

## 그라파이트 기판을 이용한 유연 박막 실리콘 태양전지 특성 향상

임경열<sup>1</sup> · 조준식<sup>2</sup> · 장효식<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 에너지과학기술대학원, <sup>2</sup>한국에너지기술연구원 태양광연구소

## Performance Improvement of Flexible Thin Film Si Solar Cells using Graphite Substrate

Gyeong-yeol Lim<sup>1</sup>, Jun-sik Cho<sup>2</sup> and Hyo Sik Chang<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University,  
Daejeon 34134, Republic of Korea

<sup>2</sup>Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Daejeon, 34129, Republic of Korea

(Received March 27, 2019 : Revised April 21, 2019 : Accepted April 24, 2019)

**Abstracts** We investigated the characteristics of nano crystalline silicon(nc-Si) thin-film solar cells on graphite substrates. Amorphous silicon(a-Si) thin-film solar cells on graphite plates show low conversion efficiency due to high surface roughness, and many recombination by dangling bonds. In previous studies, we deposited barrier films by plasma enhanced chemical vapor deposition(PECVD) on graphite plate to reduce surface roughness and achieved ~7.8 % cell efficiency. In this study, we fabricated nc-Si thin film solar cell on graphite in order to increase the efficiency of solar cells. We achieved 8.45 % efficiency on graphite plate and applied this to nc-Si on graphite sheet for flexible solar cell applications. The characterization of the cell is performed with external quantum efficiency(EQE) and current density-voltage measurements(J-V). As a result, we obtain ~8.42 % cell efficiency in a flexible solar cell fabricated on a graphite sheet, which performance is similar to that of cells fabricated on graphite plates.

**Key words** graphite, plasma-enhanced chemical vapor deposition, thin film silicon solar cell, flexible solar cell, nano-crystalline silicon.

### 1. 서 론

탄소 재료는 많은 매복 량과 우수한 열, 전기 전도성을 갖으며 다양한 응용이 가능한 재료로써 1,2차 전지(primary, secondary battery) 및 축전지(capacitor) 등 에너지 저장 기술 분야에서 많이 사용 되고 있다.<sup>1-3)</sup> 탄소 재료는 다양한 제조 방법과 목적에 따라 그래핀(graphene), 탄소 섬유(carbon fabric), 흑연(graphite) 등의 재료로 응용되며 구조체로써 많이 쓰이고 있지만 최근 전자 재료의 형태로도 많은 연구들이 진행되고 있다. 태양전지 분야에서 탄소 재료를 사용한 많은 연구들이 진행 되고 있

는데 특히 그라파이트를 기판으로 사용하거나 그래핀을 사용하여 전극으로 적용하는 등 연구들이 진행되고 있다.<sup>4-6)</sup> 그러나 탄소 섬유 복합재와 같은 재료는 우수한 성능에도 불구하고 상대적으로 높은 제조 비용과 낮은 에너지 변환 효율을 나타내고 있어 직조를 통한 면적 증대나 탄소에 세라믹 입자를 분산시킨 복합재료등의 방법들이 연구 되고있다.<sup>7,8)</sup>

그라파이트 기판을 이용하여 제작한 박막 실리콘 태양 전지의 특성을 확보하기 위해서는 기판 표면의 탄소 입자에 의한 높은 표면거칠기를 제거할 필요가 있다. 이 전 실험 결과에서, 플라즈마 화학 기상 증착법(plasma-

<sup>†</sup>Corresponding author

E-Mail : [hschang@cnu.ac.kr](mailto:hschang@cnu.ac.kr) (H. S. Chang, Chung-nam Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

enhanced chemical vapor deposition, PECVD)을 이용하여 실리콘 산화막과 질화막 계열의 배리어 막을 증착하여서 표면 거칠기를 100 nm 미만으로 감소시킬 수 있었다. 그 결과, 박막 실리콘을 균일하게 증착할 수 있었고, 비정질 박막 실리콘 구조의 태양전지에서 배리어 막 850 nm 적층 구조에서 7.3~7.8%로 최고 효율을 보였다.<sup>9)</sup> 실리콘 태양전지의 낮은 효율의 원인 중 하나는 비정질 실리콘이 구조상 많은 dangling bond를 가지고 있어 그로 인해 생긴 재결합이 태양전지의 효율에 영향을 미친다.<sup>10-12)</sup> 재결합을 낮추어 캐리어 수집 확률을 향상시키기 위한 방법으로는 비정질 실리콘에 수소를 첨가하거나(a-Si:H), 나노 또는 마이크로 결정구조를 가지는(nc-Si,  $\mu$ c-Si) 형태로 증착하여 재결합 수를 줄이는 방법이 있다.<sup>13,14)</sup>

