

RF파워가 SiO₂/PES 기판위에 증착한 ITZO 박막의 광학적 및 전기적 특성에 미치는 효과

최병균* · 정양희** · 강성준***

Influence of the RF Power on the Optical and Electrical Properties of ITZO Thin Films Deposited on SiO₂/PES Substrate

Byeong-Kyun Choi* · Yang-Hee Joung** · Seong-Jun Kang***

요 약

플라스틱 기판 중에서 열적 안정성과 광학적 특성이 우수한 PES 기판을 선택한 후, 흡습성이 높은 단점을 보완하기 위해 플라즈마 화학기상증착 법으로 SiO₂ 박막을 버퍼층으로 20nm 두께로 증착하였다. 그 후 ITZO 박막을 고주파 마그네트론 스퍼터링 법으로 증착하여 RF파워에 따른 전기적 및 광학적 특성들을 조사하였다. RF파워 50W에서 증착한 ITZO 박막이 $8.02 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 의 비저항과 $50.13 \Omega/\text{sq.}$ 의 면저항으로 가장 우수한 전기적 특성을 나타내었다. ITZO 박막의 가시광 영역(400-800 nm)에서의 평균 투과도는 RF파워가 40, 50W인 경우 80% 이상으로 비교적 높은 값을 나타내었다. 재료 평가 지수들인 Φ_{TC} 와 FOM은 RF파워 50W에서 증착한 ITZO 박막에서 각각 $23.90 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$ 와 $5883 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 로 가장 큰 값을 나타내었다.

ABSTRACT

After selecting a PES substrate with excellent thermal stability and optical properties among plastic substrates, a SiO₂ thin film was deposited as a buffer layer to a thickness of 20nm by plasma-enhanced chemical vapor deposition to compensate for the high moisture absorption. Then, the ITZO thin film was deposited by a RF magnetron sputtering method to investigate electrical and optical properties according to RF power. The ITZO thin film deposited at 50W showed the best electrical properties such as a resistivity of $8.02 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ and a sheet resistance of $50.13 \Omega/\text{sq.}$. The average transmittance of the ITZO thin film in the visible light region(400-800nm) was relatively high as 80% or more when the RF power was 40 and 50W. Figure of Merits (Φ_{TC} and FOM) showed the largest values of $23.90 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$ and $5883 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$, respectively, in the ITZO thin film deposited at 50W.

키워드

ITZO Thin Film, SiO₂/PES Substrate, Moisture Absorption, Figure of Merit (Φ_{TC} and FOM)
ITZO 박막, SiO₂/PES 기판, 흡습성, 재료 평가 지수 (Φ_{TC} 와 FOM)

* 전남대학교 전기 및 반도체공학과
(iloveyou.choi@gmail.com)

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

*** 교신저자 : 전남대학교 전기 및 반도체공학과

• 접수일 : 2021. 03. 15
• 수정완료일 : 2021. 05. 01
• 게재확정일 : 2021. 06. 17

• Received : Mar. 15, 2021, Revised : May. 01, 2021, Accepted : Jun. 17, 2021

• Corresponding Author : Seong-Jun Kang

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

1. 서론

최근 정보통신 산업이 급격히 발전하면서 각종 장치 및 기기로부터 다양한 정보를 시각화하여 인간에게 전달하는 전자 디스플레이 산업의 중요성이 증대하고 있다[1-2]. 그 동안 전자 디스플레이는 고품질의 이미지 구현 및 대형화에 주력하여 왔으나, 점차 유리 기반형 디스플레이에 비해서 가볍고 얇으며 충격에 강하고 휴대가 간편할 뿐만 아니라 공간상, 형태상의 제약에서 상대적으로 자유로워 다양한 응용성을 확보할 수 있는 플라스틱 기판을 사용하는 플렉시블 디스플레이의 중요성이 증대되고 있다[3-9].

