

이종접합 태양전지에서의 Bi-Layer 구조를 통한 향상된 개방전압특성에 대한 고찰

김흥래¹, 정성진¹, 조재웅¹, 김성현², 한승용², 수레쉬 쿠마르 둔겔³, 이준신³ 

¹ 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

² 성균관대학교 태양광시스템협동과정

³ 성균관대학교 정보통신대학

A Study on Improved Open-Circuit Voltage Characteristics Through Bi-Layer Structure in Heterojunction Solar Cells

Hongrae Kim¹, Sungjin Jeong¹, Jaewoong Cho¹, Sungheon Kim², Seungyong Han²,
Suresh Kumar Dhungel³, and Junsin Yi³

¹ Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

² Interdisciplinary Program in Photovoltaic System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

³ College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received September 1, 2022; Accepted September 3, 2022)

Abstract: Passivation quality is mainly governed by epitaxial growth of crystalline silicon wafer surface. Void-rich intrinsic a-Si:H interfacial layer could offer higher resistivity of the c-Si surface and hence a better device efficiency as well. To reduce the resistivity of the contact area, a modification of void-rich intrinsic layer of a-Si:H towards more ordered state with a higher density is adopted by adapting its thickness and reducing its series resistance significantly, but it slightly decreases passivation quality. Higher resistance is not dominated by asymmetric effects like different band offsets for electrons or holes. In this study, multilayer of intrinsic a-Si:H layers were used. The first one with a void-rich was a-Si:H(I₁) and the next one a-SiO_x:H(I₂) were used, where a-SiO_x:H(I₂) had relatively larger band gap of ~2.07 eV than that of a-Si:H (I₁). Using a-SiO_x:H as I₂ layer was expected to increase transparency, which could lead to an easy carrier transport. Also, higher implied voltage than the conventional structure was expected. This means that the a-SiO_x:H could be a promising material for a high-quality passivation of c-Si. In addition, the i-a-SiO_x:H microstructure can help the carrier transportation through tunneling and thermal emission.

Keywords: Bi-layer, a-Si:H, a-SiO_x:H, Stack layer, Wide bandgap, SHJ solar cell

1. 서론

오늘날 결정질 실리콘(c-Si) 태양전지는 태양전지 시장에서 주도적인 비중을 차지하고 있다. One-sun에서의 실리콘 태양전지의 이론적의 한계를 직면하여 현재 차세대 태양전지인 페로브스카이트 태양전지와 탠덤으로 쓰일 수

✉ Junsin Yi; Junsin@skku.edu

Copyright ©2022 KIEEME. 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.

있는 이종 접합 태양전지가 차지하는 비중이 높아지고 있다 [1-3]. 이종 접합 태양전지는 고품질의 표면 패시베이션과 접촉 성능으로 인해 현재 745 mV 이상의 높은 개방회로 전압(V_{oc})에 큰 이점이 있다. 이종 접합 태양전지의 장점을 극대화시키기 위해 계면 결함 밀도, 밴드 오프셋 및 밴드갭과 같은 매개변수의 변화와 벌크 실리콘 기판 상의 수소화 된 비정질 실리콘(a-Si:H)의 진성층의 구조 및 특성에 대한 최적화는 계속하여 발전되고 있다 [4,5]. 이종 접합 태양전지에서 캐리어 수송의 개선과 결정질 실리콘 웨이퍼 표면의 표면에서 우수한 패시베이션 형성은 전체적인 셀 효율에 영향을 가져온다. 또한 일부 참고 문헌에서는 실리콘 산화물을 사용하면 투과율이 향상되어 전류밀도(J_{sc})가 향상될 수 있다고 주장한다 [6-8]. 이종 접합 태양전에서의 전류 밀도의 개선을 위해 유전막(dielectric film)에서의 실리콘 산화물의 사용 이외에 실리콘 카바이드와 같은 넓은 밴드갭 물질을 일반적으로 증착에 사용된다 [9].

