

# 박막형 태양전지 응용을 위한 ITZO 박막의 기판 종류에 따른 특성 분석

정양희\* · 강성준\*\*

## Characteristics of ITZO Thin Films According to Substrate Types for Thin Film Solar Cells

Yang-Hee Joung\* · Seong-Jun Kang\*\*

### 요 약

본 연구에서는 고주파 마그네트론 스퍼터링 법으로 유리, 사파이어, PEN 기판 위에 ITZO 박막을 증착하여 전기적 및 광학적 특성을 조사하였다. 유리와 사파이어 기판위에 증착한 ITZO 박막의 비저항은 각각  $3.08 \times 10^{-4}$   $\Omega$ -cm 과  $3.21 \times 10^{-4}$   $\Omega$ -cm로 큰 차이를 보이지 않은 반면 PEN 기판위에 증착한 ITZO 박막의 비저항은  $7.36 \times 10^{-4}$   $\Omega$ -cm로 다소 큰 값이 측정되었다. 기판의 종류와 무관하게 ITZO 박막의 평균 투과도의 차이는 크지 않았다. 유리 기판위에 증착한 ITZO 박막의 비정질 실리콘 박막 태양전지의 흡수영역에서의 평균 투과도와 P3HT:PCBM 유기물 활성층의 흡수영역에서의 평균 투과도를 이용하여 구한 재료평가지수는 각각 10.52 와  $9.28 \times 10^{-3}$   $\Omega^{-1}$ 로 가장 우수한 값을 나타내었다. XRD와 AFM 측정을 통해, 기판의 종류에 상관없이 모든 ITZO 박막이 비정질 구조를 나타내며 핀홀이나 크랙 같은 결함이 없는 표면을 가짐을 확인할 수 있었다.

### ABSTRACT

In this study, ITZO thin films were deposited on glass, sapphire, and PEN substrates by RF magnetron sputtering, and their electrical and optical properties were investigated. The resistivity of the ITZO thin film deposited on the glass and sapphire substrates was  $3.08 \times 10^{-4}$  and  $3.21 \times 10^{-4}$   $\Omega$ -cm, respectively, showing no significant difference, whereas the resistivity of the ITZO thin film deposited on the PEN substrate was  $7.36 \times 10^{-4}$   $\Omega$ -cm, which was a rather large value. Regardless of the type of substrate, there was no significant difference in the average transmittance of the ITZO thin film. Figure of Merits of the ITZO thin film deposited on the glass substrate obtained using the average transmittance in the absorption region of the amorphous silicon thin film solar cell and the absorption region of the P3HT:PCBM organic active layer were 10.52 and  $9.28 \times 10^{-3}$   $\Omega^{-1}$ , respectively, which showed the best values. Through XRD and AFM measurements, it was confirmed that all ITZO thin films exhibited an amorphous structure and had no defects such as pinholes or cracks, regardless of the substrate type.

### 키워드

ITZO Thin Film, PEN Substrate, Thin Film Solar Cell, Transmittance, Figure of Merit  
ITZO 박막, PEN 기판, 박막형 태양전지, 투과도, 재료 평가 지수

\* 전남대학교 전기 및 반도체공학과  
(jyanghee@jnu.ac.kr)

\*\* 교신저자 : 전남대학교 전기 및 반도체공학과  
• 접수일 : 2021. 10. 13  
• 수정완료일 : 2021. 11. 14  
• 게재확정일 : 2021. 12. 17

• Received : Oct. 13, 2021, Revised : Nov. 14, 2021, Accepted : Dec. 17, 2021

• Corresponding Author : Seong-Jun Kang

Dept. of Electrical and Semiconductor Engineering, Chonnam National University.  
Email : ferrokjsj@jnu.ac.kr

