

박막형 Si태양전지를 위한 후면반사층 ZnO:Al 최적화

*이 승윤¹⁾, 지 광선²⁾, 어 영주³⁾, 이 해석⁴⁾, 이 헌민⁵⁾, 이 돈희⁶⁾

Optimization of Back Reflector ZnO:Al thin film for a-Si:H thin film Solar Cells

*Seung-Yoon Lee, Kwang-Sun Ji, Young-Joo Eo, Hae-Suk Lee, Heon-Min Lee, and Don-Hee Lee

Key words : thin film(박막), Si(실리콘), Solar Cells(태양전지), Photovoltaic(태양광), Back Reflector(후면반사층), ZnO(산화아연), TCO(투과전도성산화막)

Abstract : 비정질 Si박막 태양전지의 후면 반사층을 위한 ZnO:Al TCO박막을 RF Magnetron Sputtering 방법으로 증착하였으며 이의 전기적, 광학적 특성 및 구조를 최적화하였다. Sputtering의 공정변수인 증착 RF 파워, 기판온도, 타겟-기판 거리, 증착압력을 변화시켜 ZnO:Al 단일막의 전기적, 광학적 특성을 최적화 하였고, 이를 소면적 태양전지 셀 및 모듈에 적용하였다. 그 중 증착 RF파워 및 압력이 단일막의 전기적, 광학적 특성에 타겟-기판거리는 박막의 균일도에 큰 영향을 주었다. 압력에 따른 박막의 치밀도를 SE EMA방법으로 정량화하였고, 광학적, 전기적 특성과 연관하여 해석하였다. ZnO:Al 박막의 물성을 최적화하여 태양전지 셀에 적용한 결과 두께 80nm에서 가장 큰 Jsc의 증가를 보였고, 적용 전에 비해 약 18%의 광변환효율의 증가를 얻었다. 최적화된 태양전지 셀의 광변환효율은 9.9%, 모듈 효율은 7.4%였다.

Nomenclature

n : refractive index
k : extinction coefficient

subscrip

ZnO:Al :aluminium doped zinc oxide
SE :spectroscopy ellipsometry
PECVD : plasma enhanced chemical vapor deposition
RT : reflectance transmittance
Voc: open circuit voltage
Jsc : short circuit current
BR : back reflector

1. 서 론

21세기에 들어 고유가 및 지구온난화의 시대에 직면하여, 태양전지에 대한 관심이 급속히 증대되고 있다. 그 중 비정질 Si 박막에 기반한 박막형 Si 태양전지의 제조 원가는 1.0\$/W (전력당 비용) 선에 가장 근접한 태양전지로 원재료 수급문제에 영향 받지 않는 차세대 태양전지의 주역 중 하나로 주목받고 있다. 하지만, 비정질 Si 박막은 밴드갭이 약 1.7~1.8eV로서 광흡수 스펙트럼에서

600nm이상이 되면 그 흡수율이 급격히 떨어져 800nm이상의 빛은 거의 흡수하지 못하므로 태양광의 에너지 변환효율에 한계가 있다¹⁾. 또한, 비정질 Si 박막태양전지에는 Staebler-Wronsky 효과라는 광열화 현상이 일어나므로 흡수층의 두께를 증가시키는데 한계가 있다. 비정질Si과 더불어 차세대 태양전지의 한 요소인 마이크로결정질(microcrystalline 혹은 nanocrystalline) Si 박

-
- 1) LG Electronics Advanced Research Institute
E-mail : sylee101@lge.com
Tel : (02)526-4971 Fax : (02)575-1403
 - 2) LG Electronics Advanced Research Institute
E-mail : ksji1101@lge.com
Tel : (02)526-4971 Fax : (02)575-1403
 - 3) LG Electronics Advanced Research Institute
E-mail : dicaprioE@lge.com
Tel : (02)526-4975 Fax : (02)575-1403
 - 4) LG Electronics Advanced Research Institute
E-mail : semilee@lge.com
Tel : (02)526-4580 Fax : (02)575-1403
 - 5) LG Electronics Advanced Research Institute
E-mail : hmlee@lge.com
Tel : (02)526-4486 Fax : (02)575-1403
 - 6) LG Electronics Advanced Research Institute
E-mail : leedh@lge.com
Tel : (02)526-4548 Fax : (02)575-1403