플렉시블 디스플레이에 사용되는 플라스틱 기판으로는 Polyethylene terephthalate (PET), Polyether sulfone (PES), Polyethylene naphthalate (PEN) 등이 주로 연구되어 왔다. 플라스틱 기판은 유리에 비해 소재적 장점도 있으나 기존의 유리 기판에서는 문제가 되지 않던 열적 안정성, 흡습성, 광 투과도 등에서 많은 문제점을 안고 있다. 표 1에 PET, PEN, PES 플라스틱 기판의 주요 특성을 비교해서 나타내었다[10].

표 1. 플라스틱 기판의 종류와 특성 비교
Table 1. Comparison of types and characteristics of plastic substrates

	PET	PEN	PES
Coefficient of Thermal Expansion (ppm/°C)	20-25	18-20	54
Glass Transition Temperature (°C)	78	120	223
Optical Transmittance (400-700nm) (%)	89	87	90
Moisture Absorption (%)	0.14	0.14	1.4

표 1에서 보듯이, PES는 PET와 PEN에 비해 유리 전이 온도(Glass Transition Temperature)가 높아 열적 안정성이 우수하고 광 투과도도 가장 높은 값을 나타내지만

열팽창 계수와 흡습성이 높은 단점이 있다. 플라스틱 기판을 사용하는 플렉시블 디스플레이를 구현하는 경우 기판의 열적 안정성이 떨어지기 때문에 저온에서 양질의 투명 전도막을 증착시키는 것이 매우 중요하다. 투명 전도막으로 가장 광범위하게 사용되어온 ITO박막은 높은 증착온도와 거친 표면 등의 문제점을 가지고 있어 플렉시블 디스플레이에 적용하기에는 무리가 있다[11-12]. 최근에 ITO에 ZnO를 첨가한 비정질 구조의 ITZO박막은 저온에서 증착이 가능하고 이에 따라 매끈한 표면을 가지며, 전기적 및 광학적 특성도 ITO박막과 유사하거나 더 우수하여 플렉시블 디스플레이에 응용될 수 있는 가장 유망한 재료로 주목받고 있다[13-14].

본 연구에서는 플라스틱 기판 중에서 열적 안정성과 광학적 특성이 우수한 PES 기판을 선택한 후, 흡습성이 높은 단점을 보완하기 위해 플라즈마 화학기상증착(PECVD) 방법으로 SiO₂ 박막을 버퍼층으로 증착하였다. 그 후 ITZO(In-Sn-Zn) 박막을 고주파 마그네트론 스퍼터링(RF magnetron sputtering) 법으로 증착한 후, RF파 위에 따른 전기적 및 광학적 특성들을 체계적으로 조사하여 플렉시블 디스플레이의 투명 전도막으로서의 응용 가능성을 조사하였다.

II. 실험방법

본 연구에서 선정된 기판인 PES는 기존에 사용되어오던 유리 기판과 달리 아세톤에 의한 손상이 발생하므로 알코올과 정제수로만 각각 2분의 초음파 세척을 한 뒤 질소로 건조하였다. 세척된 PES 기판 위에 플라즈마 화학기상증착 법을 이용하여 SiO₂ 버퍼층을 20nm의 두께로 증착하였다. SiO₂ 버퍼층의 공정조건을 표 2에 상세히 나타내었다. 버퍼층이 증착된 PES 기판 위에 2인치 직경의 ITZO(In₂O₃:SnO₂:ZnO = 90wt.:%:5wt.:%:5wt.%) 세라믹 타겟을 사용하여 고주파 마그네트론 스퍼터링 법으로 ITZO 박막을 증착하였다. 표 3에 ITZO 박막의 공정조건을 나타내었다. ITZO 박막의 구조적 특성은 X선 회절분석기(HR-XRD, Xpert-Pro, MRD)를 이용하여 조사하였다. ITZO 박막의 전기적 특성은 Van der Pauw법을 이용한 홀 효과 측정(Accent, HL5500PC)을 통해 조사하였고, 광학적 특성은 UV-Vis Spectrometer(Varian, Cary-500)를 이용하여 실시하였다.