## I. 서론

화석연료를 기반으로 한 전통적인 전력 생산방식은 화석연료의 고갈 위기 및 대기오염 뿐 아니라 탄소배출로 인한 지구온난화와 기후변화 등 많은 환경문제를 초래하고 있어서 이를 해결하기 위한 신재생 에너지에 대한 연구가 주목받고 있다[1-2]. 태양전지는 신재생 에너지 분야 중에서 가장 빠른 성장을 보이는 기술이며 그 중요성도 점차 확대되고 있다. 태양전지는 상용화 순서에 따라서 1세대, 2세대, 3세대로 구분할 수 있다. 결정질 실리콘을 사용하는 1세대 태양전지는 제조가 쉽고 상대적으로 변환효율은 높아 전체 태양전지 수요의 90%이상을 차지하고 있다. 그러나 결정질 실리콘을 사용하는 태양전지는 고가의 가격과 형태의 변화가 쉽지 않은 점 때문에 다양한 응용분야에 적용하기가 곤란한 단점이 있다. 최근에 실리콘 박막과 유기물 박막 등을 이용하여 가격이 저렴하고 형태의 자유도를 향상시킬 수 있는 2, 3세대 박막형 태양전지에 대한 연구가 큰 관심을 받고 있다[3-5]. 특히 박막형 태양전지 중 P3HT:PCBM 과 같은 유기물 활성층을 갖는 이중접합 구조의 유기박막 태양전지는 프린팅이나 스핀 코팅 등의 간단한 공정으로 제작이 가능하고 저렴한 가격과 기계적 유연성 등의 특징을 가지고 있어 응용분야에 따라 형태를 변형시킬 수 있으며 가볍고 휴대가 편리한 장점이 있어 향후 IT 산업, 디스플레이, 전기 자동차, 우주 항공 등의 분야로의 확장이 기대된다[6-7].

결정질 실리콘 태양전지나 박막형 태양전지 모두 광 흡수와 캐리어 포집이 기판위에 증착한 투명 전도막을 통해 이루어지므로 투명 전도막의 전기적 및 광학적 특성이 태양전지들의 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 투명 전도막으로 가장 광범위하게 사용되어 온 ITO(Indium Tin Oxide) 박막은 높은 증착온도와 거친 표면 등의 문제점을 가지고 있어 박막형 태양전지에 적용하기에는 다소 무리가 있다[8-9]. 최근에 ITO에 ZnO를 첨가한 비정질 구조의 ITZO(Indium Tin Zinc Oxide) 박막은 저온에서 증착이 가능하고 이에 따라 매끈한 표면을 가지며, 전기적 및 광학적 특성도 ITO박막과 유사하거나 더 우수하여 가장 유망한 재료로 주목받고 있다[10-11]. 특히 박막형 태양전지의 경우 유리나 플라스틱을 비롯한 다양

한 기판을 사용할 수 있으므로 기판 종류에 따른 투명 전도막의 전기적 및 광학적 특성을 조사하는 것이 매우 중요하나 이에 대한 연구는 여전히 미흡한 형편이다.

본 연구에서는 유리, 사파이어, 플라스틱 기판 중 열적 안정성과 흡습성이 비교적 우수한 PEN(Polyethylene Naphthalate) 등 다양한 기판위에 ITZO 박막을 고주파 마그네트론 스퍼터링(RF magnetron sputtering) 법으로 증착하여 기판 종류에 따른 ITZO 박막의 전기적 및 광학적 특성들을 체계적으로 조사하고 이를 바탕으로 하여 비정질 실리콘 및 유기 박막 태양전지의 투명 전도막으로서의 응용 가능성을 조사하였다.

## II. 실험방법

유리 및 사파이어 기판 표면에 있는 불순물을 제거하기 위해 아세톤(15분)/알코올(15분)/증류수 1차(10분)/증류수 2차(15분) 순서로 초음파 세척을 한 후, 질소 가스를 이용하여 건조하였다. PEN 기판은 아세톤에 의해 기판이 손상되기 때문에, 알코올과 증류수만을 이용하여 동일한 방식으로 초음파 세척을 한 뒤 질소로 건조하였다. 세척된 유리, 사파이어, PEN 기판 (125um, Teijin Dupont, TETORON)위에 ITZO ( $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2:\text{ZnO} = 90\text{wt.}\%:5\text{wt.}\%:5\text{wt.}\%$ ) 세라믹 타겟을 사용하여 고주파 마그네트론 스퍼터링 법으로 ITZO 박막을 증착하였다. 표 1에 ITZO 박막의 증착 조건을 상세히 나타내었다.