본 연구에서는 그래파이트 기판에 제작된 박막 실리콘 태양전지의 효율 향상을 위해 미세 결정 구조인 nc-Si으로 태양전지를 제조 하여 비정질 실리콘 구조로 제작된 태양전지에 비해 개선된 효율을 얻었다. 또한 미세 결정 구조의 태양전지를 그래파이트 시트(graphite sheet)에 적용하여 유연(flexible) 태양전지 제작 가능성을 확인하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 탄소 기판 재료

미세 결정 구조의 실리콘 태양전지의 제작에 탄소 기판(graphite plate - Nippon Carbon Co. Ltd, "CCM-400C")과 유연(flexible) 태양전지에 적용 하기 위해 그래파이트 시트(graphite sheet - Panasonic, "EYGS121803")가 사용되었다. 태양전지는 5 cm × 5 cm의 크기로 제작하였다.

### 2.2 미세 결정 실리콘 태양전지

그래파이트 기판의 높은 표면거칠기를 제어와 탄소 입자에 의한 오염 방지를 위해 플라즈마 화학 기상 증착법(plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD)으로  $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x$ 의 적층 구조로 배리어 층을 쌓았다. 광 흡수층으로는 미세 결정 실리콘을  $\text{H}_2$ 와  $\text{SiH}_4$ 의 비율 조절을 통해 PECVD로 증착하였다. 증착 조건에 대한 미세 결정 구조는 지난 연구에서 확인하였으며<sup>15)</sup> 증착된 실리콘층의 라만 분석을 Fig. 1에 나타내었다. 라만 분석은 514 nm 파장의 레이저를 사용하였으며 비정질 실리콘과 미세 결정실리콘에 대하여 분석을 진행 하였다. Fig. 2에는 미세 결정 실리콘으로 제작된 태양전지의 모식도와 투과 전자 현미경(transmission electron microscope, TEM) 이미지를 나타내었다. 공정 순서는 그래파이트 기판에 배리어 층으로  $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x$ 을 적층하고 후면 전극으로 Ag/투명전극(Al doped ZnO, AZO)층을 형성하였다.

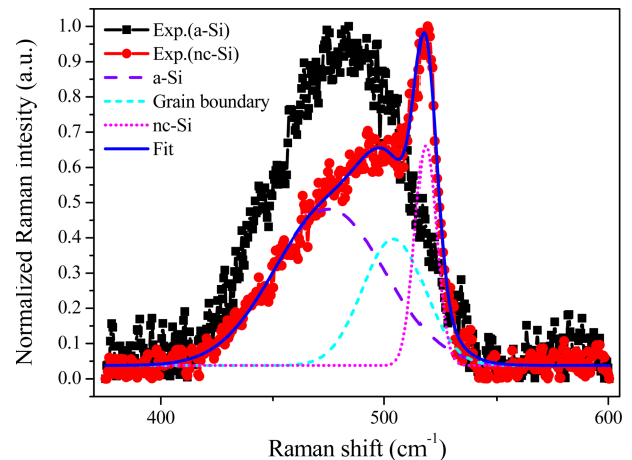


Fig. 1. Raman spectra of a-Si and nc-Si with a green laser of 514 nm wavelength.

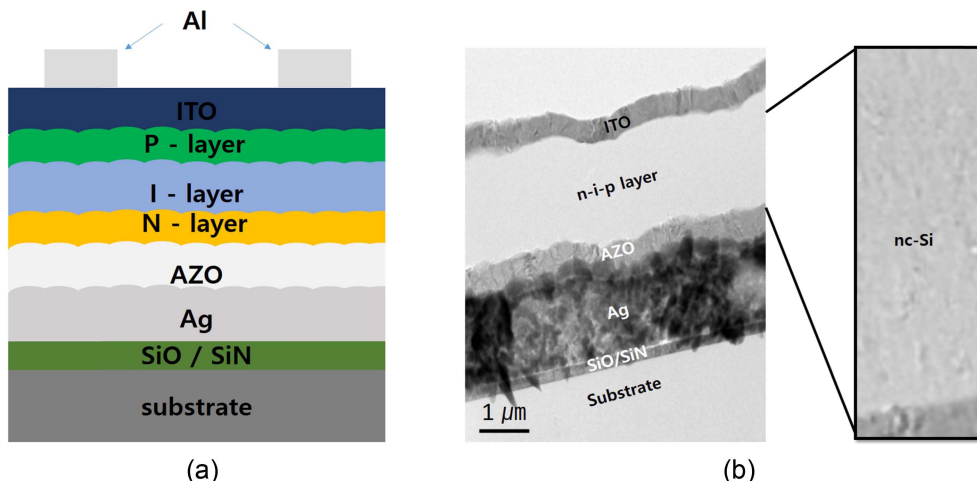


Fig. 2. (a) Schematic of nc-Si solar cell on graphite plate and (b) cross sectional TEM image.