이종 접합 태양전지는 초반 도핑 층인 p,n층에서의 10 nm 보다 얇은 박막을 사용하여 200°C 의 낮은 온도에서의 공정을 하여 2000년대 중반에 c-Si와 도핑 층 사이에 수 나노미터의 얇은 수소화 된 비정질 실리콘(i-a-Si:H) 층을 삽입함으로써 상당한 전기적 특성 향상을 가져왔다 [10-11]. 추후 표면 재결합 밀도(D_{it})를 $10^{15} \text{ ev}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 부터 깨끗한 표면의 D_{it} 는 $10^9 \text{ ev}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 까지 줄임으로써 매우 낮은 표면 재결합 속도와 J_0 의 저하로 730 mV 이상의 디바이스를 형성되어왔다 [12-14]. V_{oc} 를 높이기 위해 진성 및 도핑 된 a-Si:H 층을 stack을 하여 선택적인 접촉(selective contact)을 형성하였는데, 이는 접촉 저항(ρ_c)

또는 selectivity $S_{10} = \log(kT / J_{0pc})$ 로 측정되었다. 두가지 전하 캐리어 유형중 하나는 추출될 수 있으며 다른 캐리어는 차단될 수 있음을 의미하게 되는데 이 구조를 통해 한 에너지(hanergy)는 150 μm 두께의 c-Si 웨이퍼의 면적 244 cm^2 인 셀에서 일반적인 구조의 이종 접합 태양전지보다 약 0.7% 향상된 750 mV의 개방전압 최고치를 달성하였다 [15].

본 논문에서는 비정질 실리콘층에서의 stack구조로 이종 접합 태양전지를 형성하였을 때 a-SiO_x:H의 사용과 PECVD에 의해 증착 된 고유 a-Si:H 막에 의한 a-Si:H/c-Si 계면 패시베이션을 고찰하며 a-Si/epi-Si 상에서의 결합에 대한 문제해결을 논하기로 한다.

2. 실험 방법

본 논문에서는 현재 사용되고 있는 비정질 실리콘 a-Si:H의 두께를 10 nm 이하로 고정하여 bi-layer구조로 이종 접합 태양전지를 형성하였을 때 n-c-Si와 a-Si:H의 사이에서의 epi결합에 대한 전기적 특성 저하와 V_{oc} 증가에 대한 추세를 연구하였다.

주로 이용되는 Czochralski wafer (resistivity 1 $\Omega\cdot\text{cm}$)를 기반으로 SDR (saw damage removal) 과정을 거친 후 RCA1과 RCA2 하여 웨이퍼 표면을 형성하였다. 이후 아 이오딘 처리를 하여 bulk lifetime를 WCT-120으로 측정하였다. 표면 texturing은 80°C에서 DIW 500 ml, KOH 7.5 gm와 additive 4.2 gm에서 진행을 하였으며 etching

