

박형 결정질 실리콘 태양전지에서의 휨현상 감소를 위한 알루미늄층 두께 조절

백태현*, 홍지화**, 임기조*, 강기환***, 강민구***, 송희은***

*충북대학교 대학원 전기공학과(baek_th@naver.com, kjlim@cbnu.ac.kr), **충북대학교 대학원
반도체공학과(hongji8884@hanmail.net), ***한국에너지기술연구원(ghkang@kier.re.kr, mgkang@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*** Min Gu Kang*** 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(ghkang@kier.re.kr, mgkang@kier.re.kr, hsong@kier.re.kr)

Abstract

Crystalline silicon solar cell remains the major player in the photovoltaic marketplace with 80 % of the market, despite the development of various 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 materials 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 the silicon wafer is, the worse bow phenomenon is induced. The bow phenomenon is observed when two or more layers of materials with 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 less amount of paste applications, we observed that the bow could be reduced by up to 40% of the largest value with 120 micron thickness of the wafer even though the conversion efficiency decrease by 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 layer application.

Keywords : Thin silicon solar cell, Bow, BSF(back-surface-field)

Submit date : 2012. 6. 4. Judgment date : 2012. 6. 4. Publication decide date : 2012. 6. 26

Communication author : Hee-eun Song(hsong@kier.re.kr)

기 호 설 명

- V_{oc} : 개방전압
- J_{sc} : 단락전류밀도
- I_{sc} : 단락전류
- FF : 곡선인자(Fill Factor)
- SEM : Scanning electron microscope
- PECVD : Plasma enhanced chemical vapor deposition
- BSF : back surface field

1. 서 론

현재 전 세계 태양광 산업의 80%정도는 결정질 실리콘을 기반으로 제작되고 있다.[1] 결정질 실리콘 태양전지는 실리콘의 풍부함과 비교적 간단한 공정과정, 높은 광 변환효율 등 여러 가지 이점을 가지고 있다. 하지만 비교적 높은 생산 단가를 가지는데 이는 태양전지 value chain중 실리콘 웨이퍼가 차지하는 가격의 비율이 약 60%로 매우 높기 때문이다.[1] 따라서 결정질 태양전지 생산단가를 줄여 가격 경쟁력을 향상시키기 위해 사용되는 웨이퍼 두께를 감소시키면서 우수한 효율을 유지하는 것이 필요하다. 하지만 얇은 웨이퍼를 사용할 경우 후면전극으로 사용하는 알루미늄과 실리콘 사이의 열팽창계수 차이로 인해 기판의 bowing 현상이 발생하며 이러한 bowing 현상은 태양전지 모듈제조 공정에서 웨이퍼의 파손을 증가를 야기한다.

본 연구에서는 상용 태양전지의 기판($200\mu\text{m}$)보다 얇은 $120\mu\text{m}$ 웨이퍼를 사용하여 bowing 현상 발생하였으며, 태양전지 제조 공정시 발생하는 bowing 현상을 감소시키기 위해서 후면 전극 두께를 가변하였다. 이를위해 후면 전극을 형성할 때 사용하는 알루미늄 페이스트의 용매 함량을 가변하여 알루미늄 후면전극의 두께를 조절하였고 알루미늄 층의 두께가 태양전지의 bowing 현상과 전기적 특성에

미치는 영향에 대해 분석하였다.

2. Bow 현상에 대한 이론적 고찰

결정질 실리콘 태양전지의 bowing 현상은 소성 공정의 냉각 과정에서 발생한다. 이는 고온에서 진행되는 소성 과정에서 알루미늄($\alpha=23\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)과 실리콘($\alpha=7.6\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)의 열팽창 계수[2]의 차이로 인해 알루미늄이 실리콘보다 더 많은 팽창을 하기 때문이다. 고온 열처리 과정 중 알루미늄은 용융온도($\approx 577^\circ\text{C}$)[1]에서 녹아 액체 상태로 존재하게 되어 stress에 영향을 주지 않아 bowing 현상에 영향을 주지 않는다. 하지만 그림 1에서 볼 수 있듯이 냉각 과정에서 발생하는 stress는 웨이퍼에 휨 현상을 일으킬 수 있다. 냉각 과정에서 알루미늄-실리콘 합금 층은 열 수축단계를 거치게 되며, 이 단계에서 Si-Al 합금영역은 탄성한계보다 더 큰 stress를 받아 실리콘 기판에 bowing 현상을 야기한다.[3]

