

고효율 태양전지용 a-IZO 박막의 전기적 및 광학적 특성 최적화에 관한 연구

박소민¹, 정성진¹, 최지원¹, 김영국², 이준신² 

¹ 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

² 성균관대학교 정보통신대학

Optimization of Electrical and Optical Properties of a-IZO Thin Film for High-Efficiency Solar Cells

Somin Park¹, Sungjin Jeong¹, Jiwon Choi¹, Youngkuk Kim², and Junsin Yi²

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

² College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received October 1, 2022; Revised October 15, 2022; Accepted October 17, 2022)

Abstract: The deposition of indium zinc oxide (IZO) thin films was carried out on substrate at room temperature by RF magnetron sputtering. The effects of substrate temperature, RF power and deposition pressure were investigated with respect to physical and optical properties of films such as deposition rate, electrical properties, structure, and transmittance. As the RF power increases, the resistivity gradually decreases, and the transmittance slightly decreases. For the variation of deposition pressure, the resistivity greatly increases, and the transmittance is decreased with increasing deposition pressure. As a result, it was demonstrated that an IZO film with the resistivity of $3.89 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$, the hole mobility of $51.28 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, and the light transmittance of 86.89% in the visible spectrum at room temperature can be prepared without post-deposition annealing.

Keywords: Transparent conductive oxide, Indium zinc oxide, Indium tin oxide, High mobility, Solar cell

1. 서론

현재 결정질 실리콘 태양전지는 태양전지 분야에서 가장 큰 비율을 차지하고 있으나 최대 효율은 26.1%로 이론적 한계 효율에 도달하였다. 이를 극복하기 위한 차세대 태양전지로 이종접합 태양전지 및 탠덤 태양전지에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이종접합 태양전지, 페로브스

카이트/실리콘 탠덤 태양전지는 그림 1과 같이 각각 26.7%와 29.8%의 높은 광전변환효율을 기록하였다 [1,2].

투명 전도성 산화물(transparent conductive oxide, TCO)은 ITO, IZO, AZO, ZnO 등이 있으며 Solar cell, OLED, TFT와 같은 광전소자 분야에서 적용되고 있다 [3-7]. 투명 전도 박막은 가시광선 영역인 380~1,100 nm에서 80% 이상의 투과도와 특성과 낮은 면저항 특성을 충족해야 한다 [8,9]. 현재 투명 전도성 산화물 박막 물질로 상용화된 ITO (indium tin oxide) 박막은 3.5 eV의 넓은 밴드갭 특성이 있으며, 높은 전기 전도도와 투과도를 나타낸다. 그러나 ITO 박막이 높은 투과도와 전도도 특성을 가지기 위해서는 300°C 이상의 열처리가 필수적이다 [10]. 이

✉ Junsin Yi; junsin@skku.edu

Copyright ©2023 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.

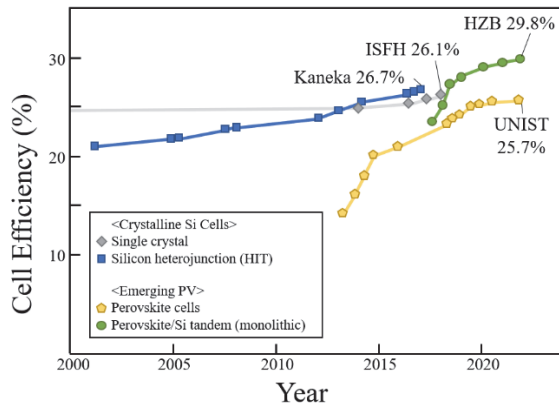


Fig. 1. Efficiency of silicon heterojunction and perovskite-based solar cells.