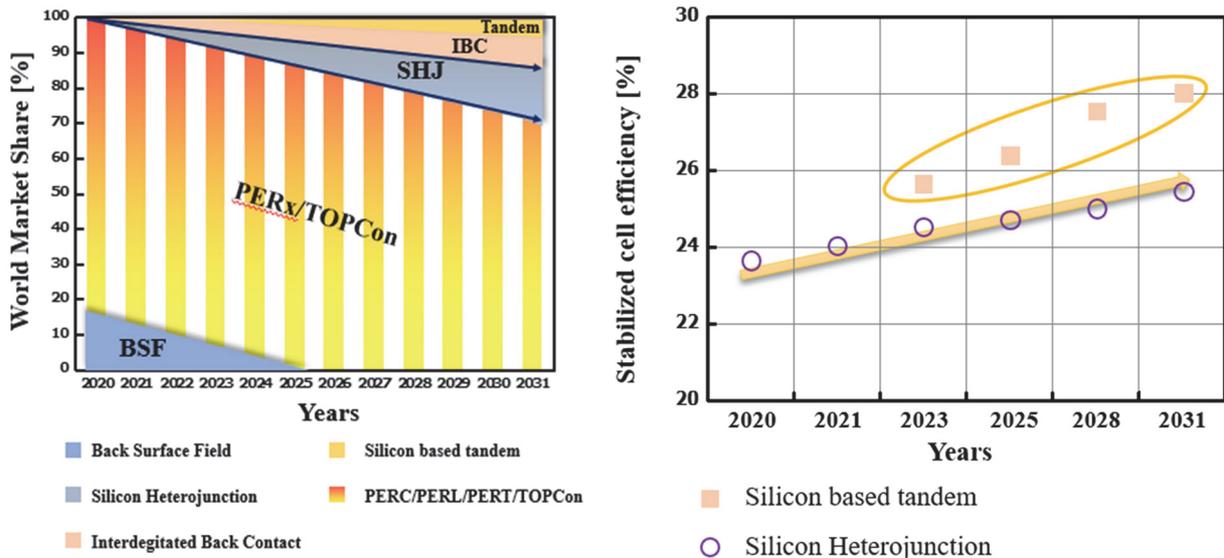


Fig. 1. The share of SHJ in the PV market and the efficiency of SHJ by year.

depth는 식 (1)과 같이 계산하였다. 표면 처리 이후 PECVD를 통한 <111>과 <100> 표면에서의 a-Si:H와 a-SiO_x:H에 대한 증착을 최적화하였으며 이후 simulation을 통한 bi-layer구조에서의 전체적인 cell의 전기적 특성 변화와 효율을 관찰하였다. 또한 수소와 산소비를 통한 광학적 밴드갭을 조정하였으며 아래 표 1과 같이 진행하였다.

$$Etching\ Depth\ (cm) = \frac{Etching\ Weight\ (g)}{Silicon\ Density\ (g/cm^3) \times Wafer\ Area\ (cm^2)} \times \frac{1}{2} \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 Bulk lifetime과 표면 처리

패시베이션에 앞서 웨이퍼의 벌크 lifetime을 측정하기 위해 SDR을 한 뒤 etching rate와 depth를 계산하여 표 2에 정리하였다. 온도는 70~75°C에서 진행하였으며 낮은 온도에서 SDR을 진행하여 비교적 depth가 낮음을 보여준다. 이후 SDR이 진행된 웨이퍼는 Iodine-Ethanol 표면

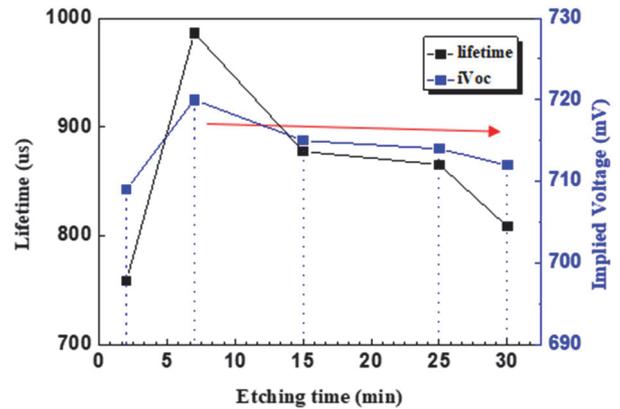


Fig. 2. The measurement for n-type bulk lifetime with Iodine passivation.

패시베이션을 통해 lifetime과 implied-V_{OC}를 측정하였다 (그림 2).

에칭 시간에 따른 Iodine-Ethanol 패시베이션을 한 후 7분 이상의 시간에서의 implied-V_{OC}는 saturation을 보였으며 이는 7분에서의 SDR조건이 최적화되었음을 나타낸다. SDR 이후 texturing은 KOH를 이용하여 random

Table 1. Different parameters involved in the a-Si:H fabrication.

Materials	Thickness (nm)	E·d (mm)	Temperature (°C)	Power (mW)	Pressure (Torr)
i-a-Si:H	Variation ~ 10	40	250	140	0.8
i-a-SiO _x :H	Variation ~ 10	60	250	20	0.2
p-a-Si:H	10	20	300	43	1.5
n-μc-SiO:H	10	20	300	30	1.5

Materials	SiH ₄ (sccm)	H ₂ (sccm)	CO ₂ (sccm)	B ₂ H ₆ (sccm)	PH ₃ (sccm)
i-a-Si:H	150	25	-	-	-
i-a-SiO _x :H	Variation	Variation	Variation	-	-
p-a-Si:H	5	45	0	9	-
n-μc-SiO:H	7	500	3	-	8

* E·d : Electrical distance

Table 2. Etching depth and rate before RCA cleaning.