막은 밴드갭이 1.1eV로서 거의 모든 태양광파장을 흡수할 수 있으나, 전자밴드구조가 간접전이 방식으로 흡수율이 낮아 효과적인 광흡수를 위해서는 수 μm 이상의 흡수층 두께가 필요하다. 하지만, 현재 양질의 마이크로결정질 박막을 증착하는 기술로는 그 생산성이 떨어지므로, 한정된 두께에서 광흡수를 극대화시키기 위한 기술(light trapping)은 박막 Si 태양전지의 효율증대를 위해 매우 중요한 요소로 많은 연구가 진행 중이다⁽¹⁾.

본 연구에서는 비정질 Si 박막 태양전지에서 광흡수를 좀더 높여주기 위한 후면반사층용 ZnO:Al⁽²⁾의 단일박막을 최적화 하고 이를 실제 소면적 태양전지 셀 및 모듈에 적용하였다. 스퍼터링 조건을 최적화 하여 후면반사층 ZnO:Al 박막을 적용한 결과 예상대로 단락전류(J_{sc})가 14.4mA/cm²에서 17mA/cm²로 증가하였고, 그로 인해 광변환효율 역시 8.1%에서 9.9%로 증가하였다. 또한 200x200mm²의 모듈에 적용시 7.4%의 효율을 얻을 수 있었다.

2. 실험방법

ZnO:Al 박막은 기판크기 200mm x 200mm용의 RF magnetron sputtering 방법에 의해 증착 되었다. 단일 박막 최적화를 위한 실험의 기판으로 두께 1.1mm의 sodalime glass가 사용되었다. 스퍼터 타겟으로는 2 wt% Al 함량의 ZnO:Al 타겟이 사용되었으며 크기는 300mm x 300mm 였다. 박막의 전기적, 광학적 물성 및 균일도를 최적화하기 위한 스퍼터의 실험조건 범위는 아래 표1.과 같다.

타겟물질	ZnO:Al (2wt%)
타겟-기판간 거리(mm)	53~86mm
RF power (W)	250~800W
가스 종류 / 유량	Ar 5~25sccm
증착압력	1~10 mTorr
기판온도	상온, 150°C

Table. 1 스퍼터 실험 조건 범위

박막의 광학적 물성 및 두께를 측정하기 위해 타원분광기(SE) 및 Spectrophotometer를 사용하였고, 전기적 물성을 측정하기 위해 mapping이 가능한 4-point probe를 사용하였다.

태양전지 셀과 모듈의 Si 흡수층은 p층, i층, n층을 각각 다른 챔버에서 증착할 수 있는 클러스터방식의 PECVD에서 제작되었다. 태양전지 셀과 모듈을 위한 기판으로는 SnO₂:F TCO층이 증착된 Glass기판이 사용되었으며, 모듈제작을 위해 SHG-YVO₄ 및 YAG Laser를 장착한 Laser Scribe가 사용되었다⁽³⁾. 이렇게 제작된 셀과 모듈은 태양광의 spectrum을 모사하여 광변환 효율을 측정하는 Solar Simulator를 사용하여 태양전지 셀 및 모듈의 광변환효율 및 Voc, Jsc, 등을 측정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 단일막 최적화

Fig.1은 가스 유량 5sccm, 증착압력 1 mTorr에서의 타겟-기판간 거리, RF power 및 기판온도에 따른 증착된 ZnO:Al 박막의 비저항을 측정한 결과이다. 타겟-기판간 거리에 따른 비저항 결과에서는 일관된 경향을 발견하지는 못했다. 단지 박막의 균일도에서는 많은 차이가 있어 76.25mm의 거리에서 두께 균일도 5%이내의 결과를 얻을 수 있었다. RF 파워에 따라서는, 파워가 높아질수록 비저항값이 낮아져 800W에서 가장 낮은 3.6x10⁻⁴ ohm.cm의 값을 얻을 수 있었다. 이는 ZnO:Al 박막의 이론적 한계 비저항인 1x10⁻⁴ ohm.cm⁽⁴⁾에 근접한 값이다. 상온 및 150°C의 기판온도에 따른 비저항의 차이는 타겟-기판거리에 따라 달라졌지만 전체적으로 큰 차이는 보이지 않았다.