표 2. SiO₂ 버퍼층의 증착조건
Table 2. Deposition conditions for the SiO₂ buffer layers

Deposition Conditions	SiO ₂ buffer layer
Working Pressure	800 mTorr
Substrate Temperature	Room Temperature
RF Power	40W
N/N ₂ O/SiH ₄ Density	20/200/600 sccm

표 3. ITZO 박막의 증착조건
Table 3. Deposition conditions for the ITZO thin films

Deposition Conditions	ITZO thin film
Base Pressure	~5×10 ⁻⁶ Torr
Working Pressure	3 mTorr
Substrate Temperature	Room Temperature
RF Power	30, 40, 50, 60W

III. 결과 및 논의

상온에서 공정압력을 3mTorr 로 고정시키고 RF파워를 30, 40, 50, 60W로 변화시켜가며 증착한 ITZO 박막의 XRD패턴을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 보듯이, 모든 ITZO 박막은 RF파워에 무관하게 2θ 값 33°부근에서 완만한 피크를 나타내었다. 이는 ITZO 박막이 비정질 구조를 가짐을 의미하는 것이다. ITZO 박막이 비정질 구조를 갖는 이유는 ITO에 ZnO가 첨가됨에 따라 서로 다른 구조를 가지는 물질이 서로의 결정화를 방해하기 때문으로 알려져 있다. 특히 ZnO가 In₂O₃에 비해 상대적으로 강한 결합 에너지를 가지고 있기 때문에 소량의 ZnO로도 박막의 결정화를 효과적으로 방해할 수 있다. 따라서 비정질 구조의 ITZO 박막은 구조적으로 상당히 안정하며, 상온에서 증착할 수 있으므로 플라스틱 기판을 사용하는 플렉시블 디스플레이처럼 공정온도에 민감한 소자에 적용할 때 매우 큰 장점으로 작용할 수 있다.

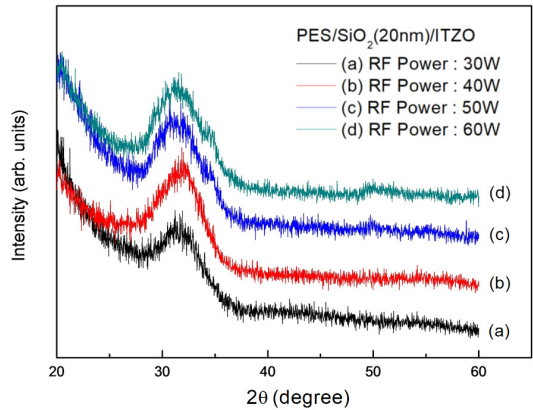
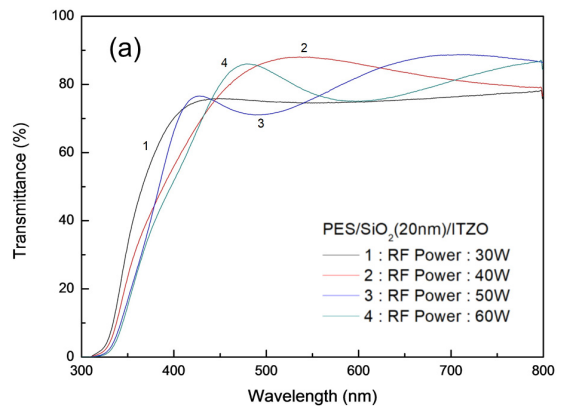


그림 1. RF파워에 따른 ITZO 박막의 XRD 패턴
Fig. 1 XRD patterns of ITZO thin films with various RF powers

상온에서 공정압력을 3mTorr로 고정시키고 RF파워를 30에서 60W 증가시키며 증착한 ITZO 박막의 투과도 곡선을 그림 2(a)에 나타내었다. 공정압력에 따라 박막 두께의 차이가 나고, 이에 따른 간섭 현상 때문에 상이한 형태의 투과도 곡선이 측정된다. 그림 2(b)는 RF파워 변화에 따른 ITZO 박막의 가시광 영역(400-800 nm)에서의 평균 투과도를 나타낸 것이다. RF파워가 30, 40, 50, 60W로 증가함에 따라 가시광 영역에서의 평균 투과도는 각각 75.6, 81.5, 80.9, 78.8%로 조사되었다. 가시광 영역에서의 평균 투과도는 큰 차이를 보이지는 않았지만, RF파워 40W와 50W에서 80% 이상의 비교적 높은 값을 나타내었다.