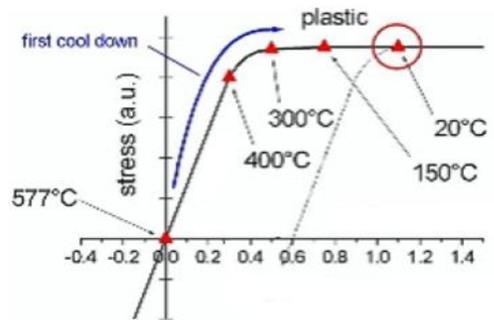


Figure 1. Schematic stress-strain diagram of the AlSi rear contact on cooling down after firing[3]

3. 실험 방법

본 실험에서는 Czochralski로 방법으로 제조된 두께 $200\pm 10\mu\text{m}$, 비저항 $0.5\sim 3\Omega\cdot\text{cm}$, 면적 $156\times 156\text{mm}^2$ 의 p-type 단결정 실리콘 기판을 사용하여 태양전지를 제작하였다. $120\mu\text{m}$ 의 얇은 웨이퍼는 NaOH 용액으로 식각하여 제

작하였다. 태양전지 제작 과정은 표1에 나타내었다.

Table1. Crystalline silicon solar cell fabrication procedure with various aluminum layer thickness

실험순서	실험	
표면조직화	KOH(수산화 칼륨), DI water, IPA(이소프로판올)	
도핑	POCl ₃ (면저항 50 Ω/□)	
후면 접합분리	HF(불산), HNO ₃ (질산)	
반사방지막	PECVD SiNx (굴절률2.2)	
금속 전극형성	Rear	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 Solar simulator Vernier callipers	

첫 번째로 표면조직화 공정은 KOH와 IPA (Isopropyl alcohol), DI water 혼합용액을 사용하여 랜덤 피라미드 구조를 형성하였다. 기판의 표면 조직화 공정 이후 확산로에서 POCl₃와 O₂를 주입하여 도핑 공정을 수행하였으며 50Ω/□의 면저항을 갖는 emitter층을 형성하였다. 후면접합 분리를 위해 HF와 HNO₃ 용액을 혼합하여 웨이퍼의 후면을 약 3μm 식각하였다. 반사방지막 증착을 위해서 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition)를 이용하여 굴절률 2.2, 80nm 두께의 SiNx(질화실리콘)막을 형성하였다. Screen printing 방법을 사용하여 전, 후면 전극을 형성하였고 후면 전극으로 사용되는 Al paste에 용매를 혼합하여 paste의 점도를 가변시켰다. 이 후 전면 전극은 Ag paste를 이용하였으며 인쇄 후 belt furnace를 사용하여 전·후면 동시 소결을 진행하였다. 소결 공정 후 알

루미늄 층의 두께를 각각 35μm, 30μm, 25μm, 20μm으로 제작 하였다.

태양전지 제작완료 후 PASAN사의 solar simulator를 이용하여 태양전지의 변환효율(η), 개방전압(V_{oc}), 단락전류밀도(J_{sc}), 충전율(FF)와 같은 전기적 특성을 분석하였다. 또한 태양전지에서의 bowing 정도를 측정하기 위해 vernier callipers를 이용하였으며 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 태양전지 단면을 관찰하였다.

4. 결과 및 고찰

그림 2는 후면 전극 두께를 가변하면서 태양전지를 제작하였을 때 vernier callipers를 이용해 bowing 정도를 측정 한 값을 나타낸다. 일반적인 상용 알루미늄 페이스트를 그대로 사용하였을 때 후면 전극의 두께는 35μm이고 bowing은 7.3mm였다. 이 bowing 값은 모듈 제작 시 태양전지의 bowing이 3mm 이하인 점을 감안할 때 심각한 파손을 일으킬 수 있다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 알루미늄 층의 두께가 감소할수록 bowing 현상이 점차 감소함을 알 수 있다. 120μm 두께의 실리콘 태양전지 모듈 제조를 위해서는 알루미늄 층의 두께가 20μm이하일 때 모듈 제작시 bowing이 문제가 되지 않을 것으로 여겨진다. 소성 공정 중 발생하는 bowing 정도는 식(1)로 나타낼 수 있다.[3,4] 식(1)을 통해 알루미늄 층의 두께(d_{Al})가 감소할수록 bowing이 감소함을 알 수 있는데 이는 그림 2에서 나타난 실험 결과와 일치한다.