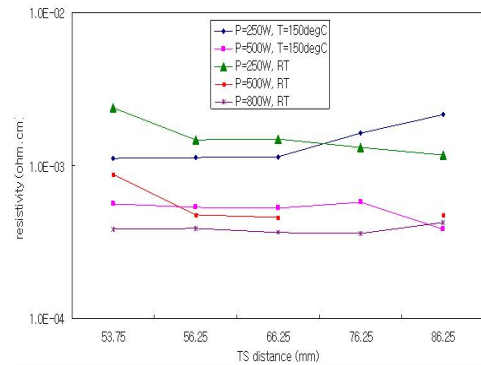
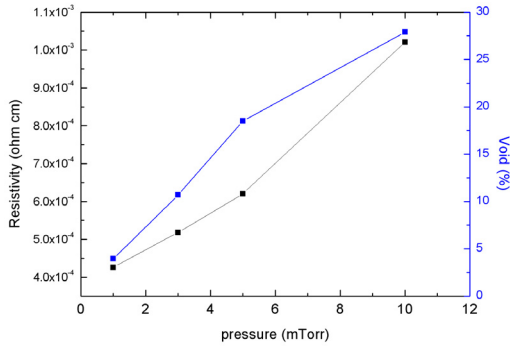


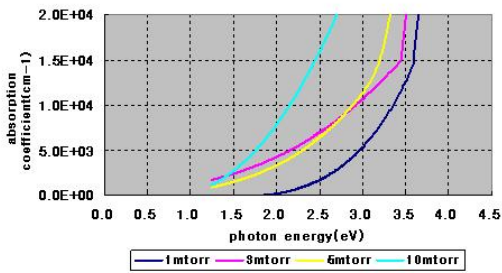
Fig.1 타겟-기판간거리(TS distance), RF 파워(P), 기판온도(T)에 따른 비저항(resistivity) 결과

다음으로는 압력에 따른 광학적, 전기적 특성을 알아보았다. 압력에 따른 미세구조의 변화 및 그에 따른 광학적, 전기적 특성의 변화는 보고된 바 있다⁽⁵⁾. 일반적으로 ZnO의 스퍼터링 증착시 압력이 높아지면 미세구조의 치밀도(compactness)가 떨어지면서 전기적, 광학적인 특성이 변화하는 것이 알려져 있다. 본 연구에서는 증착압력 변화에 따른 이러한 미세구조의 변화와, 광학적특성의 변화를 알아보기 위해 SE측정시 EMA(Effective Medium Approximation)방법을 사용하였다. Fig.2 (a)는 증착 압력에 따른 비저항과 SE EMA방법을 이용하여 분석된 막내 Void함량을 나타낸 것이다. 증착압력이 증가하면서 void의 함량이 증가했고, 비저항 역시 증가하였다. 이는 박막의 치밀도가 감소하면서 캐리어(carrier)의 이동도가 감소한 것이 주요 원인이라고 생각된다. Fig.2 (b)에서는 압력이 증가함에 따라 가시광 영역에서의 흡수도가 증가함이 보여지는데, 이 역시 박막의 치밀도와 연관되어 있는 것으로 보인다. ZnO:Al 박막에서 가시광에서의 흡수율이 증가하는 것은 태양전지의 광변환층

인 Si 박막에서의 흡수를 줄이는 결과를 가져오므로 바람직하지 못하다. 이 결과들로 볼 때, 압력이 낮을수록 치밀한 미세구조를 얻을 수 있으며, 더 우수한 전기적, 광학적 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.