Bare wafer(g)	After SDR(g)	Etching depth (μm)	Etching rate (μm/min)	Time (min)
0.71	0.599	0.97	0.065	2
0.68	0.5492	1.15	0.077	7
0.8	0.5891	1.85	0.123	15
0.82	0.535	2.50	0.167	25
0.81	0.513	2.61	0.174	30

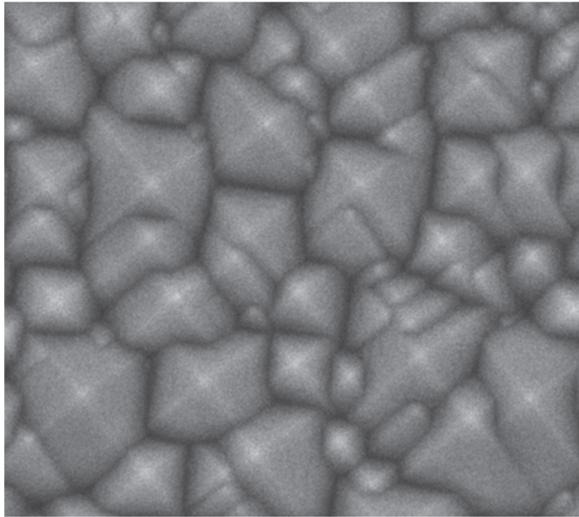


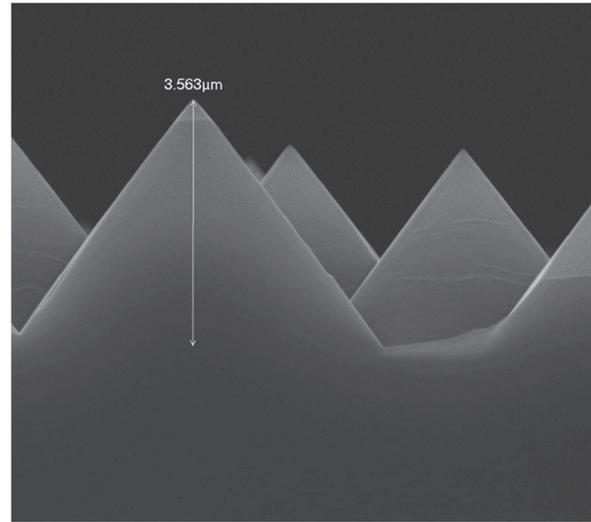
Fig. 3. The SEM measurement for texturing with KOH solution.

하게 형성하였다. 3~5 μm 의 피라미드의 형성을 scanning electron microscope (SEM)을 보아 확인하였다 (그림 3).

3.2 i-a-Si:H 단일막의 최적화

SDR이 진행된 이후 RCA cleaning을 하여 압력, 전극 간 거리, 가스비율에 따른 i-a-Si:H 증착을 통해 최적화 과정을 진행하였다. 수소함량에 따른 lifetime과 implied voltage를 보기위해 먼저 전극 간의 거리를 60 mm로 고정하여 $\text{SiH}_4:\text{H}_2$ 의 비율을 1:4, 1:5 그리고 1:6으로 설정하여 진행하였다 (그림 4). SiH_4 와 H_2 의 비율이 1:5에서 lifetime과 $i\text{-}V_{\text{oc}}$ 가 제일 높았으며 참고 문헌에 따르면 비정질 상에서의 패시베이션 특성이 우수하며 이때 보통 SiH_4 와 H_2 의 비율이 $\text{H}_2/\text{SiH}_4=4\sim6$ 의 값을 가진다 [16]. 이후 전극 간의 거리를 20~80 mm로 조정하여 i-a-Si:H의 단일막 특성이 최적화되는 지점을 찾았으며 압력에 따른 막 특성 또한 관찰하였다 (그림 5).

