

고품질 실리콘 박막을 이용한 저가 고효율 실리콘 박막 및 a-Si:H/c-Si 이종접합 태양전지 개발

이 정철¹⁾, 임 충현¹⁾, 안 세진¹⁾, 윤 재호¹⁾, 김 석기¹⁾, 김 동섭²⁾, 양 수미³⁾, 강 희복³⁾, 이 보영³⁾, 이 준신⁴⁾, 송 진수¹⁾, 윤 경훈¹⁾*

1) 한국에너지기술연구원, 태양전지연구센터, *042-860-3415, y-kh@kier.re.kr

2) 세종대학교

3) LG 실트론, R&D Center

4) 성균관대학교 정보통신공학부

Development of low cost and high efficiency silicon thin-film and a-Si:H/c-Si hetero-junction solar cells using low temperature silicon thin-films

Jeong Chul Lee¹⁾, Chung Hyun Lim¹⁾, Sae Jin Ahn¹⁾, Jae Ho Yun¹⁾, Seok Ki Kim¹⁾, Dong Seop Kim²⁾, Sumi Yang³⁾, Hee Bok Kang³⁾, Bo young Lee³⁾, Junsin Yi⁴⁾, Jinsoo Son¹⁾, Kyung Hoon Yoon¹⁾*

1) Solar Cells Research Center, Korea Institute of Energy Research, *+82-42-860-3191, y-kh@kier.re.kr

2) Sejong University

3) R&D Center, LG Siltron Co., Ltd.

4) School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University

Key words : solar cells(태양전지), silicon thin-film(실리콘 박막), hetero-junction(이종접합)

Abstract : In this paper, silicon thin-film solar cells(Si-TFSC) and a-Si/c-Si heterojunction solar cells(HJ-cell) are investigated. The Si-TFSC was prepared on glass substrate by depositing 1-3 μ m thin-film silicons by glow discharge method. The a-Si:H/ μ c-Si:H tandem solar cells on textured ZnO:Al TCO (transparent conducting oxide) showed improved Jsc in top and bottom cells than that on SnO₂:F TCO. This enhancement of jsc resulted from improved light trapping effect by front textured ZnO:Al. The a-Si/c-Si HJ-cells with simple structure without high efficiency features are suffering from low Voc and Jsc. The improvement of front n/p and back interface properties by adopting high quality silicon-films at low temperature should be done both for increasing device performances and production cost.

I. 서론

2004년도 전 세계 태양전지 생산량은 1256MW로서, 2003년 744MW에 비해 67% 성장하여 급속한 시장증가세를 이어가고 있다. 태양전지의 재료별 점유율을 살펴보면, 단, 다결정 실리콘 기판을 소재로 한 c-Si 태양전지 1143MW (90%), 비정질 실리콘 박막 태양전지 55MW (4.4%), 기타 59MW (4.6%)로 여전히 c-Si의 시장주도도가 지속되었다¹⁾.

현재 생산되는 c-Si 태양전지의 효율은 15-21%이며, 사용되는 실리콘 기판의 두께는 200-350 μ m, 크기는 125mm \times 125mm, 150mm \times 150mm이다. 태양전지의 가격(\$/Wp)을 낮추기 위해서는 태양전지의 효율을 높이거나 제조비용(재료비, 인건비, 부대비용 등)을 줄이면 되는데, c-Si 태양전지의 경우 효율과 제조비용 측면에서 여러 가지 단점을 앓고 있는 실정이다. 그 중 가장 큰 문제점으로 실리콘 기판이 차지하는 가격비중

및 원재료 물질(poly-Si)의 공급부족을 들 수 있다. 또한 현재 몇몇 회사에서 생산되고 있는 20% 이상의 고 효율 태양전지(Sanyo HIT, Sunpower rear contacted solar cell)는 구조와 공정이 기존의 태양전지(15-17%)에 비해 복잡해 이에 따른 공정비용 상승이 가장 큰 걸림돌이다.