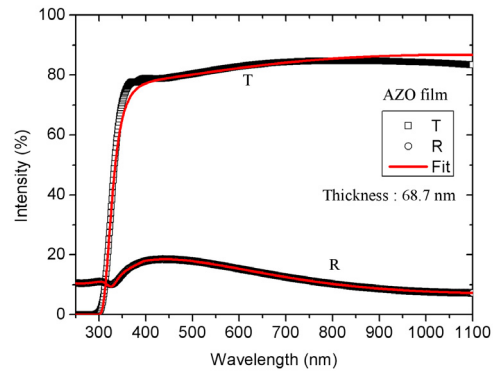
(a)



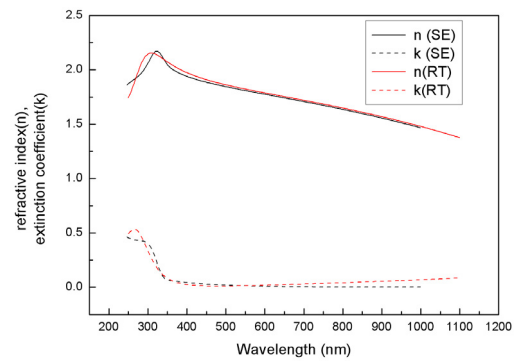
(b)

Fig.2 (a) 증착압력에 따른 Void(%) 및 비저항(resistivity)결과, (b)증착압력에 따른 흡수도(absorption coefficient) 결과

이렇게 최적화된 단일박막의 투과도 및 반사도를 Spectrophotometer를 사용하여 Fig.3(a)와 같이 측정하였다. Si 박막태양전지에서 주로 사용하는 400~1000nm의 파장에서 투과도가 매우 높은 결과를 나타내었다. 이렇게 측정된 투과도와 반사도로부터 파장에 따른 박막의 굴절율을 계산할 수 있었다. Fig.3(b)에서는 이렇게 투과-반사도(R-T법)로부터 계산된 굴절율과 SE법으로 측정된 굴절율을 비교하였다. Fig.3(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 SE에 의해 측정된 광학적 특성이 RT법에 의해 측정된 값과 크게 다르지 않은 것을 알 수 있었다.



(a)



(b)

Fig.3 (a) 최적화된 ZnO박막의 파장에 따른 투과도(T) 및 반사도(R) spectrophotometer에 의해 측정됨, (b) SE 및 RT법에 의해 측정된 ZnO박막의 n,k값.

3.2 태양전지 후면반사층으로 적용

이렇게 전기적, 광학적 특성에서 최적화된 ZnO:Al 박막을 박막 비정질Si 태양전지의 후면반사층(BR)으로 적용하였다.

Fig.4는 ZnO:Al 후면반사층의 두께에 따른 태양전지의 주요 성능지수 중 Jsc와 광변환효율의 결과이다. 예상했던 바와 같이 ZnO:Al의 적용은 Voc, FF보다는 주로 Jsc에 큰 영향을 주었다. BR ZnO:Al층 적용 전 14.4mA/cm²였던 Jsc값은 두께가 증가함에 따라 증가하여 80nm일때 17.1mA/cm² 최대값을 보인 후 다시 감소해 약 16mA/cm²로 포화되는 경향을 보였다. 최대 Jsc값을 나타낸 ZnO:Al 80nm가 적용된 태양전지는 적용되기전 효율인 8.1%에서 약 18%증가한 9.9%의 효율을 나타내었다.

이렇게 최적화된 셀을 이용하여 200x200mm²의 모듈을 제작하였다. Fig.5는 이 모듈의 전류전압 곡선(I-V Curve)결과로 광변환효율은 7.4%였다.

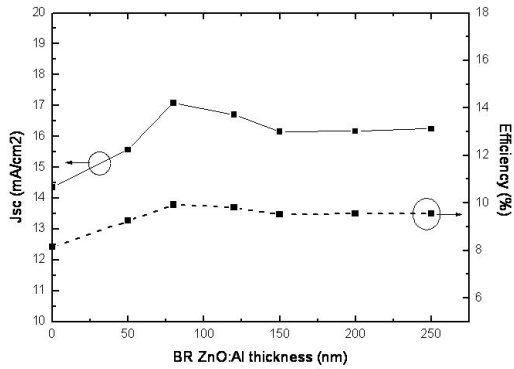


Fig.4 비정질Si 박막형 태양전지의 후면반사층 ZnO:Al의 두께에 따른 Jsc 및 광변환효율 (Efficiency)값.