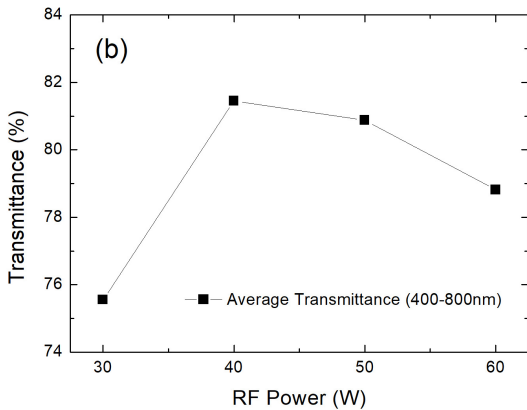


그림 2. RF파워에 따른 (a) 투과도 곡선 (b) 평균 투과도 (400-800 nm)

Fig. 2 (a) Optical transmission spectra and (b) average transmittance (400-800 nm) of the ITZO thin films with various RF powers

그림 3은 상온에서 공정압력을 3mTorr로 고정하고 RF파워를 30, 40, 50, 60W로 변화시켜가며 증착한 ITZO 박막의 비저항과 면저항 값을 나타낸 것이다.

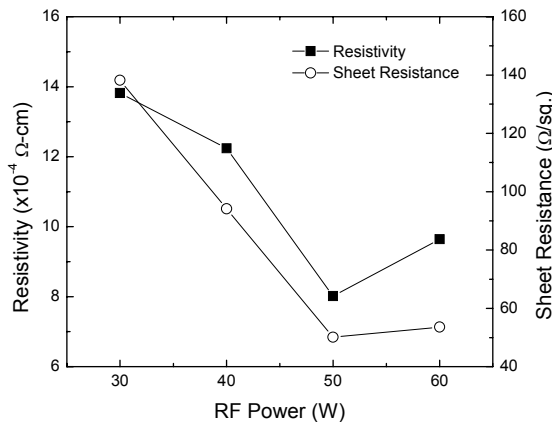


그림 3. RF파워에 따른 ITZO 박막의 비저항과 면저항
Fig. 3 Resistivity and sheet resistance of the ITZO thin films with RF powers

그림 3에서 보듯이, RF파워가 30에서 50W로 증가함에 따라 ITZO 박막의 비저항 값은 13.82 에서 $8.02 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 로 감소하는 경향을 나타내었다. RF파워가 50W를 넘어 60W로 더 커지면 비저항 값은 8.02 에서 9.64×10^{-4}

$\Omega\text{-cm}$ 로 증가하는 추세로 바뀌었다. 이와 같이 RF 파워가 증가함에 따라 비저항 값이 감소하는 원인은 ITZO 박막의 밀도와 밀접한 연관성을 가지고 있다. RF 파워가 증가하면 투명 전도막의 밀도가 커지고 포논 산란과 이온화된 불순물 산란이 감소하여 박막의 전기적 특성이 향상된다는 보고가 있다[15]. 그러나 RF 파워가 60W로 증가하면 비저항 값이 다시 증가하는데, 이는 ITZO 박막의 화학양론적 변화에 기인한 것이라고 생각된다.

공정압력 3mTorr, RF파워 50W에서 증착한 ITZO 박막이 $8.02 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 의 비저항과 $50.13 \Omega/\text{sq}$ 의 면저항으로 가장 우수한 전기적 특성을 나타내었다.

투명 전도막의 품질 또는 성능을 비교하기 위해서 몇 가지 형태의 재료 평가 지수(figure of merit)가 사용되고 있다. 그 중 Haacke에 의해 제안된 재료 평가 지수(Φ_{TC})와 Fernández가 제안한 재료 평가 지수(FOM)가 가장 많이 이용된다.

Haacke에 의해 제안된 재료 평가 지수[16]는 식 (1)과 같다.

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

여기서, T는 지정한 파장 대역의 평균 투과도이고 R_{sh} 는 투명 전도막의 면저항이다.