a-Si:H 박막의 유효 수명은 비정질 네트워크에 존재하는 총 H_2 함량에 따라 달라진다. 특히, 최고의 패시베이션 품질은 Si-H 결합 농도가 높고 Si- H_2 농도가 낮은 필름에서 나오게 되며 증착 압력과 H_2 희석 비율을 조정하여 최적의 필름을 얻을 수 있다 [17]. 본 연구에서의 SiH_4 와 H_2 의 비율은 1:5, 전극 간의 거리 60 mm와 압력 800 mTorr에서 최적화됨을 알 수 있었다. 증착 온도를 낮추면 Si- H_2 결합 농도가 높아지는 경향이 있어 전체 H_2 함량이 증가함에도 불구하고 막 패시베이션 품질이 저하되었으며 높은 수소 가스 흐름은 비정질-결정질 전이를 유도하여 필름 품질을 저하시킬 수 있다고 판단하였다.



3.3 산소 함유량에 따른 특성 변화와 시뮬레이션결과

단파장에서의 CO_2 의 함유량에 단파장에서의 refractive index와 extinction coefficient를 그림 4에 나타내었으며 본 실험에서는 i-a-Si:H의 두께를 10 nm의 환경에서 i-a-SiO_x:H와 i-a-Si:H를 bi-layer구조로 하였을 때 최적의 두께를 도출해보았다. Transmittance 측면에서의 a-SiO_x:H 5 nm와 a-Si:H 5 nm의 시뮬레이션 결과가 단파장 영역대에서의 이점을 보였으며 (그림 6, 7) 3 nm이하의 두께의 i-a-Si:H 또는 i-a-SiO_x:H는 증착에 있어 얇은 두께에 있어 기존의 최적화된 부분에서의 deposition rate를 낮게 진행하여야 하기 때문에 어렵다고 판단하였다.

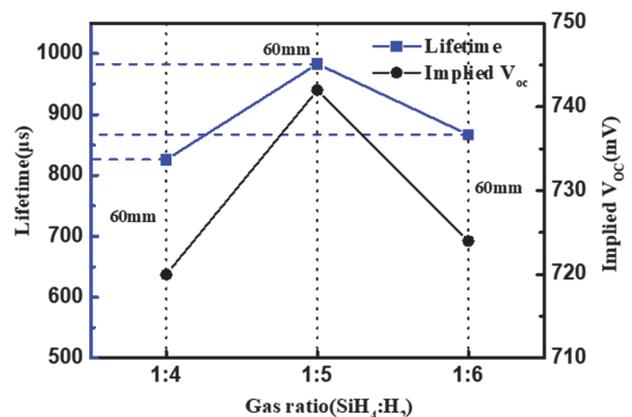


Fig. 4. Lifetime and implied voltage with different gas ratio of $\text{SiH}_4:\text{H}_2$.

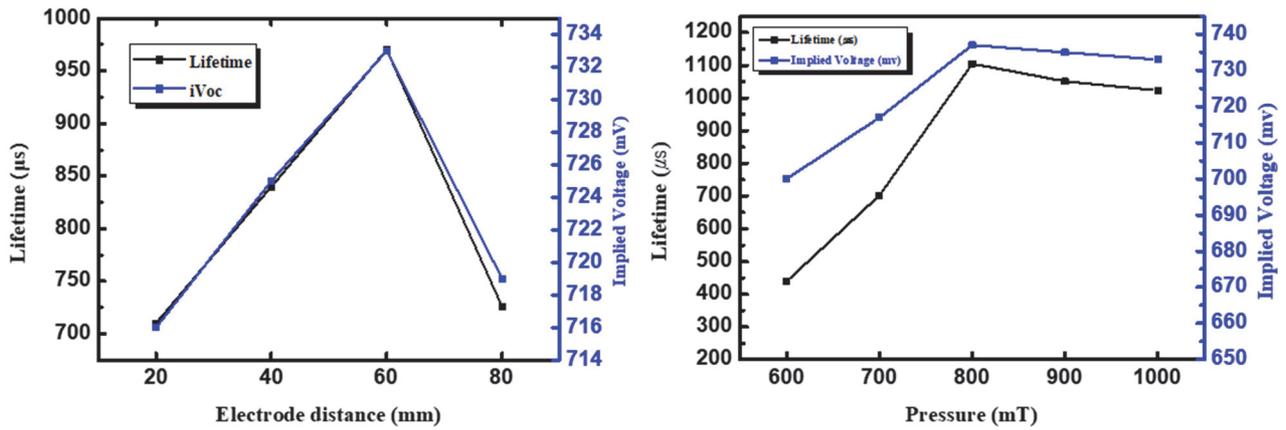


Fig. 5. Electrode distance and pressure variation with SiH₄:H₂=1:5.