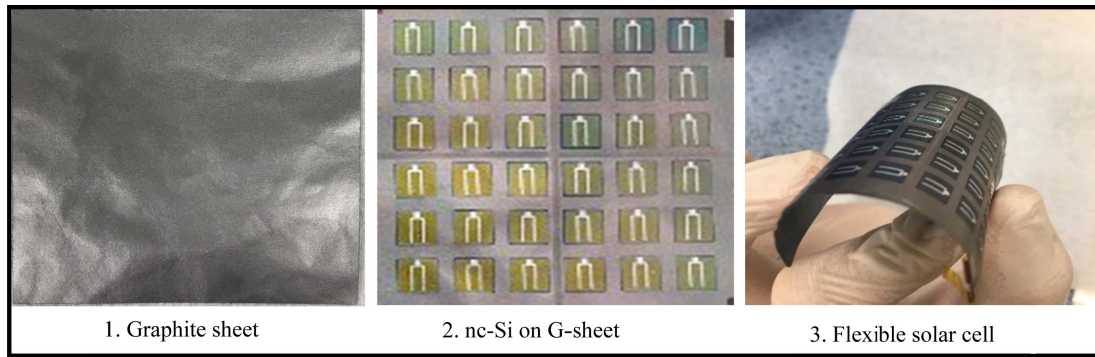


Fig. 3. Flexible solar cell on graphite sheet.

다음으로 광흡수층과 전자-정공 수집을 위해 N(phosphorus doped Si, N-layer), I(intrinsic silicon, I-layer), P(boron doped silicon, P-layer) 층을 PECVD로 각각 30 nm, 2,000 nm, 30 nm 두께로 쌓았다. 전면 전극은 인듐 주석 산화물(indium tin oxide, ITO) 층과 Al 전극 패턴을 형성하여 태양전지를 제작 하였다. 탄소 기판의 거칠기를 제어하기 위해 PECVD로 증착된 배리어 층 적층막은 순서에 상관없이 비슷한 효율을 보이지만 산화막(SiO<sub>x</sub> film) 내부의 산소로부터 전극으로의 혼입을 막기 위해서 SiO<sub>x</sub>/SiN<sub>x</sub> 순으로 적층하였다.

### 2.3 유연 태양전지(Flexible Solar cell)

유연(flexible) 태양전지에 응용하기 위해 그래파이트 시트에 같은 박막 실리콘 증착 공정(미세 결정 구조)을 진행하였다. 유연 태양전지 제작에 사용된 그래파이트 시트는 25 μm의 상용 시트가 사용되었다. 그래파이트 시트는 polyimide tape로 고정하여 진공 박막을 증착하였다. Fig. 3에는 그래파이트 시트를 기판으로 사용하여 제조된 유연 태양전지의 사진을 보여준다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 미세 결정 실리콘 태양전지

미세 결정 실리콘은 비정질 실리콘에 비해 상대적으로 우수한 안정성과,<sup>16)</sup> 높은 전도성,<sup>17)</sup> 높은 이동도<sup>18)</sup>를 가지고 있어 태양전지 효율 향상을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 비정질 실리콘 대신 미세 결정 실리콘 구조의 태양전지를 제작하였다. 미세 결정 실리콘 태양전지의 특성 분석을 위해 전류-전압 측정과 양자 효율 분석을 진행하였고 Fig. 4에 정리하였다. 양자 효율 곡선에서 배리어 층이 850 nm 적층 구조일 때 21.45 mA/cm<sup>2</sup>로 높은 단락전류 값을 나타내었고 이는 전류-전압 곡선에 상응한 결과를 나타낸다. 이러한 효율 차이는 이전 연구에서 알 수 있는데, 배리어 층을 850 nm 적층 하였을

