

고성능 비정질실리콘 박막태양전지를 위한 전후면 계면에서의 빛의 효율적 관리 기술

Light-managing Techniques at Front and Rear Interfaces for High Performance Amorphous Silicon Thin Film Solar Cells

강 동 원*
(Dong-Won Kang)

Abstract - We focused on light management technology in amorphous silicon solar cells to suppress increase in absorber thickness for improving power conversion efficiency (PCE). MgF_2 and TiO_2 anti-reflection layers were coated on both sides of Asahi VU (glass/ $SnO_2:F$) substrates, which contributed to increase in PCE from 9.16% to 9.81% at absorber thickness of only 150 nm. Also, we applied very thin MgF_2 as a rear reflector at n-type nanocrystalline silicon oxide/Ag interface to boost photocurrent. By reinforcing rear reflection, we could find the PCE increase from 10.08% up to 10.34% based on thin absorber about 200 nm.

Key Words : Amorphous silicon, Magnesium fluoride, Titanium dioxide, Anti-Reflection, Rear-reflection

1. 서 론

실리콘 박막 태양전지는 박막 형태로 제작하여 기존의 결정질 실리콘 태양전지에 대비 낮은 재료 소비 및 대면적화에 이점이 있다. 그러나 전력변환효율 (power conversion efficiency, PCE) 가 상대적으로 낮으며, 비정질실리콘의 경우 광열화에 의한 PCE 감소현상이 최근까지도 이슈라고 할 수 있다. 따라서, 가능하면 얇은 박막으로 소자를 구성하면서 효율을 유지 또는 증가시키는 기술이 주목받고 있다. 입사하는 태양광을 최대한 효율적으로 관리하여 반사 또는 기생흡수로 손실시키지 않고, 최대한 소자의 흡수층에 빛이 머무르게 하여 흡수율을 높이는 것이다 [1].

본 연구에서는 통상 300 nm 이상의 흡수층 두께를 이용하는 기존의 비정질 실리콘 태양전지에 대비하여, 흡수층의 두께를 33% 감소된 200 nm 이하로 제한하면서도 효율을 극대화하는 기술을 보고하고자 한다. 먼저, 통상적인 p-i-n 구조에 기초하여, 일반적으로 이용되는 Asahi-VU (glass/ $SnO_2:F$) 기판의 양면에 air 쪽은 MgF_2 ($n \sim 1.38$) 소재를 적용하여 air($n=1$)/glass($n=1.5$) 계면의 반사 손실을 줄이도록 설계하였고, $SnO_2:F$ 쪽은 $SnO_2:F$ ($n \sim 2.0$)와 그 위에 증착될 p층 실리콘 ($n=3.5-5.0$) 계면의 굴절률 차가 크기 때문에 TiO_2 ($n=2.4-2.7$) 소재를 이용하여 굴절률을 매칭하도록 설계하였다. 또한, 후면부에서는 n층과 Ag 반사막 사이에서의 반사를 극대화하기 위하여 유전체 소재인 MgF_2 를 전류의 흐름이 방해되지 않도록 수 nm 수준의 얇은 두께로 코팅하

여 후면 반사도를 증가시킬 수 있도록 하였다. 최근 우리 그룹에서 보고한 연구결과에서 비정질실리콘 산화막 태양전지를 대상으로 반사도의 향상 효과를 통해 전류의 향상이 나타난 바 있는데 [2], 비정질실리콘을 광흡수층으로 하는 태양전지에서 본 기술을 최적화하여 출력 특성을 검증하고자 한다. 실험 결과, 전면의 반사방지막과 후면의 반사도 향상 기술을 적용하여 200 nm의 상대적으로 얇은 광흡수층 두께를 유지하면서도 10.3% 이상의 고효율 박막태양전지 특성을 확인하였다.

2. 실험

먼저, MgF_2 와 TiO_2 반사방지막을 Asahi-VU (glass/ $SnO_2:F$) 기판의 양면에 증착하는 실험을 진행하였다. Glass-side에 MgF_2 타겟을 이용하여 약 90 nm 가량 스퍼터링 공정을 이용하여 제작하였고, $SnO_2:F$ -side에는 TiO_2 타겟을 이용하여 pure Ar 공정으로 40 nm의 두께로 제작하였다. 후면(n-nc-SiO:H/Ag)에 제작되는 MgF_2 신규 반사층의 경우 5 nm 이하의 수준에서 조절하여 증착되었다.