표 1. ITZO 박막의 증착조건  
Table 1. Deposition conditions for the ITZO thin films

Deposition Conditions	ITZO thin film
Base Pressure	$\sim 2 \times 10^{-6}$ Torr
Working Pressure	3 mTorr
Substrate Temperature	Room Temperature
RF Power	50W
Substrate	Glass, Sapphire, PEN

ITZO 박막의 구조적 특성은 X-선 회절분석기(PANalytical, X'Pert Pro MRD)를 이용하여 조사하였고, 박막의 표면 형상은 AFM(SII Nano Technology, SPA400)을 사용하여 측정하였다. 전기적 특성은 Hall 효과 측정기(Accent, HL5500PC)를 이용하여 실시하였다. 광학적 특성은 UV-Vis Spectrometer(Varian, Cary-500)를 이용하여 300~800nm 파장 범위에서 측정하였다.

### III. 결과 및 논의

그림 1은 유리, 사파이어, PEN 기판위에 증착한 ITZO 박막의 투과도 곡선을 나타낸 것이다.

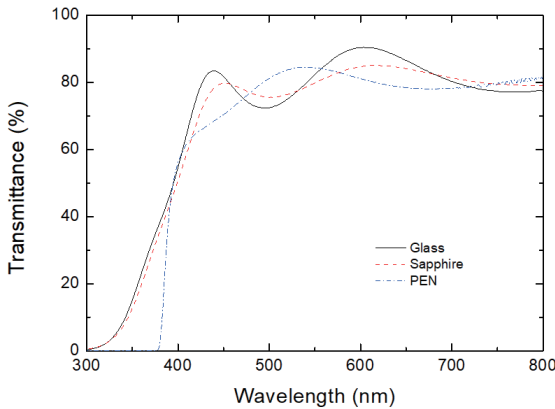


그림 1. 다양한 기판위에 증착된 ITZO 박막의 투과도 곡선

Fig. 1 Optical transmission spectra of ITZO thin films deposited on various substrates

유리와 사파이어 기판에 증착된 ITZO 박막의 경우 흡수단이 300nm 부근에서 시작되는 반면에 PEN 기판은 자외선을 차단하는 특성이 있어 약 380nm 이하의 파장을 갖는 빛이 차단되었음을 볼 수 있다. 유리, 사파이어, PEN 기판위에 증착한 ITZO 박막의 400~800nm의 파장에서 평균 투과도는 각각 80.9, 79.6, 78.1%로 비교적 높은 투과도를 나타내어 비정질 실리콘 박막 태양전지에 응용이 가능할 것으로 생각된다.

P3HT:PCBM 유기물 활성층의 흡수영역 450~600 nm 파장에서의 평균 투과도는 유리, 사파이어, PEN 기판위에 증착한 ITZO 박막의 경우 각각 79.8, 79.1, 80.8%로 조사되었다.

그림 2에 유리, 사파이어, PEN 기판위에 증착한 ITZO 박막의 전기적 특성인 비저항과 면저항의 측정 결과를 나타내었다.

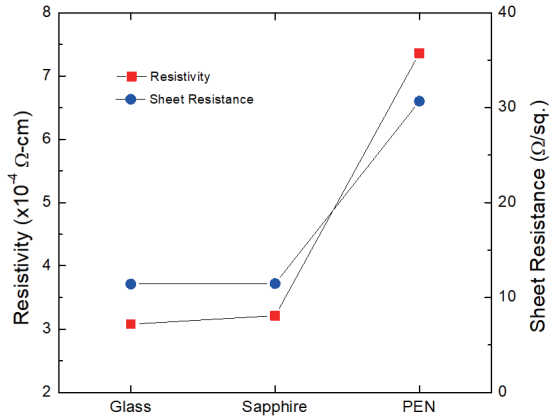


그림 2. 다양한 기판위에 증착된 ITZO 박막의 비저항과 면저항

Fig. 2 Resistivity and sheet resistance of ITZO thin films deposited on various substrates