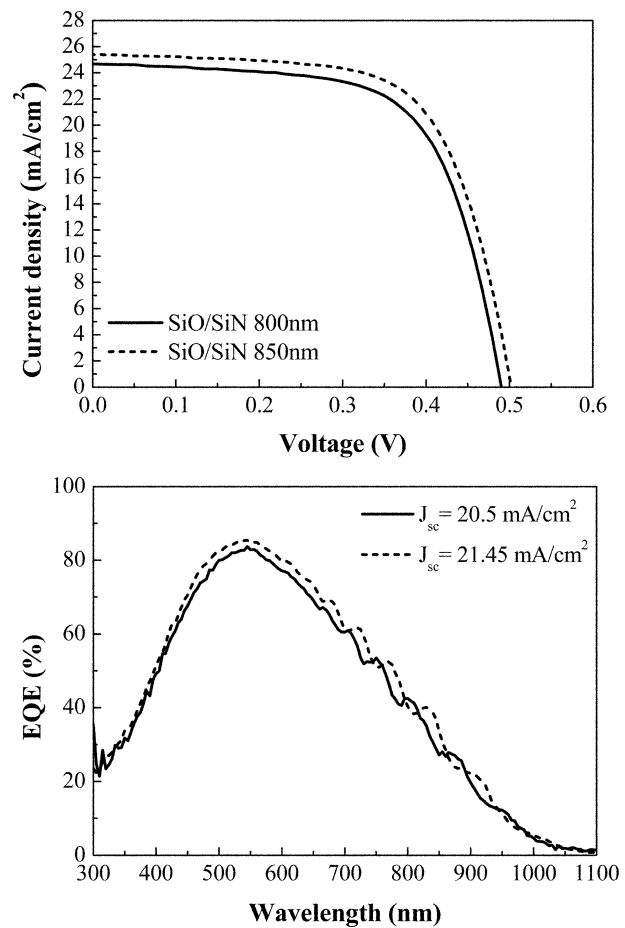
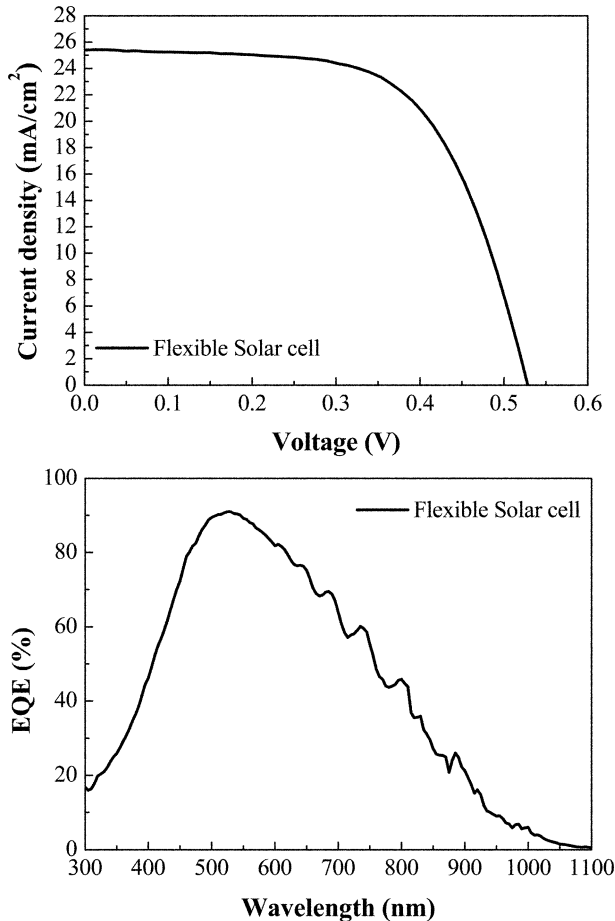


Fig. 4. (a) Current-voltage characteristics of nc-Si solar cell and (b) External quantum efficiency curves in graphite plate.

때 rms 표면 거칠기 값이 50 nm 수준으로 가장 낮은 값을 가져 태양전지 층의 두께 균일도가 향상되었고, 비정질 실리콘 구조에서 7.8%의 효율을 나타냈다.<sup>9)</sup> 마찬가지로 본 연구에서 제작된 미세 결정 실리콘 구조의 태양전지에서도 같은 경향을 나타내었다. 배리어 층이 850 nm의 두께를 갖을 경우 8.45%로 최고 효율이 나타났

**Table 1.** Characteristics of nc-Si solar cell.

nc-Si	Substrate	Barrier film	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/Cm <sup>2</sup> )	Fill Factor (%)	Efficiency (%)
1.	Plate	SiO/SiN 850 nm	0.502	25.393	66.343	8.456
2.	Sheet	SiO/SiN 850 nm	0.528	25.396	62.823	8.423

**Fig. 5.** Characteristics of flexible solar cells with (a) J-V measurement and (b) EQE analysis.

으며, 800 nm의 배리어 층 두께에서는 약간 낮은 7.89%의 효율로 배리어 층 두께에 따른 표면 거칠기 제어에 따라 효율에 영향을 보였다. 결과적으로, 이전 실험에서 배리어 층 두께에 따라 rms 표면 거칠기 값을 제어함으로써 850 nm의 배리어 층에서 가장 좋은 효율을 보였고 효율을 조금 더 개선하기 위해 비정질이 아닌 미세 결정 구조를 택함으로써 8.45%의 최고 효율을 확인할 수 있었다. 또한 탄소 기판의 특성상 고온에서도 기판의 변형없이 공정을 진행할 수 있기 때문에, 실리콘 층의 구조와 전극 형성에 대한 추가 연구를 통해 고온 공정에서 실리콘 결정화를 진행한다면 효율 향상이 가능할 것이다.