$$\delta = \frac{\frac{3}{4}L^2(\alpha_{Al} - \alpha_{Si})(577^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})(d_{Al} + d_{Si})}{d_{Al}^2(4 + \frac{6d_{Si}}{d_{Al}} + 4(\frac{d_{Si}}{d_{Al}})^2) + (\frac{E_{Si}}{E_{Al}})(\frac{d_{Si}}{d_{Al}})^3 + \frac{E_{Al} t_{Al}}{E_{Si} t_{Si}}} \quad (1)$$

- δ : bowing
- L : 태양전지 길이
- α_x : TCE 열팽창 계수
- d_x : 층 두께
- E_x : 탄성계수

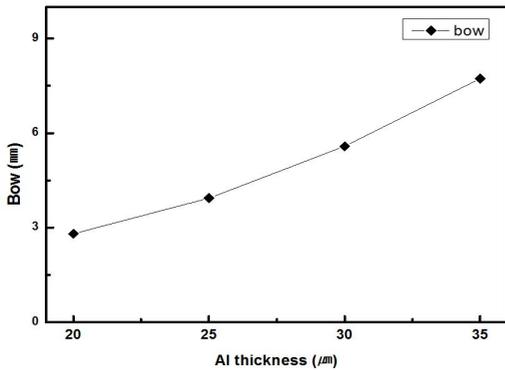


Figure 2. BOW measurement of the silicon solar cell with various Al thicknesses on rear side

그림 3은 태양전지 제작 후 경과 시간에 따른 bowing 정도를 측정했다. Bowing 현상은 태양전지 제작 후 시간에 경과함에 따라 점차 감소한다. 태양전지 제작완료 후 12시간까지는 bowing 현상의 감소폭이 매우 큰 경향을 보였으며 24시간 이후에는 감소폭의 변화가 거의 없음을 확인할 수 있었다. 또한 알루미늄 층의 두께가 두꺼울수록 bowing 정도의 감소폭이 더 증가했다. 시간의 경과함에 따라 알루미늄 금속 입자간의 상호결합 인장강도가 시간이 경과함에 따라 변해 bowing 정도에 영향을 준 것으로 판단된다.[3]

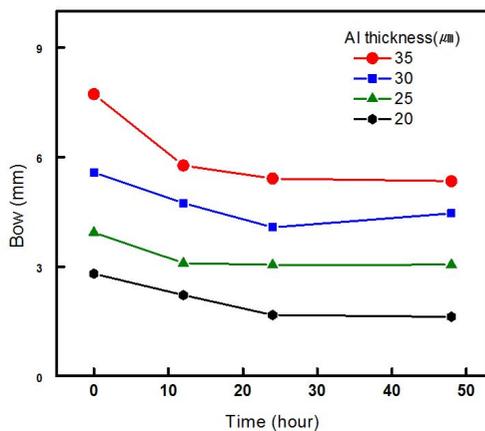


Figure 3. BOW measurement in process of time after fabricating the silicon solar cells with 20, 25, 30 and 35 μm rear Al thickness

표 2는 태양전지 제작 후 solar simulator 를 이용해 측정한 태양전지의 전기적 특성을 보여준다. 전반적으로 알루미늄 층의 두께가 감소할수록 V_{oc} , J_{sc} , FF가 감소하는 경향을 보였으며 이로 인해 광 변환효율 또한 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 알루미늄의 두께가 30μm에서 25μm로 감소했을 때 전기적 특성 변화는 미미했다.