실제 반사방지효과 및 반사극대화 효과를 검증하기 위해서 실험을 통해 제작된 박막태양전지의 구조는 [MgF_2 (90 nm)/Asahi-VU (glass/ $SnO_2:F$)/ TiO_2 (40 nm)/AZO(10nm)/p-a-SiO:H(12 nm)/i-a-Si:H (150-200 nm)/n-nc-SiO:H (40nm)/ MgF_2 (2-5 nm)/Ag/Al]로 제작되었다.

3. 실험결과 및 토의

전면 전극의 양쪽 계면에서 발생하는 입사광의 손실은 태양전

* Corresponding Author : Dept. of Solar & Energy Engineering, Cheongju University, Korea.
E-mail: kang@cju.ac.kr

Received : September 2, 2016; Accepted : January 4, 2017

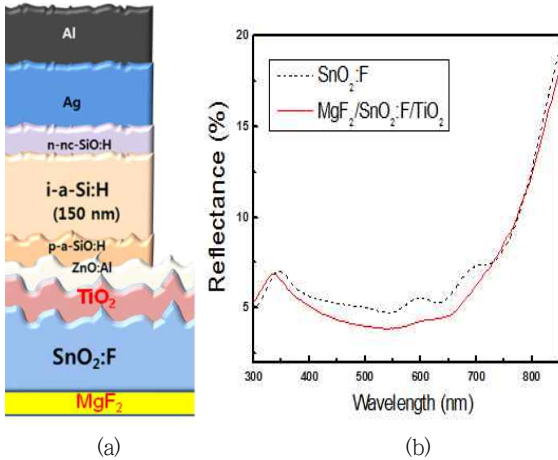


그림 1 (a) 본 실험에서 제작된 소자 구조, (b) MgF₂/SnO₂:F/TiO₂ ARC 구조를 갖는 소자의 반사도 측정 결과
Fig. 1 (a) A suggested device structure and (b) reflectance measurement of fabricated thin film solar cells with and without MgF₂ and TiO₂ ARC (anti-reflection coating)

지의 효율 향상에 있어서 반드시 저감시켜야 하는 부분이다. 본 연구에서는 Asahi-VU 기판을 기초로 MgF₂/Asahi-VU (glass/SnO₂:F)/TiO₂ 구조를 실험적으로 박막태양전지에 적용하였다. 먼저, 본 연구에서 제안하는 MgF₂/SnO₂:F/TiO₂ ARC 구조를 채용한 소자 구조는 그림 1(a)와 같으며, 반사방지막(ARC)이 없이 제작된 경우와 MgF₂/SnO₂:F/TiO₂ ARC 구조를 통해 제작된 소자의 반사도를 측정하여 그림 1(b)에 나타내었다. 레퍼런스 기판인 SnO₂:F에 비해서 ARC 구조를 적용할 경우, 반사도가 350-750 nm 구간에서 전체적으로 감소되는 결과를 얻었으며, 반사방지막으로의 역할을 검증할 수 있었다.

그림 2에서 나타나는 바와 같이, 제안된 ARC 구조로 전면부의 반사방지 구조를 구현할 경우, 150 nm의 얇은 광흡수층으로도 14.0 mA/cm²의 높은 광전류가 얻어졌으며, 반사방지구조를 통해서 무려 1.2 mA/cm² 이상의 단락전류(J_{sc}) 향상을 이룰 수 있음이 확인되었다. 기타 특성인 개방전압(V_{oc}) 및 곡선인자 (FF)의 경우 큰 변화 없으면서도 그 자체로 우수한 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. PCE는 9.16 %에서 9.81 % 까지 증가될 수 있었다.

그림 3의 양자효율 곡선을 보면 실제로 단락전류의 증가 현상을 더 자세히 확인할 수 있다. 단파장 대역(< 400 nm) 이하에서는 반사방지막 적용 이후에 양자효율이 약간 감소하고 있는데, 이는 전면계면에 증착된 TiO₂의 밴드갭 때문에 발생하는 흡수 현상이며 소자 관점에서 손실이다. 그러나 최대한 투과도를 확보해 낸 만큼, 또한 400 nm 이하의 단파장에서는 태양광 스펙트럼 상 단락전류의 손실은 미미한 반면, 400 nm 이상에서는 전파장 구간에서 양자효율의 증가를 확인할 수 있다. 입사광의 반사손실을 억제하여, 태양전지 내부로 진입하는 빛의 양이 늘어나게 되고, 이는 광흡수의 증가로 이어지게 된다.