와 같은 고온 공정을 진행하면 ITO 박막의 결정화를 높여 결정립에 의한 표면 거칠기를 증가시키며 이는 태양전지의 안정성을 현저하게 저하시키게 된다 [11,12]. 또한, 이 종접합 태양전지의 경우 고온 조건에서 투명 전도성 박막의 증착 공정을 진행 시 비정질 실리콘 박막의 특성 저하시킨다. 페로브스카이트 기반 탠덤 태양전지도 특성 저하의 문제로 공정 온도 제한이 존재한다 [13]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 저온 공정에서도 전기적 및 광학적 특성이 우수한 여러가지의 투명 전도 박막 개발 연구가 진행되고 있다. Indium zinc oxide (IZO) 박막은 저온 공정을 통해 증착할 수 있으며 추가적인 열처리 공정 없이도 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 이하의 낮은 전기 비저항 특성과 가시광선 영역에서 높은 광 투과도 특성을 갖는 것으로 알려져 있다 [14,15]. 저온 증착에서도 우수한 특성을 갖는 IZO 박막은 그림 2과 같은 이종접합 태양전지, 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지에서 TCO 층으로 사용되는 ITO 박막을 대체할 물질로 유망하다 [16-18]. IZO 박막의 work function은 4.9~5.1 eV 정도로 알려져 있다 [14,19].

일반적으로 TCO 박막을 증착하는 방법으로 화학적 기상 증착법(chemical vapor deposition, CVD), 원자층 증착(atomic layer deposition, ALD), 이온 플레이팅(Ion plating), 진공증착(evaporation) 스퍼터링(sputtering) 등의 다양한 방법이 존재한다. 태양전지 산업에 사용되는 방법으로는 저온 및 대면적 증착이 가능한 스퍼터링 방식이 가장 적합하다 [20]. 이는 집적회로 생산라인 공정에서 많이 쓰이는 진공 증착법의 일종으로 비교적 낮은 진공도에서 플라즈마를 이온화된 Ar 등의 가스를 가속하여 타겟에 충돌시키고, 원자를 분출시켜 웨이퍼나 유리 같은 기판 상에 박막을 성장시키는 방법이다. 챔버 내부를 고진공 상태로 유지 후 낮은 압력의 Ar 가스를 챔버 내로 흘려준다.

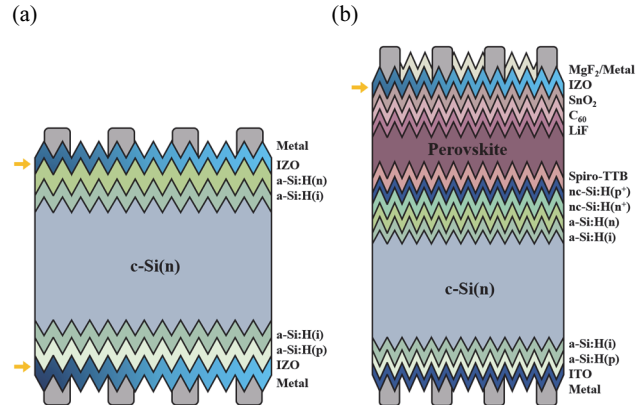


Fig. 2. Efficiency of silicon heterojunction and perovskite-based solar cells.

타겟이 장착된 음극에 (-)전압을 가하면 음극과 양극 사이에 전기장이 형성된다. 이 전기장에 노출된 Ar 가스는 Ar^+ 로 이온화되면서 기판과 음극 간에 플라즈마가 발생한다. 음극에 장착된 타겟 물질의 표면은 기판보다 음전위로 유지되므로, Ar^+ 은 타겟 표면으로 가속 후 충돌되고 타겟 표면에서 방출되어 기판으로 날아가 박막을 증착하게 된다 [21,22]. 본 논문에서는 RF magnetron sputter 장비를 이용하여 ITO 박막을 대체할 투명 전극소재인 IZO 박막 증착하였고 온도, 파워, 공정 압력의 변화가 박막의 전기적 및 광학적 특성에 어떤 영향을 미치는 것인가에 대해 자세히 규명하고자 한다.