Table 2. Illuminated electrical characteristics of the silicon solar cell depending on the rear Al thicknesses

Rear side thickness	J_{sc} (mA/cm ²)		V_{oc} (V)		FF(%)		Eff(%)	
	ave*	best	ave*	best	ave*	best	ave*	best
35μm	35.18	35.32	0.620	0.621	78.0	78.5	17.0	17.1
30μm	34.88	35.07	0.619	0.619	77.6	78.3	16.7	16.9
25μm	34.96	35.19	0.619	0.619	77.4	77.8	16.7	16.8
20μm	34.68	34.73	0.613	0.614	76.3	76.6	16.2	16.3

그림 4는 SEM을 이용해 측정한 태양전지의 알루미늄 단층 이미지를 보여준다. 형성된 알루미늄 층의 두께는 용매 혼합비를 알기 위해 수행한 선형실험 결과와 거의 일치했으며, 알루미늄 층의 두께가 각각 20μm, 25μm, 30μm, 35μm 였을때 BSF층의 두께는 각각 2.3μm, 4.3μm, 4.3μm, 5.9μm로 측정되었다. 이를 통해 알루미늄 층의 두께가 감소할수록 후면전계(BSF) 두께도 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 식 2를 통해서도 이해될 수 있다 [4,5]. 그림 4에서 나타낸 것과 같이 태양전지 후면에 인쇄된 알루미늄 층의 감소는 후면 BSF층의 두께를 감소시키기 때문에 광 생성된 전자의 수집확률을 감소시켜 단락전류밀도(J_{sc})가 감소한다. 이는 태양전지 효율에 감소를 가져온다.

또한 BSF층의 두께와 균일한 도핑농도는 V_{oc} 에 영향을 미칠 수 있다.[6] 본 실험

에서는 알루미늄 층의 두께가 감소할수록 V_{oc} 이 감소하였다. 하지만 알루미늄 층의 두께가 $20\mu\text{m}$ 와 $25\mu\text{m}$ 에서는 같은 개방전압을 갖았다. 이는 그림 4(C)에서 볼 수 있듯이 균일한 BSF층의 형성이 이루어지지 않아 발생한 것으로 보인다.

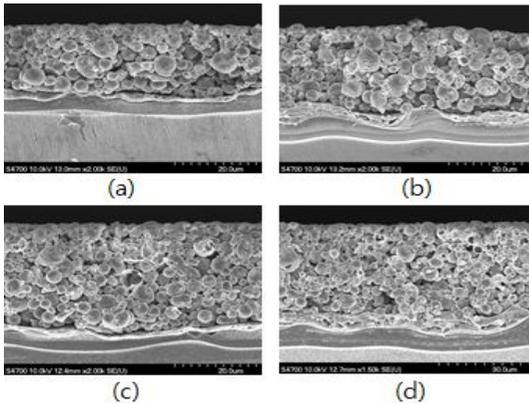


Figure 4. Cross-sectional SEM image according to the aluminum thickness of (a) $20\mu\text{m}$, (b) $25\mu\text{m}$, (c) $30\mu\text{m}$, (d) $35\mu\text{m}$.

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

t_{Al} 알루미늄층의 두께,

ρ_{Al} 알루미늄의 밀도,

P_{Si} 실리콘 밀도

$F(T)$ 합금형성 온도점에서의 액상중 Si at%,

$F(T_o)$ 공정온도에서의 Si at%

5. 결 론

$120\mu\text{m}$ 두께의 박형 결정질 실리콘 웨이퍼를 이용한 태양전지 제조 공정에서 알루미늄과 실리콘과의 열팽창계수 차이로 인한 bowing 현상의 감소를 위해 알루미늄 층의 두께를 가변시켰다. 알루미늄 층의 두께가 얇아질수록 bowing 현상이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 또한 태양전지는 제조 후 시간이 경과함에 따라 bowing 현상이 감

소하였으며 24시간 이후에는 bowing 현상 변화가 미미했다. 그러나 알루미늄 층의 두께가 얇아질수록 BSF층도 얇아져서 효율이 감소되는 것을 확인하였다

향후 실험 계획으로는 BSF 형성에 영향을 미치지 않으면서 bowing 현상을 해결할 수 있는 방안을 찾고자 한다.[3,7]

참 고 문 헌

1. Marketbuzz, Solarbuzz LLC, (2011)
2. Benita Finck von finckenstein "local back surface field on thin silicon low cost solar cell"
3. Frank Huster "aluminium - back surface field: bow investigation and elimination" 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona, 6-10 June (2005)
4. 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 336-337, (2002)
5. 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, G53-G58, (2006)
6. 이준신, 김경해 "태양전지 공학" 도서 출판 그린 50-52, (2007)
7. Y.F Wang, influence of cooling on the performance of silicon solar cells, SHU-SOLARE R&D joint-lab, shanghai university IEEE proceedings of 16th IPFA, china 622-624, (2009)