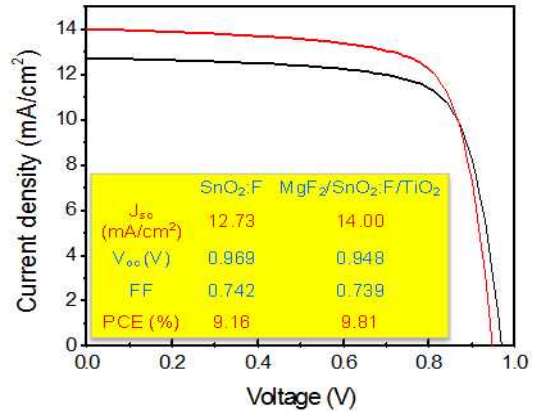


그림 2 레퍼런스 구조 (SnO₂:F)와 본 연구에서 시도된 MgF₂/SnO₂:F/TiO₂ 구조 기판에 제작된 소자의 출력 특성
Fig. 2 Output performance and I-V curves of fabricated devices with and without MgF₂ and TiO₂ ARC

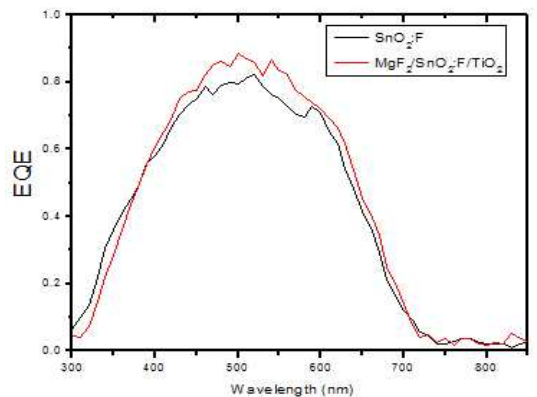


그림 3 제안된 3중구조의 MgF₂/SnO₂:F/TiO₂ 기판에 제작된 소자의 EQE 곡선 및 레퍼런스 소자와의 특성 비교
Fig. 3 EQE spectra of fabricated thin film solar cells with and without MgF₂ and TiO₂ ARC (anti-reflection coating)

박막태양전지의 효율을 더욱 극대화하기 위하여, 상기 전면 전극의 구조를 적용한 이후, 광흡수층의 두께를 200 nm로 증가시킨 소자의 특성은 그림 4에 나타나는 바와 같이, PCE 10.08 % (V_{oc}=0.956 V, J_{sc}=14.31 mA/cm², FF=0.736)로 향상되었다. 이 구조를 기초로 하여, 소자의 후면(n-nc-SiO:H/Ag) 계면에서 반사도를 극대화시켜서 더욱 높은 단락전류를 얻기 위해, MgF₂ 소재를 적용하였다. 단, 여기서 논의되어야 할 부분은 MgF₂ 소재는 전도성 물질이 아닌 유전체이므로 캐리어 수송을 위해 island 형태의 코팅을 이루어야 소자 관점에서 직렬저항의 증가를 피할 수 있다 [2]. 또한, MgF₂를 n-nc-SiO:H/Ag 계면에 적용하면 반사도의 증가 현상이 밝혀진 바 있는데 [2], 이를 소자에 적용하여 본 연구에서는 5 nm 이하의 MgF₂ 를 코팅하며 소자의 특성을 분석하였다. 그 결과, 약 2 nm 수준으로 코팅할 경우에 전반적으로

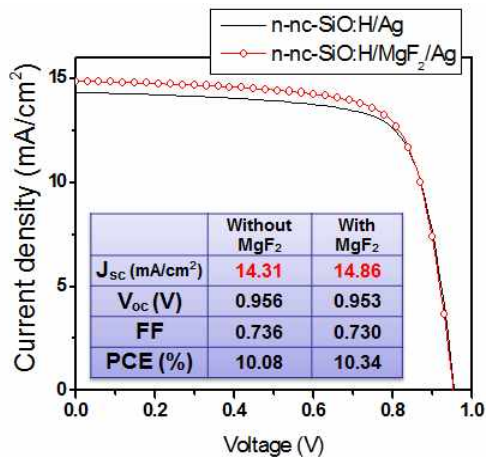


그림 4 신규 n-nc-SiO:H/MgF₂/Ag 후면 반사구조의 적용에 따른 박막태양전지의 전류 및 효율 향상

Fig. 4 Performance and I-V curves of fabricated thin film solar cells with employing n-nc-SiO:H/MgF₂/Ag triple rear reflector