2. 실험 방법

본 논문에서는 IZO 박막을 증착하기 위해 기판으로 Corning사의 eagle glass 20 mm × 20 mm, silicon wafer 15 mm×15 mm를 사용하였다. Corning eagle glass 기판 표면의 불순물 제거를 위해 초음파 세척기 (BRANSON 5510)를 이용하여 Acetone, Iso-Propyl Alcohol (IPA), DI water에서 각각 10분씩 glass cleaning을 진행하였으며 wafer 표면의 자연산화막 (native oxide)을 제거하려고 BOE (buffer oxide etchant) 용액을 사용하여 30초 동안 담근 다음, DI water로 rinse를 진행하였다. Corning eagle glass, silicon wafer를 각각 클리닝 후에 N_2 gas를 이용하여 기판 표면의 수분을 제거하였다. IZO 박막을 증착하기 위한 시스템은 스퍼터 장비를 사용하였으며 IZO 타겟으로는 직경 6 inch, 두께 3 mm의 90 wt% In_2O_3 , 10 wt%의 ZnO, 순도 99.99% 원판형 타겟을 사용하였다. 진공을 형성을 위한 펌

프로는 저진공에서 로터리 펌프를 사용하였고, 고진공에서 turbomolecular pump (TMP) 펌프를 사용하였다. sputter 장비에서 타겟이 위치하는 음극은 상단에 위치하고 기판부는 하단에 위치한 구조로 되어 있다. 유량 공급으로 mass flow controller (MFC)를 이용하여 Ar 유량을 조절하였다. 챔버내 압력은 10^{-3} Torr 이상에서는 baratron gauge를 이용하여 측정하였으며 그 이하의 압력에서는 ion gauge를 통해 측정하였다. 박막 증착 시 Basic pressure는 10^{-6} Torr 이하에서 유지하였다. 모든 실험은 증착 전 표면의 오염물 제거 및 메인 챔버 타겟을 활성화하기 위해 pre-sputtering 과정을 30분간 진행하였다. 우선 plasma active gas로 Ar 유입량을 가변에 따른 특성 확인을 위해 공정을 진행하였고, 관련된 증착 공정 조건은 표 1에 나타냈다. 공정 진행 시 압력, 플라즈마 파워, 온도를 각각 5 mTorr, 50 W, RT로 고정하고, Ar 유량은 20 sccm에서 100 sccm까지 증가시켜 박막을 비교하였다. 그 다음으로 온도, 파워, 공정 압력 가변에 따른 IZO 박막의 특성을 분석하기 위해 표 2와 같이 증착하였다. 두께 측정은 Ellipsometer 장비를 이용하여 측정하였고, 박막의 두께 영향을 최소화하기 위해 모든 공정조건에서 증착률을 측정하여 $100 \text{ nm} \pm 3 \text{ nm}$ 의 박막을 증착하였다. Hall effect measurement (Ecopia HMS-3000), UV-vis spectroscopy (Scinco S-3100), 4-point probe (CMT-100 MP) 장비를 이용하여 IZO 박막의 전기적·광학적 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Ar 유량에 따른 IZO 박막 분석

Plasma active gas인 Ar 유입량 가변에 따른 IZO 박막의 특성을 그림 3과 같이 분석하였다. 증착 조건으로 압력, 플라즈마 파워, 온도를 각각 5 mTorr, 50 W, 상온으로 고정하고, Ar 유량을 20 sccm에서 100 sccm까지 증가시키며 변화를 확인하였다. Ar 60 sccm 이상에서 $39 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 이하의 Mobility 특성으로 보이고 면저항 또한 급격히 증가하여 특성이 저하되는데, 이는 가스량이 증가할수록 가스의 챔버 내 잔류시간이 감소하여 가스가 빠르게 이동하기 때문에 플라즈마가 불안정하게 형성되는 것에서 오는 현상으로 판단된다. Ar 40 sccm에서 $38.4 \text{ } \Omega/\text{sq}$ 의 낮은 면저항과 $42.67 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 높은 mobility 특성을 보였다. 이후 온도, 파워, 압력 등의 공정 조건 가변의 실험에서 Ar 유량은 40 sccm으로 고정한 후 진행하였다.