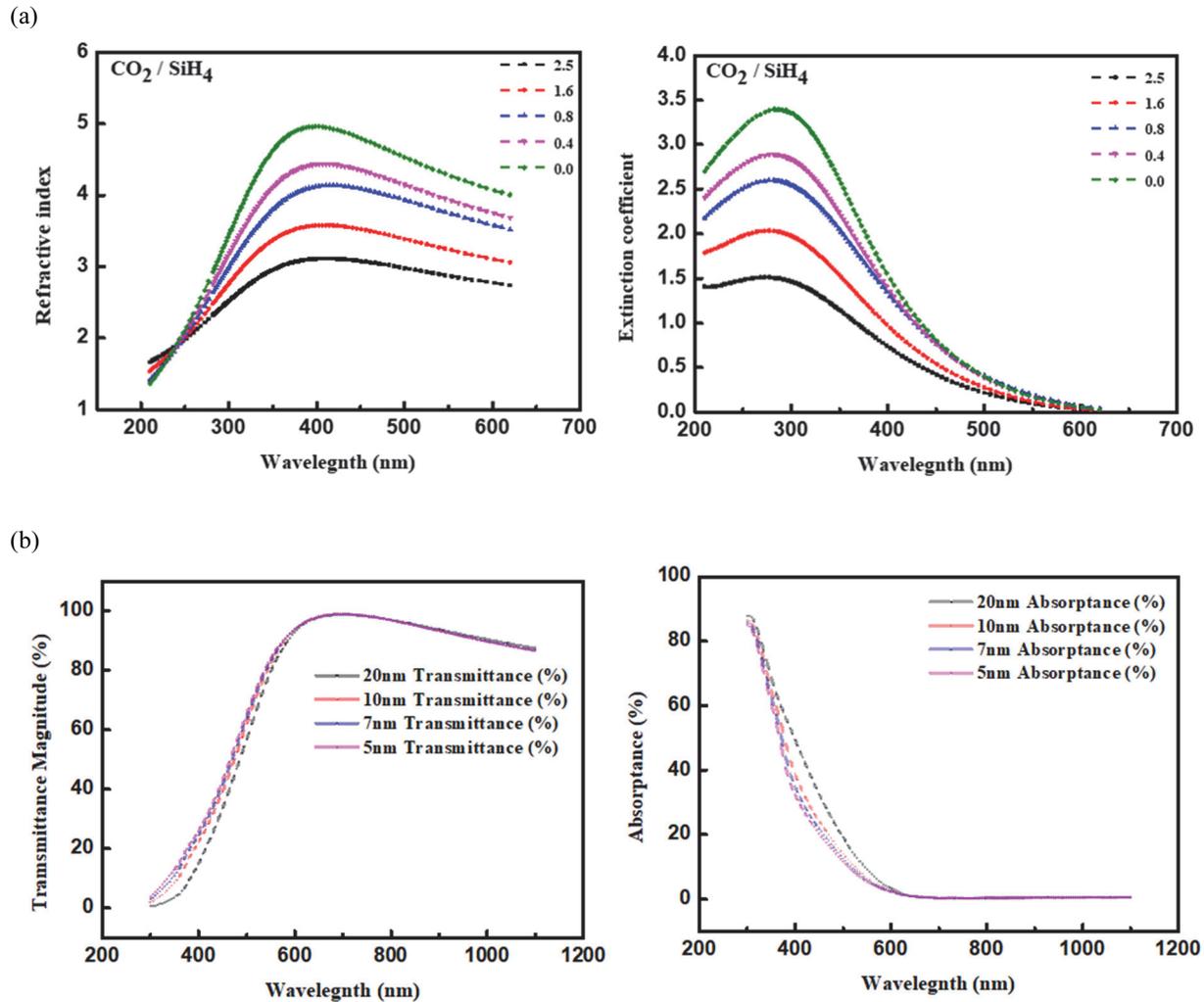


Fig. 6. (a) Changes in refractive index and extinction coefficient according to CO₂ contents and (b) Transmittance and absorptance of a-Si:H with different thickness on n-c-Si.