PCE의 이득을 더 높게 이끌어 낼 수 있음이 밝혀졌다. 그림 4와 같이, MgF₂ 소재를 후면 n-nc-SiO:H/MgF₂/Ag 구조를 형성할 시에, 단락 전류 값이 14.31 mA/cm²에서 14.86 mA/cm²으로 3.8 % 더욱 향상됨을 확인할 수 있다. 사실상 기존에 연구되었던 n-nc-Si:H/AZO/Ag 구조에서 낮은 굴절률을 갖는 n-nc-SiO:H의 개발로 n-nc-SiO:H/Ag 2중 구조로 기술의 흐름이 진전되어 온 상황에서 [3], 이 최적화된 구조에서 MgF₂를 이용하여 후면에서의 반사를 더욱 극대화한 것으로 판단할 수 있다. 또한 V_{oc} 및 FF의 손실이 매우 미미한 수준이어서, 전류의 향상으로 PCE의 향상을 이끌 수 있었다.

본 연구에서 구성한 전면 반사방지막과 후면의 신규 반사구조를 이용하여, 통상적인 300 nm 대비하여 약 200 nm의 상대적으로 얇은 두께로 구성된 박막태양전지의 PCE가 10.34 %에 이르렀으며, 가장 최근에 발표된 비정질실리콘 박막태양전지 연구결과 중에서 본 연구와 유사한 구조 및 같은 광흡수층 두께를 갖는 결과를 보면 PCE가 약 9 %에 이르고 있다 [4]. 이를 감안하면 본 연구그룹에서 보고하는 전면 및 후면의 입사광 관리 기술은 충분히 경쟁력이 있다고 판단되며 향후 고효율화 기술 개발의 연장선상에서 이용될 것이 예상된다.

4. 결 론

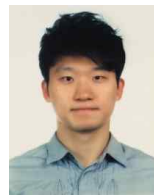
박막 실리콘 태양전지에서 전면의 반사손실 및 후면 전극에서의 흡수 손실을 최소화하기 위하여 전면 MgF₂/Asahi-VU (glass/SnO₂:F)/TiO₂ 구조를 설계하고, 후면에는 n-nc-SiO:H/MgF₂/Ag 3중 구조를 구현하여 입사광을 최대한 효율적으로 발전에 이용하도록 실험을 진행하였다. 광흡수층은 200 nm 이하로 유지하면서 최적화시킨 결과 초기 단락전류 값이 12.73 mA/

cm²에서 14.31 mA/cm²까지 큰 증가를 유도할 수 있었고 상대적으로 얇은 두께로 10.34%의 고효율 박막태양전지를 제작하였다. 이 기술은 향후 고효율화에 있어서 여러 가지 추가적인 응용기술에 기반이 될 것으로 판단된다.

References

- [1] F.-J. Haug and C. Ballif, Light management in thin film silicon solar cells, Energy Environ. Sci., 2015, 8, 824-837.
- [2] D.-W. Kang, P. Sihanugrist, and M. Konagai, Novel application of MgF₂ as a back reflector in a-SiO_x:H thin-film solar cells, Applied Physics Express 7, 082302 (2014).
- [3] S. Kim, H. Lee, J.-W. Chung, S.-W. Ahn, H.-M. Lee, n-Type microcrystalline silicon oxide layer and its application to high-performance back reflectors in thin-film silicon solar cells, Curr. Appl. Phys. 13 (2013) 743-747.
- [4] Ji-hwan Yang, Seung Yeop Myong, Koeng Su Lim, Reduction of the plasmonic absorption in the nanotextured back contact of a-Si:H solar cells by employing an n-SiO_x:H/LiF interlayer, Solar Energy Materials and Solar Cells, 132 (2015) 372-376.

저 자 소 개



강 동 원 (Dong-Won Kang)

1983년 9월 29일생. 2007년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2013년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2013~2015년 일본 동경공업대학 물리전자공학부 박사 후 연구원. 2015년~현재 청주대학교 태양광에너지공학과 조교수.

E-mail : kang@cju.ac.kr