3.2 증착 조건 가변에 따른 IZO 박막 분석

그림 4는 기판의 온도, 플라즈마 파워, 공정 압력에 따른 IZO 박막의 전기적 특성을 나타냈으며 기존 ITO 박막의 특성과 비교하였다. 그림 4(a)에서 증착 온도가 증가할수록 mobility는 증가하고 면저항은 감소하는 특성을 보이거나 큰 차이를 보이지 않았다. Mobility가 증가하는 원인은 온도가 높아짐에 따라 격자운동이 활발하기 때문이다. 상온에서 성장시켰음에도 불구하고 $37.34 \text{ } \Omega/\text{sq}$ 의 비교적 낮은

Table 1. IZO thin film deposition conditions with various Ar flow rates.

Layer	Base P ($\times 10^{-6}$ Torr)	Working P (mTorr)	Gas flow (sccm)	Power (W)	Thickness (nm)	Setting T_{sub} ($^{\circ}\text{C}$)
IZO	2	5	20~100	50	100	RT

Table 2. IZO thin film deposition conditions with temperature, power and working pressure.

Parameter	Base P ($\times 10^{-6}$ Torr)	Working P (mTorr)	Setting T_{sub} ($^{\circ}\text{C}$)	Power (W)	Thickness (nm)	Ar gas flow (sccm)
Temperature	2	5	RT ~ 200	100	100	40
Power	2	5	RT	50~250	100	40
Working pressure	2	4.5~8	RT	100	100	40

면저항을 나타내고 있으며, mobility 특정도 49.31 cm²/Vs의 높은 값을 나타내고 있다. 면저항을 낮추기 위해서는 고온에서 성막이 필요하지만 적용할 디바이스를 고려하였을 때, 저온에서의 증착한 박막의 면저항도 40 Ω/sq 이하로 충분히 낮은 값을 보인다 [23,24]. 전체적으로 비저항 값은 3.4~3.81 × 10⁻⁴ Ω·cm로 낮은 값을 보였다. 산소는 indium이나 zinc에 비해 상대적으로 boiling point가 훨씬 낮기 때문에 온도가 증가함에 따라 표면의 산소가 쉽게 탈착되어 oxygen vacancy가 증가하여 캐리어의 농도가 증가하고 면저항이 감소하게 된다.

그림 4(b)는 IZO 박막의 플라즈마 파워에 의한 특성 변화 분석을 위해 공정온도는 상온, 공정압력은 5 mTorr로 고정하고 파워를 가변하며 박막을 형성하였다. 파워가 증가할수록 타겟과 충돌하는 이온의 양이 증가하고 타겟으

로부터 분리되는 IZO의 양이 증가하여 증착속도가 증가하는 것을 확인하였다. 일반적으로 플라즈마 파워는 스퍼터링의 에너지가 되므로 전압이 증가함에 따라 박막의 성장률이 증가하게 된다. 그러나 높은 전압 인가 시 증착된 박막에서 2차 스퍼터링 현상이 발생하여 증착률이 다시 낮아지는 현상도 일어난다. 그림 (b)에서 플라즈마 파워의 증가에 따라 박막의 면저항과 mobility 특성이 동시에 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 파워 증가에 의해 Ar이 충분히 해리되고 이로 인해 캐리어 밀도가 크게 증가하기 때문이다. 캐리어 밀도의 급격한 증가는 캐리어간의 간섭에 의해 mobility가 감소하게 된다. 또한, 스퍼터되는 IZO 박막의 밀도가 증가하고 photon scattering과 이온화된 불순물의 scattering이 감소하게 되어 저항이 감소한 것이다. 스퍼터링 파워가 낮을수록 기판을 향하는 이온의 충돌량이 적고