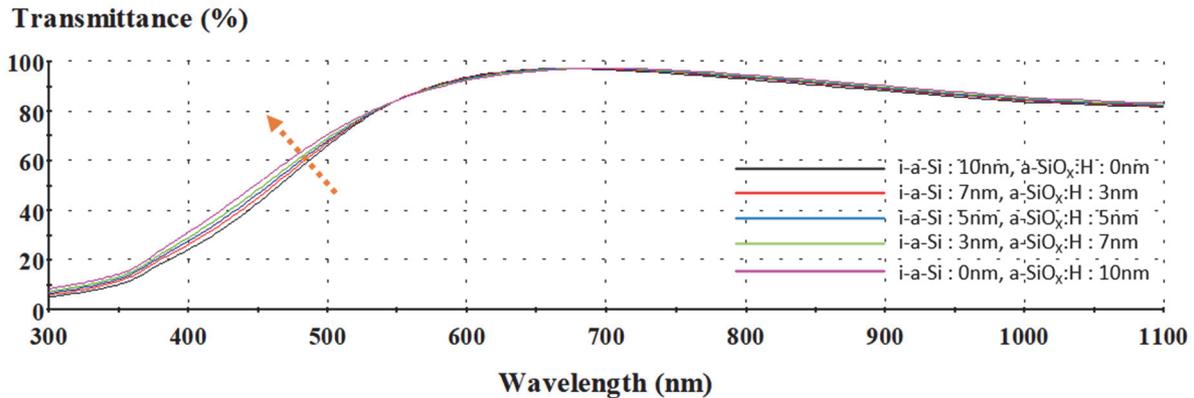


Fig. 7. The transmittance gains on bi-layer with 5 nm of a-SiO_x:H and a-Si:H compared to i-a-Si:H single layer.

이후 bi-layer 구조를 적용하여 AFORS-HET 시뮬레이션을 통한 전체 cell에서의 gain을 살펴보았을 때 전압에서의 0.3%의 gain이 있었으며 전체효율은 기존의 대칭구조인 이중 접합 태양전지 보다 16 cm²의 rear emitter 이중 접합 태양전지기준 효율 24.1%를 도출하였다.

4. 결론

본 논문은 이중 접합 태양전지의 패시베이션에 있어서 기존의 i-a-Si:H 단일구조에서 bi-layer구조를 형성함으로써 voltage의 향상과 transmittance 증가에 의한 전체적인 디바이스 효율증가를 시뮬레이션을 통해 입증하였다. 이중 접합 태양전지는 a-Si/epi-Si 상 경계에 가깝게 증착된 전이 영역 즉, i-a-Si:H 층이 최상의 패시베이션이 디바이스의 결과를 산출하는 것으로 관찰되었다. 이는 적절한 온도, 압력, SiH₄과 H₂의 조합 등 최적의 희석 비율이 패시베이션의 결과를 주도한다. Intrinsic층의 증착에 있어서 epitaxial 성장이 적어야 하며 캐리어의 이동의 hopping과 tunneling에 의한 10 nm 이하인 두께가 필수적이다. 또한 Si-H bonding보다 Si-H₂ bonding이 지배적이어야 하여야 한다. 본 논문에서는 매우 얇은 저밀도 interlayer 와 dense한 capping layers의 stack은 전기적 특성 향상을 산출하였으며 a-Si:H와 c-Si 인터페이스 패시베이션에 대한 우수한 성능을 보이며 더 나아가 추후의 탠덤 태양전지에서의 긍정적인 효과를 기대할 수 있다.