유리와 사파이어 기판위에 증착한 ITZO 박막의 비저항은 각각  $3.08 \times 10^{-4}$  과  $3.21 \times 10^{-4}$  Ω-cm로 큰 차이를 보이지 않은 반면 PEN 기판위에 증착한 ITZO 박막의 비저항은  $7.36 \times 10^{-4}$  Ω-cm로 다소 큰 값이 측정되었다. 이와 같이 전기적 특성이 저하되는 원인은 표면 형상과 PEN 기판의 흡습성에 영향을 받았기 때문인 것으로 보인다. 표면 거칠기가 큰 표면을 가질수록 박막의 전기적 특성이 저하된다고 알려져 있다[12]. 그림 4에 나타낸 AFM 표면 형상에서 보듯이, 유리나 사파이어 기판에 비해 PEN 기판의 표면 형상이 열악하고 이에 따라 ITZO 박막의 표면 거칠기 값도 커지기 때문이다. 또 하나의 원인은 플라스틱 기판의 경우 흡습성 때문에 그 위에 증착한 박막의 전기적 특성이 저하되기 때문인 것으로 생각된다[13-14]. 유리, 사파이어, PEN 기판위에 증착한 ITZO 박막의 면저항은 각각 11.41, 11.46, 30.67 Ω/sq.로 조사되었다.

재료평가지수(Figure of merit,  $\Phi_{TC}$ )는 유사한 비저

항 값과 투과도를 나타내는 투명 전도막의 성능을 비교하는 매우 유용한 도구이다. 면저항과 투과도를 이용하여 Haacke 에 의해 제안된 식 (1) 의 재료평가지수를 구할 수 있다[15].

$$\phi_{TC} = T^{10} / R_{sh} \quad (1)$$

여기서, T는 투과도이고 R<sub>sh</sub>는 IZTO 박막의 면저항 이다. 그림 3에 평균 투과도와 그림 2에 나타난 면저항을 이용하여 구한 재료평가지수를 나타내었다.

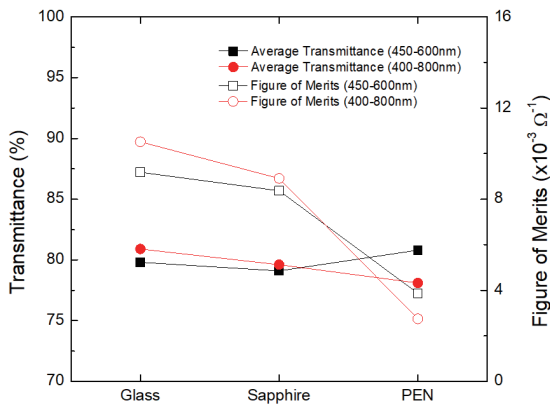


그림 3. 다양한 기판위에 증착된 ITZO 박막의 파장 범위 450~600nm 와 400~800nm 에서의 평균 투과도와 재료평가지수

Fig. 3 Average transmittance and figure of merit of ITZO thin films deposited on various substrates in wavelength ranges of 450–600nm and 400–800nm

유리 기판에 증착한 ITZO 박막의 경우 400~800nm 파장에서의 평균 투과도와 450~600nm 파장에서의 평균 투과도를 이용한 재료평가지수는 각각 10.52 와 9.18×10<sup>-3</sup>Ω<sup>-1</sup>로 가장 우수한 값을 나타내었으며, PEN 기판위에 증착한 ITZO 박막의 경우 전기적 특성이 제일 열악한 관계로 2.75 와 3.87×10<sup>-3</sup>Ω<sup>-1</sup>의 가장 낮은 값을 나타내었다. PEN 기판위에 베퍼층을 형성시켜 흡습성과 표면 형상을 개선시키면 더 우수한 값을 얻을 수 있고, 플렉시블한 특성을 갖춘 박막형 태양전지에 적용시킬 수 있을 것이라 사료된다.