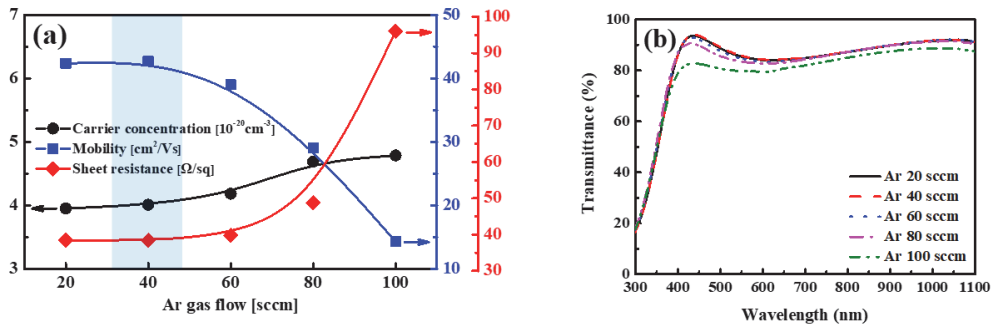


Fig. 3. (a) Electrical properties and (b) transmittance of IZO films deposited at various Ar gas flow.

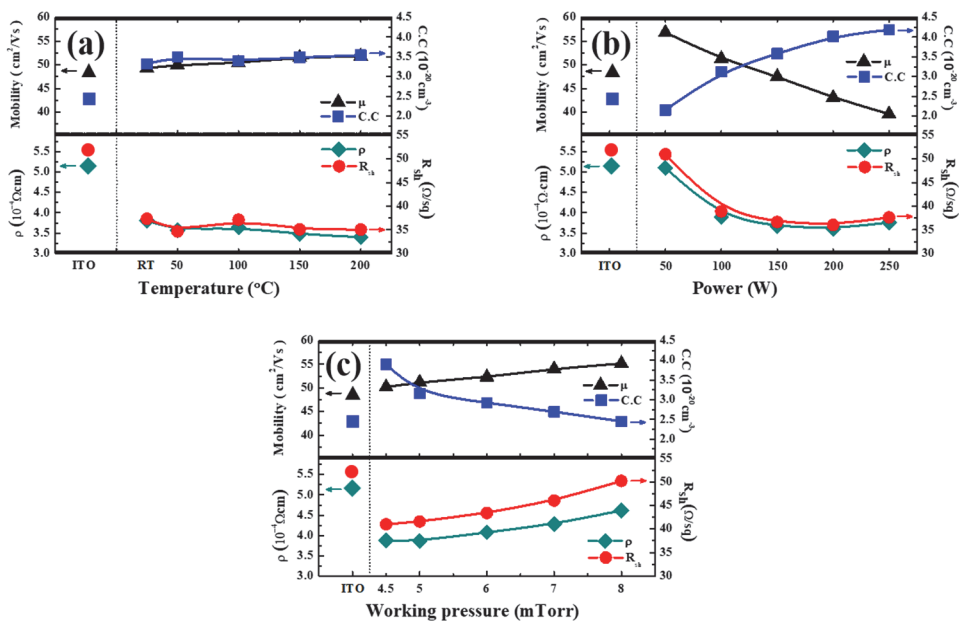


Fig. 4. Electrical properties of IZO films with (a) temperature, (b) power, and (c) working pressure.

기판 온도 상승을 완화시켜 특성이 더 우수하며 계면 손상 완화에 미치는 영향이 줄어든다는 것을 확인할 수 있다.

그림 4(c)는 IZO 박막의 공정 압력에 따른 특성 변화에 대해 분석을 위해, 온도와 파워 조건을 상온, 100 W로 고정 후 압력을 가변하여 박막을 증착한 것이다. 일정한 파워에서 4.5 mTorr에서 8 mTorr로 변화되면서 공정압력에 따른 증착 속도는 다소 감소하였다. 성막 속도의 감소는 working pressure가 증가함에 따라 챔버 내부에 Ar 입자들의 증가로 인하여 스퍼터링된 입자들의 평균자유행정경로(mean free path, MFP)가 짧아지기 때문이다. 또한 working pressure이 증가함에 따라 스퍼터링된 원자들과 이온들의 random scattering의 증가도 증착률의 감소에 기여한다. 압력이 높아지면서 챔버 내부에 타겟과 충돌할 수 있는 분자들의 양이 증가하지만 동시에 이것은 평균 자유 행로의 감소도 야기하므로 증착 속도에서는 큰 영향을 미치지 못하였다. 4.5 mTorr에서 8 mTorr로 압력이 증가할수록 hall mobility 특성이 50.19 cm²/Vs에서 55.16 cm²/Vs로 증가하고, 면저항은 50.2 Ω/sq까지 급격히 증가하였다.