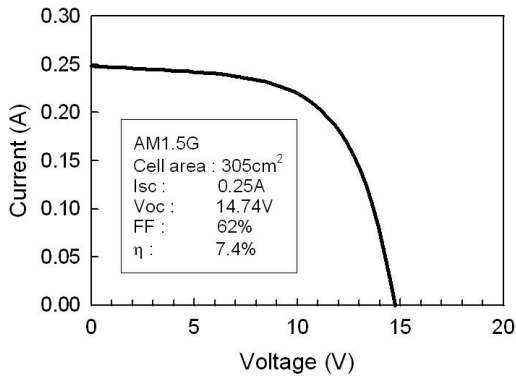


Fig.5 본 연구에서 최적화된 ZnO:Al BR을 적용한 모듈의 I-V 곡선

4. 결론

RF Magnetron Sputtering방법을 이용하여 비정질 Si 박막태양전지용 BR ZnO:Al 공정을 단일막의 전기적, 광학적 물성의 관점에서 최적화하였고, 이를 태양전지 셀 및 모듈에 적용하였다.

증착시 RF 파워가 클수록, 증착압력이 낮을수록 ZnO:Al 박막은 우수한 특성을 보였으며, 균일도 관점에서 가장 좋은 타겟-기판간 거리가 선택되었다. 기판의 온도는 본 연구에서는 그리 큰 영향을 미치지 않았다. 또한 압력이 높아짐에 따른 치밀도를 SE EMA방법에 의해 정량화하고, 그에 따른 전기적, 광학적 특성을 연관시킬 수 있었다. 이렇게 최적화된 ZnO:Al박막은 태양전지에서 사용하는 전 과정대에서 우수한 투과특성을 나타내었다.

최적화된 조건의 ZnO:Al을 비정질Si박막태양전지에 적용하여 두께를 최적화하였다. ZnO:Al박막두께 80nm에서 가장 우수한 Jsc특성을 보였으며 그로인해 효율이 BR ZnO:Al 적용전에 비해 약 18% 증가한 9.9%의 광변환효율이 얻어졌다. 또한, 본 공정을 이용한 모듈을 제작하였으며, 광

변환효율 7.4%을 얻을 수 있었다.

후기

본 연구는 지식경제부의 “유리기판 대면적 적층형 실리콘 박막 태양전지 모듈개발”의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Joachim Muller, Bernd Rech, Jiri Springer, Milan Vanecek, 2004 “TCO and light trapping in silicon thin film solar cells”, Solar Energy 77, pp917
- [2] Furong Zhu, Takashi Fuyuki, Hiroyuki Matsunami, Jai Singh, 1995 "Assessment of combined TCO/metal rear contact for thin film amorphous silicon solar cells", Solar Energy Materials and Solar Cells 39, pp1
- [3] H.-S. Lee, Y.-J. Eo, S.-W. Ahn, M.-S. Kwon, B.-S. Kim, H.-M. Lee, and D.-H. Lee, 2007, "LASER PATTERNING PROCESS FOR REDUCING LEAKAGE CURRENT IN p-i-n a-Si:H SINGLE JUNCTION MODULE FABRICATION", 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp2238
- [4] K Ellmer, 2001, "Resistivity of polycrystalline zinc oxide films: current status and physical limit", Journal of Physics D: Applied Physics 34, pp3097
- [5] Oliver Kluth, Gunnar Scho"pe, Ju"rgen Hu"pkes, Chitra Agashe, Joachim Mu"ller, Bernd Rech, 2003, "Modified Thornton model for magnetron sputtered zinc oxide: film structure and etching behaviour", Thin Solid Films 442, pp80