c-Si 태양전지가 갖는 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 종류의 태양전지가 연구되고 있다. 그 중 하나로 실리콘 박막 태양전지를 들 수 있는데, 실리콘 박막 태양전지는 기존의 c-Si 기판 대신에 유리나 플라스틱, 금속판과 같은 비교적 가격이 저렴한 기판위에 두께 수 μm 의 박막을 증착하여 태양전지를 제조함으로써, 기판의 가격을 낮출 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 대면적의 기판에 박막을 증착하여 in-line 공정으로 모듈을 제조함으로써 제조비용을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

다음으로 기존의 c-Si 기판을 이용한 이종접합 태양전지를 들 수 있는데, 이종접합 태양전지는 기존의 고온 열확산(thermal diffusion) 대신 저온(300°C)의 실리콘 박막을 진공 증착하여 pn 접합을 형성하여 제조된다. 따라서 thin-wafer의 사용이 가능하며, 박막 증착조건을 최적화함으로써 계면특성을 향상시킬 수 있고 고 효율화 또한 가능하다.

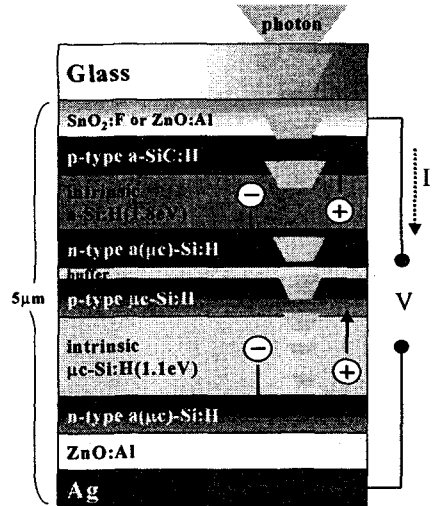
본 연구에서는 실리콘 박막 태양전지 및 a-Si:H/c-Si 이종접합 태양전지의 구조, 공정 및 특성에 대해 간단히 살펴보고, 향후 저가·고 효율화를 위해 해결되어야 할 기술적인 문제점에 대해 논의하고자 한다.

II. 실리콘 박막 태양전지

[그림 1]은 본 연구에서 제작된 a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ 적층(tandem)형 실리콘 박막 태양전지의 단면구조를 나타낸 것이다. 상부전지(top-cell)로 a-Si:H(1.8eV)을 하부전지로 $\mu\text{c-Si:H}$ (1.1eV)을 각각 사용하였다. 전면 투명 전도막으로는 ZnO:Al을 rf magnetron sputtering법으로 증착하고 습식식각을 통해 표면을 texturing 하였다. 상하부 전지간의 터널접합을 형성하기 위해 두께 5-10nm의 ZnO를 사용하였으며, ZnO/Ag 구조의 후면반사막을 사용하여 입사광의 내부 반사를 극대화 하였다. p형 및 n형 실리콘 박막은 13.56MHz PECVD를 이용하였으며, l형 실리콘

박막은 60MHz의 VHF(Very High Frequency) CVD를 이용하여 증착하였다. pin 실리콘 박막 증착시 기판온도는 300°C 이하로 유지하였다.

<표 1>은 전면 투명 전도막으로 textured ZnO:Al과 SnO₂:F(Asahi-U glass)를 각각 사용했을 때 a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ 적층형 박막 태양전지의 전기적 특성을 나타낸 것이다. Textured ZnO:Al에 제작된 태양전지의 변환효율은 12.3%(면적 0.25cm^2)로 SnO₂:F의 9.5%에 비해 매우 높았으며, 이는 개방전압(Voc) 및 단락전류밀도(Jsc)의 개선에 의한 것이다.



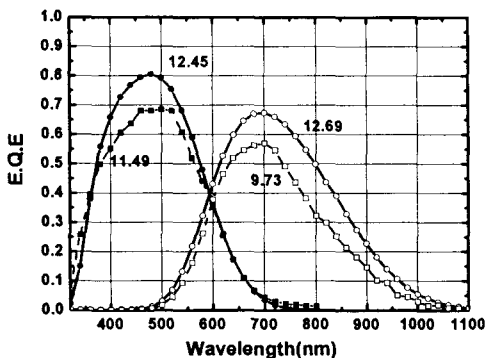
[그림 1] a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ 적층형 실리콘 박막 태양전지 구조.