그림 5는 IZO 박막의 광학적 특성인 투과도를 나타낸 그래프이다. 공정 조건에 따라 미세한 차이가 있으나, 86~89%로 높은 투과도를 보였다. 그림 5(a)에서 공정온도가 증가함에 따라 400~1,100 nm에서 투과도는 87%에서 89.2%까지 증가하였다. 그림 5(b)의 파워 가변에 따른 투과도의 경우, 높은 전압을 가할수록 투과도가 증가하였다. 그림 5(c)에서 공정압력이 증가함에 따라 투과도가 낮아지는데 이는 증착 압력이 증가함에 따라 스퍼터되는 타겟 입자의 양과 에너지, 평균 자유 행로가 변화되기 때문이다. 이에 따라 박막의 미세 구조가 변화되고 이때 거칠어진 표면이 IZO 박막을 통과하는 빛의 경로를 방해하는 것으로 보인다. 증착 압력이 높아짐에 따라 증착된 박막의 roughness가 증가한다.

표 3에서 위의 공정 조건에 따른 박막 특성과 이종접합 태양전지 및 페로브스카이트 태양전지의 공정 온도 등을 고려하여 상온에서 Ar flow 40 sccm, 플라즈마 파워 100 W, 공정압력 5 mTorr에서 100 nm 두께에서 38.91 Ω/sq, 투과도 87% 이상, mobility 51.28 cm²/Vs으로 공정 조건을 최적화하였다.

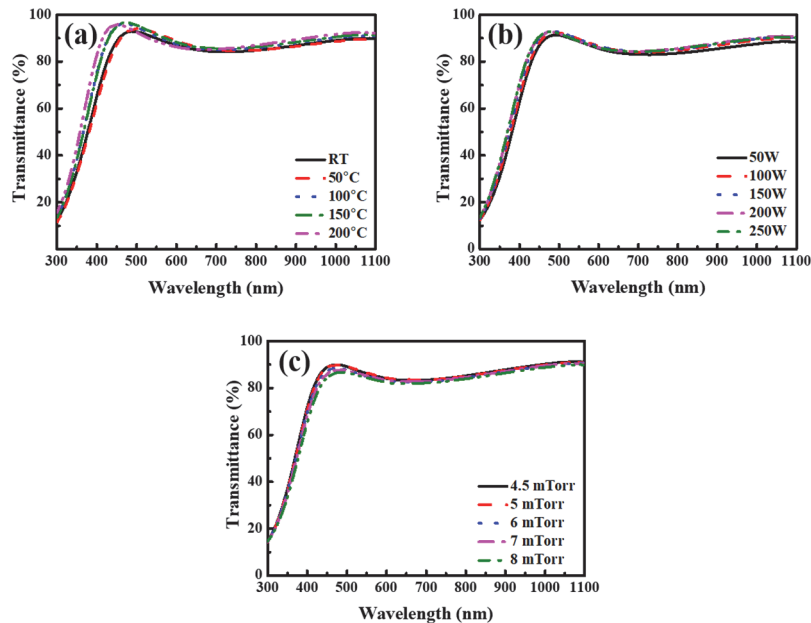


Fig. 5. Transmittance of IZO films with (a) temperature, (b) power, and (c) working pressure.

Table 3. Optimization condition for IZO thin films at room temperature.