그림 4는 유리, 사파이어, PEN 기판위에 증착한 ITZO 박막의 표면 형상을 AFM으로 관찰한 결과를

나타낸 것이다. 기판의 종류에 무관하게 모든 ITZO 박막이 핀홀이나 크랙 같은 결함이 없는 표면을 가지는 것으로 관찰되었다.

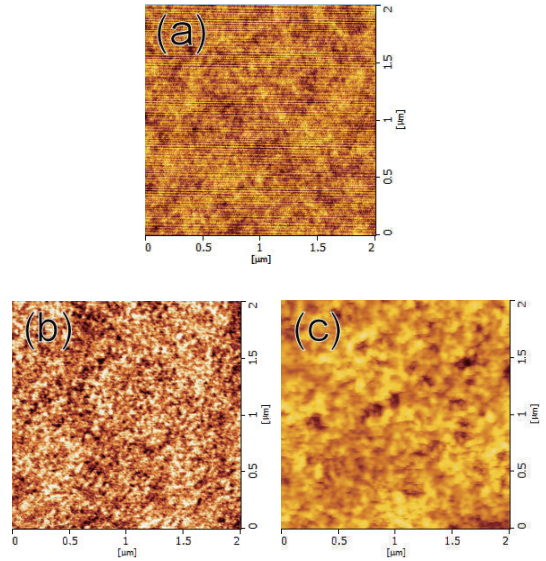


그림 4. (a) 유리, (b) 사파이어, (c) PEN 기판위에 증착된 ITZO 박막의 AFM 표면 형상

Fig. 4 AFM surface images of ITZO thin films deposited on (a) glass, (b) sapphire, and (c) PEN substrate

유리와 사파이어 기판위에 증착한 ITZO 박막의 표면 거칠기(rms roughness)는 약 0.2nm 범위로 큰 차이가 없었으나, PEN 위에 증착한 ITZO 박막의 경우는 약 2.8nm로 상당히 큰 값을 나타내었다. 유리나 사파이어 기판에 비해 PEN 기판의 표면 형상이 열악하고 표면 거칠기 값도 커서 유리나 사파이어 기판위에 증착한 ITZO 박막에 비해서는 약간 큰 값의 표면 거칠기 값을 나타낸 것으로 생각된다.

그림 5는 유리, 사파이어, PEN 기판위에 증착한 ITZO 박막의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 그림 5에서 보듯이, 유리와 사파이어 기판위에 증착한 ITZO 박막은 2θ 값 33° 부근에서 완만한 피크를 나타내었다. 이 완만한 피크는 낮은 기판온도로 인해 ITZO 박막이 비정질 구조를 갖고 있음을 나타내는 것이다. PEN 기판위에 증착한 ITZO 박막의 경우, 2θ 값 23°, 27° 에서의 피크는 PEN 기판에 기인한 것이고 그 외의 피크는 검출되지 않은 것으로 보아 ITZO 박막은 비정질 구조를 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

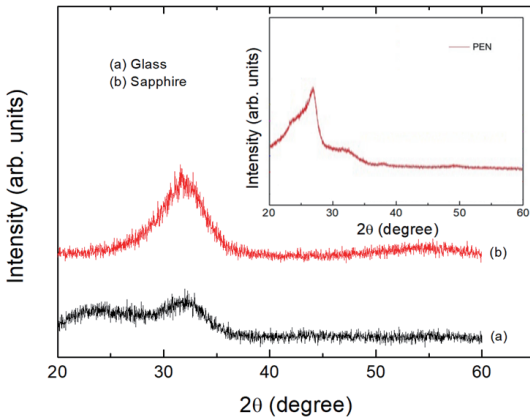


그림 5. 다양한 기판위에 증착된 ITZO 박막의 X-선 회절 패턴

Fig. 5 X-ray diffraction patterns of ITZO thin films deposited on various substrates

이는  $In_2O_3$  구조내에  $SnO_2$  와  $ZnO$ 의 불혼화성 (immiscibility) 때문에 ITZO 박막이 열적 안정성을 갖기 때문으로 보고되고 있다[16].