<표 1> ZnO:Al과 SnO₂:F에 제작된 적층 실리콘 박막 태양전지의 전기적 특성 비교

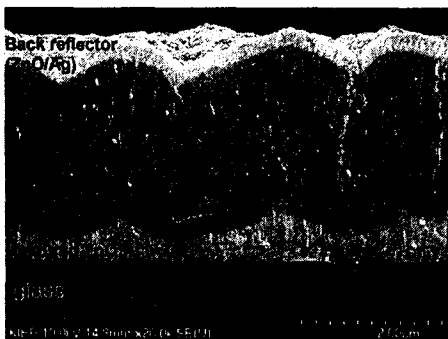
	ZnO:Al	SnO ₂ :F
Voc(V)	1.42	1.34
Jsc(mA/cm ²)	12.4	9.7
FF(%)	70.0	73.0
Eff.(%)	12.3	9.5

[그림 2]는 적층 태양전지에서 상부전지와 하부전지의 파장에 따른 수집효율을 나타낸 것으로서, ZnO:Al를 사용할 경우 상부 및 하부전지의 수집효율이 증가함을 알 수 있다. ZnO:Al을 사용한 태양전지의 단락전류 밀도 상승은 광 포집(light trapping) 향상에 의한 것으로 분석된다. 실리콘의 경우 광 흡수계수가 다른 태양전지 물질(CdTe, CuInSe₂, GaAs 등)에 비해

낮으므로, 입사광의 90% 이상을 흡수하기 위해서는 최소 50 μm 이상의 두께가 요구된다. 따라서 두께 수 μm 이하의 실리콘 박막 태양전지에 있어 광 포획기술은 태양전지의 고효율화를 위한 핵심이 되고 있다. 실리콘 박막 태양전지에서 광 포획은 투명전도막 표면에서의 입사광의 회절을 증가시키고 광 흡수층을 투과한 장파장 영역의 빛을 후면 반사막(back reflector)를 이용해 최대한 실리콘 광 흡수층으로 반사시킴으로써 가능하다. Textured ZnO:Al의 경우 SnO₂:F에 비해 표면 roughness가 우수하여 전파장 영역에서 입사광의 회절투과도가 높으며 이로 인해 적층태양전지의 상부전지 및 하부전지의 단락전류 밀도가 상승한 것으로 분석된다. [그림 3]은 적층 태양전지의 SEM 단면 사진으로서 ZnO:Al 표면 거칠기가 태양전지의 morphology에 영향을 줄을 알 수 있다.



[그림 2] ZnO:Al(circle) 및 SnO₂:F(square)에 증착된 a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ 적층형 실리콘 박막 태양전지의 양자효율 비교



[그림 3] a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ 적층형 실리콘 박막 태양전지 SEM 단면사진