Layer	Ar gas flow (sccm)	Working P (mTorr)	Setting T _{sub} (°C)	Power (W)	Thickness (nm)
IZO	40	5	RT	100	100

4. 결론

본 논문은 차세대 태양전지 적용하기 위해 저온 증착 가능한 IZO 박막의 증착 온도, 파워, 공정 압력을 조절하여 스퍼터링 공정을 진행하였고, 이를 통해 증착한 박막의 전기적·광학적 특성을 분석하였다. 현재 상용화된 ITO 박막은 고투과도, 낮은 면저항 특성을 가졌지만, 증착 후 열처리 공정이 필요하다는 단점이 있다. 대체 물질로 주목받고 있는 IZO 박막은 저온 증착에서도 고전도도 및 고이동도 특성을 확보하여 이중접합 태양전지, 페로브스카이트/실리콘 탠덤 태양전지에서 TCO layer로서 충분히 적용 가능할 것이다. IZO 박막에 산소 플라즈마 또는 열처리 공정을 통한 특성 향상을 통해 30% 이상의 고효율에 충분히 도달할 수 있다. 위의 실험 결과를 종합적으로 판단할 때 저온에서 Ar 40 sccm, 100 W, 5 mTorr 조건에서 RF 마그네트론 스퍼터를 이용하여 증착한 IZO 박막이 증착속도도 우수하며 전기적 광학적 특성이 우수하다고 판단하였다. 양질의 투명 전도 박막을 형성하기 위해서는 기판 온도도 중요하지만 공정압력, 플라즈마 파워의 요소도 고려하여 증착해야 한다고 결론지을 수 있다. 추가적인 변수를 제어하여 IZO 박막을 성장시켜 연구를 진행할 필요도 있지만, 현재까지 관측한 결과를 고려하였을 때 RF 100 W 상온에서 증착한 IZO 박막도 충분히 우수한 특성을 확인하였다. 페로브스카이트/실리콘 태양전지의 상부 TCO로 IZO 박막을 사용할 경우 스퍼터링 공정의 plasma damage로 인해 페로브스카이트 태양전지의 특성 저하가 일어나게 된다. 이후 N₂ annealing 등의 후처리 공정을 통해 특성을 완화하는 방안을 찾아야 한다. 또한, ITO 박막을 대체하려면 90% 이상의 고투과도 특성을 얻기 위해 추가적인 연구도 진행하여야 한다. 지속적인 연구개발을 통해 기술적인 한계를 극복한다면 IZO 박막은 차세대 태양전지의 유력한 투명 전도 박막이 될 것으로 예상된다.

ORCID

Junsin Yi

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

감사의 글

본 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 (과제번호: 20213030010240, 대면적 결정질/박막 실리콘 이중접합(HJT) 태양광 모듈 핵심소재.장비.공정 기술 개발)과 2022년도 한국에너지기술평가원의 (과제번호: 20224000000360, 태양전지 모듈 중견기업 특화 인력양성) 과제연구비에 의해 지원되었음.