#### IV. 결론

본 연구에서는 고주파 마그네트론 스퍼터링 법으로 유리, 사파이어, PEN 기판 위에 ITZO 박막을 증착하여 기판 종류에 따른 전기적 및 광학적 특성을 비교 분석하고, 이를 바탕으로 박막형 태양전지의 응용 가능성을 조사하였다. 유리 와 사파이어 기판위에 증착한 ITZO 박막의 비저항은 각각  $3.08 \times 10^{-4}$  과  $3.21 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 로 큰 차이를 보이지 않은 반면 PEN 기판위에 증착한 ITZO 박막의 비저항은  $7.36 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 로 다소 큰 값이 측정되었다. 이와 같이 전기적 특성이 저하되는 원인은 표면 형상과 PEN 기판의 흡습성에 영향을 받았기 때문인 것으로 보인다. 비정질 실리콘 박막 태양전지의 흡수영역(400~800nm)에서의 평균 투과도와 P3HT:PCBM 유기물 활성층의 흡수영역(450~600nm)에서의 평균 투과도는 기판의 종류에 상관없이 큰 차이가 없었다. 유리 기판위에 증착한 ITZO 박막의 면저항 및 비정질 실리콘 박막 태양전지의 흡수영역에서의 평균 투과도와 P3HT:PCBM 유기물 활성층의 흡수영역에서의 평균 투과도를 이용하여 구한 제

료평가지수는 각각 10.52 와  $9.28 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 로 가장 우수한 값을 나타내었다. XRD 측정을 통해 기판에 무관하게 모든 ITZO 박막이 비정질 구조를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. ITZO 박막의 표면을 AFM으로 관찰한 결과, 유리 와 사파이어 기판위에 증착한 ITZO 박막의 표면 거칠기는 약 0.2nm 범위로 큰 차이가 없었으나, PEN 위에 증착한 ITZO 박막의 경우는 약 2.8nm로 상당히 큰 값을 나타냈고 이것이 전기적 특성 저하의 한 원인으로 작용한 것으로 보인다.

본 연구를 통해 비정질 ITZO 박막이 박막형 태양전지 분야에서 매우 유용하게 사용될 수 있으리라 사료된다.

#### References

- [1] O. Mahian, E. Bellos, C. Markides, R. Taylor, A. Alagumalai, L. Yang, C. Qin, B. Lee, G. Ahmadi, M. Safaei, and S. Wongwises, "Recent Advances in Using Nanofluids in Renewable Energy Systems and The Environmental Implications of Their Uptake," *Nano Energy*, vol. 86, Aug. 2021, pp. 106069.
- [2] R. Klaimi, S. Alnouri, M. Hindi, and F. Azizi, "Optimization Techniques for Coupling Renewable/Hybrid Energy Options with Desalination Systems for Carbon Footprint Reduction," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 151, Nov. 2019, pp. 270-290.
- [3] F. Schindler, A. Fell, R. Müller, J. Benick, A. Richter, F. Feldmann, P. Krenckel, S. Riepe, M. Schubert, and S. Glunz, "Towards the Efficiency Limits of Multicrystalline Silicon Solar Cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 185, Oct. 2018, pp. 198-204.
- [4] C. Wronski, B. Roedern, and A. Kołodziej, "Thin-Film Si:H-based Solar Cells," *Vacuum*, vol. 82, issue 10, June 2008, pp. 1145-1150.
- [5] N. Yan, C. Zhao, S. You, Y. Zhang, and W. Li, "Recent Progress of Thin-Film Photovoltaics for Indoor Application," *Chin. Chem. Lett.*, vol. 31, issue 3, Mar. 2020, pp. 643-653.
- [6] P. Mahendia, G. Chauhan, H. Wadhwa, G. Kandhol, S. Mahendia, R. Srivastava, O. Sinha, T. Clemons, and S. Kumar, "Study of Induced Structural, Optical and Electrochemical