III. a-Si/c-Si 이종접합 태양전지

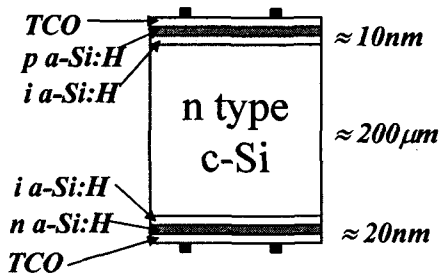
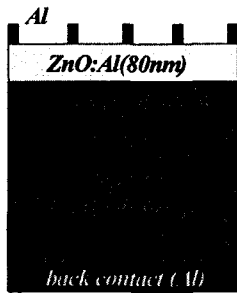
[그림 4]는 본 연구에서 제조된 이종접합 태양전지와 일본 Sanyo사의 21% 효율을 갖는 HIT(Heterojunction with Intrinsic Thin layer) 태양전지^[2]의 구조를 비교해 나타낸 것이다. 본 연구에서는 Sanyo HIT 태양전지와는 달리 기판으로 CZ p형 c-Si (100)을 사용하였다. 표면 texturing을 제외하고는 고효율 구조(no intrinsic buffer, no BSF)를 사용하지 않았으며 공정 또한 300 $^{\circ}\text{C}$ 이하의 저온에서 이루어 졌다. <표 2>의 태양전지 전기적 특성비교에서 나타나 있듯이, Sanyo HIT 태양전지에 비해 본 연구에서 제조된 Simple HJ(Hetero-Junction) 태양전지는 낮은 개방전압(0.561V)과 단락전류 밀도(30.3mA/cm²)를 나타내었다. 태양전지의 개방전압은 전후면 계면 특성과 밀접한 상관성을 갖는데, Sanyo의 HIT 태양전지의 경우 전후면 재결합 속도를 줄이기 위해 p/i, n/i의 이종 HIT 구조를 적용함으로써 높은 개방전압을 얻은 것으로 분석된다. 단락전류 밀도는 실리콘 표면 texturing, n a-Si:H emitter 및 TCO에서의 광학적 흡수 및 기판의 소수캐리어 수명(lifetime)에 의해 결정된다. [그림 5]의 IQE와 R(반사도)에서 나타내었듯이 단파장 영역에서의 IQE 감소는 전면 투명전도막과 a-Si:H에서의 광 흡수에 의한 것이며, 장파장에서의 IQE 감소는 소수캐리어 collection loss에 의한 것으로서 BSF(back surface field)형성의 의해 개선 할 수 있을 것으로 분석된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 차세대 저가·고효율 태양전지로 주목받고 있는 실리콘 박막 태양전지 및 a-Si/c-Si 이종접합 태양전지를 제조하고 특성을 살펴보았다. 실리콘 박막 태양전지는 고가의 c-Si 기판을 사용하지 않고 박막 형태로 제조할 수 있다는 장점이 있으나, 아직까지 변환효율이 기존의 c-Si 태양전지에 비해 낮은 것이 대량 보급의 가장 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 앞서 간단히 살펴보았듯이, 태양전지의 고효율화를 위해서는 tandem 또는 triple의 적층형이 요구된다. 그러나 실리콘 박막이 갖는 광학적 특성으로 인해 태양전지의 변환효율을 높이기 위해서는 실리콘 광 흡수층의 고품질화뿐만 아니라 입사광

의 효율적인 포집(trapping)이 반드시 선행되어야 한다.

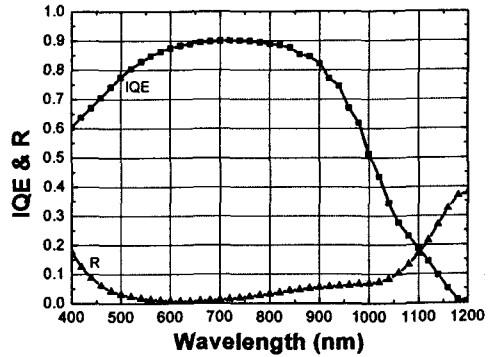
a-Si/c-Si 이종접합 태양전지 또한 공정 및 구조상의 장점으로 인해 전 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나, 고 효율화를 위해서는 Sanyo사의 HIT와 같이 다소 복잡한 구조가 불가피하며, 그에 따른 공정비용이 문제시 된다. 따라서 c-Si 실리콘 기판과의 계면특성을 향상시키기 위한 공정 및 구조 개발이 요구된다. 대면적 공정에서 발생하는 전 후면 전극형성시 고온 공정 또한 저온에서 형성된 a-Si/c-Si 계면특성에 심각한 문제를 야기 시키므로 이에 대한 기술적 인 해결이 이루어 져야 한다.



[그림 4] 본 연구에서 제작된 simple structure a-Si/c-Si 이종접합 태양전지(상) 및 Sanyo의 21% HIT 태양전지(하) 구조

<표 2> Simple HJ 태양전지와 Sanyo HIT 태양전지의 전기적 특성 비교

	simple HJ	Sanyo HIT
Voc(V)	0.561	0.717
Jsc(mA/cm ²)	30.31	38.6
FF(%)	73.5	77.0
Eff.(%)	12.5	21.3
Area(cm ²)	1.0	100



[그림 5] 이종접합 태양전지 IQE 및 반사도(R)

참고문헌

- [1] PV News, Photon International, 2005
- [2] T. Sawada, N. Terada, S. Tsuge, et al, First WCPEC, Dec. 5-9, 1994, Hawaii, p. 1219.