REFERENCES

- [1] S. Kim, T. T. Trinh, J. Park, D. P. Pham, S. Lee, H. B. Do, N. N. Dang, V.-A. Dao, J. Kim, and J. Yi, *Sci. Rep.*, **11**, 15524 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94848-4>]
- [2] H. Shen, D. Walter, Y. Wu, K. C. Fong, D. A. Jacobs, T. Duong, J. Peng, K. Weber, T. P. White, and K. R. Catchpole *Adv. Energy Mater.*, **10**, 1902840 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201902840>]
- [3] H. H. Park, *Electron. Mater. Lett.*, **17**, 18 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s13391-020-00259-4>]
- [4] A. Sharmin, S. Tabassum, M. S. Bashar, and Z. H. Mahmood, *J. Theoretical and Applied Physics*, **13**, 123 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s40094-019-0329-0>]
- [5] X. Ji, J. Song, T. Wu, Y. Tian, B. Han, X. Liu, H. Wang, Y. Gui, Y. Ding, and Y. Wang, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **190**, 6 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.10.009>]
- [6] M. Schultes, T. Helder, E. Ahlswede, M. F. Aygüler, P. Jackson, S. Paetel, J. A. Schwenzer, I. M. Hossain, U. W. Paetzold, and M. Powalla, *ACS Appl. Energy Mater.*, **2**, 7823 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsam.9b01224>]
- [7] J. S. Jang, J. Kim, U. Ghorpade, H. H. Shin, M. G. Gang, S. D. Park, H. J. Kim, D. S. Lee, and J. H. Kim, *J. Alloys Compd.*, **793**, 499 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.042>]
- [8] H. Park, Y. J. Lee, J. Park, Y. Kim, J. Yi, Y. Lee, S. Kim, C. Park, and K. J. Lim, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **19**, 165 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s42341-018-0026-8>]
- [9] A. Cruz, E. C. Wang, A. B. Morales-Vilches, D. Meza, S. Neubert, B. Szyszka, R. Schlatmann, and B. Stannowski, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **195**, 339 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.01.047>]
- [10] J. Haschke, R. Lemerle, B. Aïssa, A. A. Abdallah, M. M. Kivambe, M. Boccard, and C. Ballif, *IEEE J. Photovolt.*, **9**, 1202 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2924389>]
- [11] A. Abdulkadir, A. A. Aziz, and M. Z. Pakhuruddin, *Results in Physics*, **19**, 103405 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103405>]
- [12] E. Donercark, S. Guler, E. H. Ciftpinar, I. Kabacelik, M. Koc, A. C. Ercelebi, and R. Turan, *Mater. Sci. Eng., B*, **281**, 115750 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.115750>]
- [13] L. Lin and N. M. Ravindra, *SN Applied Sciences*, **2**, 1 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3169-2>]
- [14] Z. Ying, Y. Zhu, X. Feng, J. Xiu, R. Zhang, X. Ma, Y. Deng, H. Pan, and Z. He, *Advanced Materials Interfaces*, **8**, 2001604 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1002/admi.202001604>]
- [15] T. Wahl, J. Hanisch, S. Meier, M. Schultes, and E. Ahlswede, *Org. Electron.*, **54**, 48 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2017.12.020>]
- [16] Y. H. Chiang, C. C. Peng, Y. H. Chen, Y. L. Tung, S. Y. Tsai, and P. Chen, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **51**, 424002 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad71c>]

- [17] W. J. Lee, D. H. Cho, Y. D. Kim, M. W. Choi, J. C. Choi, and Y. D. Chung, *J. Alloys Compd.*, **806**, 976 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.321>]
- [18] Y. J. Noh, J. G. Kim, S. S. Kim, H. K. Kim, and S. I. Na, *J. Power Sources*, **437**, 226894 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.226894>]
- [19] P. lei, X. Chen, Y. yan, J. Peng, C. Hao, J. Ji, Z. Huo, *Vacuum*, **195**, 110645 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110645>]
- [20] A. Cruz, D. Erfurt, P. Wagner, A. B. Morales-Vilches, F. Ruske, R. Schlatmann, and B. Stannowski, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **236**, 111493 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111493>]
- [21] K. Liu, B. Chen, J. Y. Zhengshan, Y. Wu, Z. Huang, X. Jia, C. Li, D. Spronk, Z. Wang, Z. Wang, S. Qu, Z. C. Holman, and J. Huang, *J. Mater. Chem. A*, **10**, 1343 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1039/d1ta09143c>]
- [22] M. G. Sousa and A. F. Da Cunha, *Appl. Surf. Sci.*, **484**, 257 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.275>]
- [23] Z. Wu, W. Duan, A. Lambertz, D. Qiu, M. Pomaska, Z. Yao, U. Rau, L. Zhang, Z. Liu, and K. Ding, *Applied Surface Science*, **542**, 148749 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148749>]
- [24] C. Messmer, L. Tutsch, S. Pingel, D. Erath, J. Schön, A. Fell, J. C. Goldschmidt, B. S. Goraya, F. Clement, A. Lorenz, S. Nold, M. Bivour, S. W. Glunz, and M. Hermle, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **30**, 374 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.3491>]