감사의 글

This research was supported by grants from the New & Renewable Energy Technology Development Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) funded by the Korean Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (Project No. 20213030010240).

본 논문은 성균관대학교 및 교육부, 한국연구재단의 4단계 두뇌한국21 사업 대학원혁신으로 지원된 연구임.

REFERENCES

- [1] M. Taguchi, A. Yano, S. Tohoda, K. Matsuyama, Y. Nakamura, T. Nishiwaki, K. Fujita, and E. Maruyama, *IEEE J. Photovolt.*, **4**, 96 (2014). [Doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2282737>]
- [2] J. P. Seif, A. Descoedres, M. Filipič, F. Smole, M. Topič, Z. C. Holman, S. D. Wolf, and C. Ballif, *J. Appl. Phys.*, **115**, 024502 (2014). [Doi: <https://doi.org/10.1063/1.4861404>]
- [3] Y. Tao and A. Rohatgi, *Nanostructured Solar Cells*, (Tech, 2017) pp. 93-115. [Doi: <https://doi.org/10.5772/65023>]
- [4] J. Fang, Z. Chen, G. Hou, F. Wang, X. Chen, C. Wei, G. Wang, J. Sun, D. Zhang, Y. Zhao, and X. Zhang, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, **136**, 172 (2015). [Doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.01.014>]
- [5] T. Ruan, M. Qu, J. Wang, Y. He, X. Xu, C. Yu, Y. Zhang, and H. Yan, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **30**, 13330 (2019). [Doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01700-7>]
- [6] J. Linke, M. A. Fazio, D. Cavalcoli, and B. Terheiden, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, **187**, 104 (2018). [Doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.07.024>]
- [7] D. Deligiannis, J. van Vliet, R. Vasudevan, R.A.C.M.M. van

ORCID

Junsin Yi

<https://orcid.org/0000-0002-6196-0035>

- Swaaaj, and M. Zeman, *J. Appl. Phys.*, **121**, 085306 (2017). [Doi: <https://doi.org/10.1063/1.4977242>]
- [8] K. Carstens and M. Dahlinger, *J. Appl. Phys.*, **119**, 185303 (2016). [Doi: <https://doi.org/10.1063/1.4948945>]
- [9] D. P. Pham, S. Lee, Y. Kim, and J. Yi, *J. Phys. Chem. Solids*, **154**, 110059 (2021). [Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2021.110059>]
- [10] G. Ahmad, S. Mandal, A. K. Barua, T. K. Bhattacharya, and J. N. Roy, *IEEE J. Photovolt.*, **7**, 414 (2017). [Doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2642644>]
- [11] J. Shi and Z. C. Holman, *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, (Washington, DC, USA, 2017) pp. 1820-1823. [Doi: <https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8366193>]
- [12] J. Wang, X. Ru, T. Ruan, Y. Hu, Y. Zhang, and H. Yan, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **32**, 25327 (2021). [Doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06991-3>]
- [13] M. Rana, C. Banerjee, and P. Chowdhury, *Appl. Phys. A*, **127**, 192 (2021). [Doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-021-04322-1>]
- [14] Y. Yang, W. Liu, L. Zhang, S. Huang, X. Li, K. Jiang, Z. Li, Z. Yan, S. Lan, X. Wu, Z. Ma, Y. Zhou, and Z. Liu, *Mater. Lett.*, **309**, 131360 (2022). [Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131360>]
- [15] W. Long, S. Yin, F. Peng, M. Yang, L. Fang, X. Ru, M. Qu, H. Lin, and X. Xu, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, **231**, 111291 (2021). [Doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111291>]
- [16] M. Z. Burrows, U. K. Das, R. L. Opila, S. De Wolf, and R. W. Birkmire, "Role of hydrogen bonding environment in a-Si:H films for c-Si surface passivation," *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, **26**, 683 (2008). [Doi: <https://doi.org/10.1116/1.2897929>]
- [17] M. Sharma, J. Panigrahi, and V. K. Komarala, *Nanoscale Adv.*, **3**, 3373 (2021). [Doi: <https://doi.org/10.1039/D0NA00791A>]