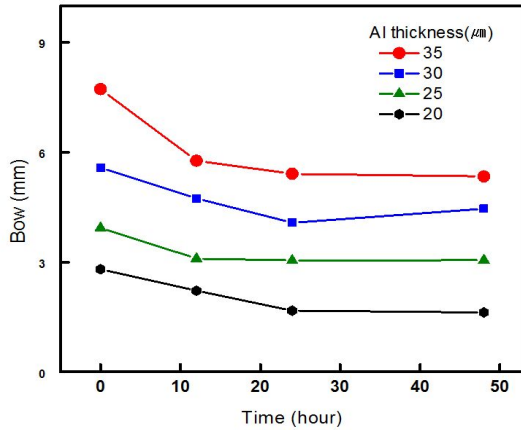


그림 2. 태양전지 제작 후 시간 변화에 따른 bowing 측정 그래프

그림 2는 태양전지 제작 후 경과 시간에 따른 bowing 정도의 감소를 보여준다. Bowing 현상은 태양전지 제작 후 시간에 경과함에 따라 점차 감소한다. 제작완료 후 12시간까지는 bowing 현상이 빠르게 감소하는 경향을 보였으며 24시간 이후에는 거의 감소하지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 알루미늄 층의 두께가 두꺼울수록 bowing 정도가 크게 감소했다.

표 2는 태양전지 제작 후 solar simulator를 이용해 측정된 태양전지의 전기적 특성을 보여준다.

표 2. 알루미늄 두께 변화에 따른 결정질 실리콘 태양전지의 전기적 특성 측정결과

Rear side thickness	Jsc(mA/cm <sup>2</sup> )		Voc(V)		FF(%)		Eff(%)	
	ave*	best	ave*	best	ave*	best	ave*	best
Aluminum thickness(35 $\mu$ m)	35.18	35.32	0.620	0.621	78.0	78.5	17.0	17.1
Aluminum thickness(30 $\mu$ m)	34.88	35.07	0.619	0.619	77.6	78.3	16.7	16.9
Aluminum thickness(25 $\mu$ m)	34.96	35.19	0.619	0.619	77.4	77.8	16.7	16.8
Aluminum thickness(20 $\mu$ m)	34.68	34.73	0.613	0.614	76.3	76.6	16.2	16.3

전체적으로 알루미늄 층의 두께가 감소할수록 개방전압(Voc), 전류밀도(Jsc), Fill-factor(FF)가 감소하는 경향을 보였으며 이로 인해 광 변환효율 또한 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 알루미늄의 두께가 30 $\mu$ m에서 25 $\mu$ m로 감소하였을 때의 전기적 특성변화는 미비했다.

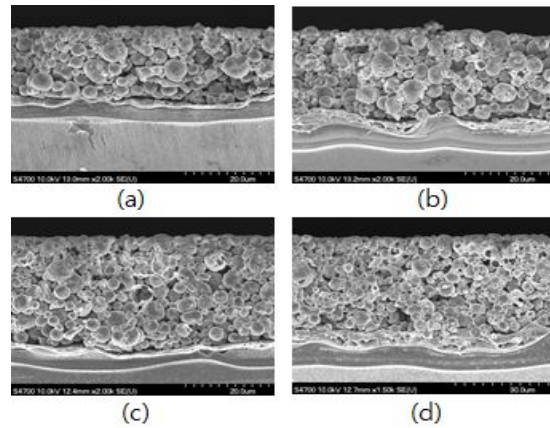


그림 3. 결정질 실리콘 태양전지에서 후면 알루미늄 두께에 따른 SEM 이미지  
(a) 알루미늄 두께 20 $\mu$ m, (b)알루미늄 두께 25 $\mu$ m,  
(c) 알루미늄 두께 30 $\mu$ m, (d)알루미늄 두께 35 $\mu$ m.

그림 3는 SEM을 이용해 측정된 태양전지의 알루미늄 단층 이미지를 보여준다. 형성된 알루미늄 층의 두께는 실험 결과와 거의 일치했으며, 알루미늄 층의 두께가 각각 20 $\mu$ m, 25 $\mu$ m, 30 $\mu$ m, 35 $\mu$ m였을 때 BSF층의 두께는 각각 2.28 $\mu$ m, 4.32 $\mu$ m, 4.27 $\mu$ m, 5.95 $\mu$ m로 측정되었다. 이를 통해 알루미늄 층의 두께가 감소할수록 BSF (back surface field) 두께도 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 식 2로도 확인된다.

$$W_{BSF} = \frac{t_{Al} \cdot \rho_{Al}}{P_{Si}} \left( \frac{F(T)}{1 - F(T)} - \frac{F(T_o)}{1 - F(T_o)} \right) [2]$$

$t_{Al}$  알루미늄층의 두께,

$\rho_{Al}$  알루미늄의 밀도,

$P_{Si}$  실리콘 밀도

$F(T)$  합금형성 온도점에서의 액상중  $Si$  at%,

$F(T_o)$  공정온도에서의  $Si$  at%

그림3에서 나타난 것과 같이 태양전지 후면에 인쇄된 알루미늄 층의 감소는 후면 BSF층의 두께를 감소시키기 때문에 광 생성된 전자정공 쌍의 수집확률을 감소시켜 단락 전류밀도( $J_{sc}$ )와 단락전류( $I_{sc}$ )가 감소했다. 이는 태양전지 효율에 영향을 주며, 또한 p-p+ 영역간의 전위차를 발생시켜 포화 전류밀도가 감소함으로써 태양전지 개방 전압에도 영향미친다.

## 5. 결 론

박형 결정질 실리콘 웨이퍼를 이용한 태양전지 제조공정 과정에서 알루미늄과 실리콘과의 열팽창계수 차이로 인한 bowing현상 감소를 위해 알루미늄 층의 두께를 감소시켜 bowing현상을 감소여부를 확인하였다. 알루미늄 층의 두께가 얇아질수록 bowing현상이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 태양전지 제조 후 시간이 지남에 따라 bowing 현상이 감소하였으며 24시간 이후에는 변화가 미비했다.

알루미늄 층의 두께가 얇아질수록 BSF 형성의 어려움을 가져왔고 BSF층이 얇아질수록 태양전지의 전기적 특성에 악영향을 끼쳐 효율 감소를 확인하였다.

## 참 고 문 헌

1. Vichai Meemongkolkiat, Kenta Nakayashiki, Dong seop Kim, Radovan Kopecek, Ajeet Rohatgi "Factors Limiting the Formation of Uniform and Thick Aluminum-Back-surface Field and Its potential", journal of the electrochemical society,153 (1) G53-G58(2006)
2. A. Schneider, C. Gerhards, P. Fath, E.Bucher, R.J.S. Young, J.A. Raby, A.F. Carroll "BOW REDUCING FACTORS FOR THIN SCREENPRINTED MC-SI SOLAR CELLS WITH AL BSF" :IEEE

2002

3. Frank Huster "ALUMINIUM - BACK SURFACE FIELD: BOW INVESTIGATION AND ELIMINATION" 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona, 6-10 June 2005 Pre-Print, 2AO.2.1
4. M.A. Green, solar cells: operating principles, Technology and System Applications, University of New South Wales, Kensington, New south Wales, 1982.