### 3.2 유연 태양전지

유연(flexible) 태양전지 제작을 위해 그래파이트 시트에 미세 결정구조의 태양전지를 적용 시켰다. 유연 태양전지의 특성 분석은 Fig. 5에 나타내었고 그래파이트 기판과 그래파이트 시트에 적용된 미세 결정 태양전지 특성 값들을 Table 1에 정리하여 나타내었다. 제작된 유연 태양전지의 최고 효율은 8.42%로 큰 효율 감소 없이 잘 제작된 것을 알 수 있다. 유연 태양전지의 제작은 얇은 두께의 그래파이트 시트를 사용하기 때문에 찢어질 위험이 있어 핸들링이나 진공 장비 사용에 다루기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 유연 태양전지의 제작에는 기판의 유연성과 더불어 내구성이 요구되며 안정적인 공정 방법과 모듈 패키징에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 탄소 기판을 이용한 박막 실리콘 태양전지 제작에 있어 비정질 실리콘 대신 미세 결정 구조의 실리콘을 PECVD로 증착하여 개선된 효율 8.45%를 달성하였다. 얇은 그래파이트 시트를 이용하여 제조된 미세 결정 박막 실리콘 태양전지는 단단한 그래파이트 기판을 이용했을 때와 유사한 8.42%의 효율을 확보하여 유연(flexible) 태양전지로서의 응용 가능성을 확인하였다.

## Acknowledgement

This work was supported by the Development of Material Parts Technology (No. 10043793) of Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT).

## References

1. E. Frackowiak and F. Beguin, *Carbon*, **39**, 937 (2001).
2. J. Wang and S. Kaskel, *J. Mater. Chem.*, **22**, 23710 (2012).
3. P. Simon and Y. Gogotsi, *Acc. Chem. Res.*, **46**, 1094 (2012).
4. M. F. Bhopal, A. Rehman, D. W. Lee and S. H. Lee, *J. Korean Phys. Soc.*, **66**, 730 (2015).
5. Z. Shi and A. Jayatissa, *Materials*, **11**, 36 (2018).

6. M. Czerniak-Reczulska, A. Niedzielska and A. Jędrzejczak, *Adv. Mater. Sci.*, **15**, 67 (2015).
7. X. Li, Z. Lv and H. Zhu, *Adv. Mater.*, **27**, 6549 (2015).
8. W. Xu, S. Choi, and M. G. Allen, in *Proc. 23rd IEEE Int. Conf. MEMS*, (Hong Kong, 2010), p. 1187.
9. Y. J. Cho, D. W. Lee, J. S. Cho, and H. S. Chang (in Korean), *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **29**, 505 (2016).
10. Z. E. Smith and S. Wagner, *Phys. Rev. Lett.*, **59**, 688 (1987).
11. C. Boehme, F. Friedrich, T. Ehara and K. Lips, *Thin Solid Films*, **487**, 132 (2005).
12. M. Fehr, A. Schnegg, C. Teutloff, R. Bittl, O. Astakhov and F. Finger, *Phys. Status Solidi A*, **207**, 552 (2010).
13. N. Wyrsh, C. Droz, L. Feitknecht, P. Torres, E. Vallat-Sauvain, J. Bailat and A. Shah, *J. Non-Cryst. Solids*, **299**, 390 (2002).
14. Y. Yuan, W. Zhao, J. Ma, Z. Yang, W. Li and K. Zhang, *Surf. Coat. Technol.*, **320**, 362 (2017).
15. J. S. Cho, E. S. Jang, D. Lim, J. H. Park and B. H. Choi, *Sol. Energy*, **159**, 444 (2018).
16. S. A. Filonovich, P. Alpuim, L. Rebouta, J. E. Bourée and Y. M. Soro, *J. Non-Cryst. Solids*, **354**, 2376 (2008).
17. Z. Li, X. Zhang and G. Han, *Phys. Status Solidi A*, **207**, 144 (2010).
18. C. H. Lee, A. Sazonov and A. Nathan, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 222106 (2005).