- Properties of Poly (3-hexylthiophene) (P3HT), [6,6]-phenyl-C61-butyric-acid-methyl-ester (PCBM) and Their Blend As an Effect of Graphene Doping," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 148, Jan. 2021, pp. 109644.
- [7] K. Choi, J. Jeong, and H. Kim, "Dependence of Electrical, Optical, and Structural Properties on the Thickness of IZTO Thin Films Grown by Linear Facing Target Sputtering for Organic Solar Cell," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, June 2010, pp. 1822-1830.
- [8] J. Kim, K. Jeon, G. Kim, and S. Lee, "Electrical, Structural, and Optical Properties of ITO Thin Films Prepared at Room Temperature by Pulsed Laser Deposition," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 252, issue 13, Apr. 2006, pp. 4834-4837.
- [9] B. Choi, Y. Joung, and S. Kang, "Influence of the RF Power on the Optical and Electrical Properties of ITZO Thin Films Deposited on SiO<sub>2</sub>/PES Substrate," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 3, June 2021, pp. 443-450.
- [10] J. Park and Y. Yoon, "Synthetic Analysis on the IZTO Thin Films on Various Plastic Substrates with the Buffer Layer," *J. Mater. Sci : Mater. Electron*, vol. 28, July 2017, pp. 16155-16164.
- [11] J. Joung, H. Kim, and S. Na, "Low Resistance and High Transparent Amorphous ITZO Electrode Cosputtered by Liner Facing Target Sputtering for Organic Photovoltaics," *Electrochem. Solid-State Lett.*, vol. 12, June 2009, pp. J80-J82.
- [12] J. Park, S. Kang, and Y. Yoon, "Properties of IZTO Thin films Deposited on PEN Substrates with Different Working Pressures," *J. Korean Ceram. Soc.*, vol. 52, no. 3. May 2015, pp. 224-227.
- [13] B. Hounng, S. Lin, S. Chen, and A. Wang, "Influence of An In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Buffer Layer on the Properties of ITO Thin Films," *Ceram. Int.*, vol. 37, issue 8, Dec. 2011, pp. 3397-3403.
- [14] Y. Joung, B. Choi, and S. Kang, "Effect of Working Pressure on the Electrical and Optical Properties of ITZO Thin Films Deposited on PES Substrate with SiO<sub>2</sub> Buffer Layer," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 5, Oct. 2019, pp. 887-892.
- [15] G. Haacke, "New Figure of Merit for Transparent Conductors," *J. Appl. Phys.*, vol. 47, issue 9, Aug. 1976, pp. 4086-4089.
- [16] H. Park, J. Jeong, Y. Park. H. Kim, and W. Cho, "Electrical, Optical, and Structural Properties of InZnSnO Electrode Films Grown by Unbalanced Radio Frequency Magnetron Sputtering," *Thin Solid Films*, vol. 517, Mar. 2009, pp. 5563-5568.

### 감사의 글

본 과제(결과물)는 2021년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.

### 저자 소개



#### 정양희 (Yang-Hee Joung)

1983년 단국대학교 응용물리학과 졸업(공학사)

1985년 인하대학교 대학원 응용물리학과 졸업(공학석사)

1993년 인하대학교 대학원 전자재료공학과 졸업(공학박사)

현재 전남대학교 전기 및 반도체공학과 교수

※ 관심분야 : 반도체 공정 및 물성



#### 강성준 (Seong-Jun Kang)

1989년 인하대학교 응용물리학과 졸업(공학사)

1994년 인하대학교 대학원 전자재료공학과 졸업(공학석사)

1999년 인하대학교 대학원 전자재료공학과 졸업(공학박사)

현재 전남대학교 전기 및 반도체공학과 교수

※ 관심분야 : 기능성 박막, 반도체 공정 및 재료