Fernández가 제안한 재료 평가 지수[17-18]는 식 (2)와 같다.

$$FOM = -1 / \rho \ln T_r \quad (2)$$

여기서, ρ 는 투명 전도막의 비저항 값이고 T_r 은 지정한 파장 대역의 평균 투과도이다. 보통 전자 디스플레이나 비정질 실리콘 태양전지 등에 응용할 경우, 가시광 영역(400-800nm)에서의 평균 투과도를 사용한다.

그림 4는 식 (1)로 표현되는 ITZO 박막의 재료 평가 지수(Φ_{TC})를 RF파워 변화에 따라 나타낸 것이다. RF파워 50W에서 증착한 ITZO 박막의 가시광 영역에서의 평균 투과도는 80.9%로 40W에서 증착한 ITZO 박막에 비해 약간 떨어지나, 면저항이 $50.13 \Omega/\text{sq}$ 로 작아 재료 평가 지수는 $23.90 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$ 로 가장 큰 값을 나타내었다.

그림 5는 RF파워에 따른 ITZO 박막의 식 (2)로 표현된 재료 평가 지수(FOM)를 나타낸 것이다. RF파워 50W에

서 증착한 ITZO 박막의 가시광 영역에서의 평균 투과도는 80.9%이고, 비저항은 $8.02 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 로 가장 우수한 값을 나타내었다. 이를 이용해서 계산한 재료 평가 지수는 $5883 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ 로 가장 큰 값을 나타내었다. 그림 4와 5에 나타낸 재료 평가 지수를 토대로 ITZO 박막의 최적 공정조건은 RF파워 50W, 공정압력 3mTorr임을 알 수 있었다.

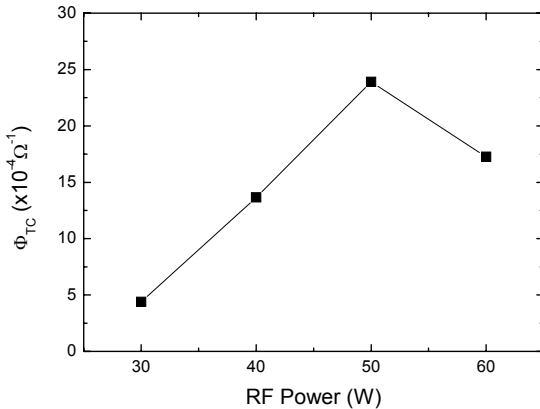


그림 4. RF파워에 따른 ITZO 박막의 Φ_{TC}
Fig. 4 Φ_{TC} of the ITZO thin films with RF power

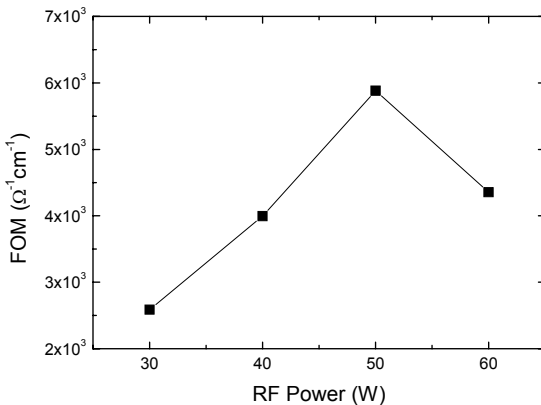


그림 5. RF파워에 따른 ITZO 박막의 FOM
Fig. 5 FOM of the ITZO thin films with RF power

IV. 결론

본 연구에서는 플라스틱 기판 중에서 열적 안정성과 광학적 특성이 우수한 PES 기판을 선택한 후, 흡습성이

높은 단점을 보완하기 위해 플라즈마 화학기상증착 방법으로 SiO₂ 박막을 버퍼층으로 20nm 증착하였다. 그 후 ITZO 박막을 고주파 마그네트론 스퍼터링 법으로 증착한 후, RF파워에 따른 전기적 및 광학적 특성들을 조사하여 플렉시블 디스플레이의 투명 전도막으로서의 응용 가능성을 조사하였다.

XRD측정을 통해 RF파워에 무관하게 모든 ITZO 박막이 비정질 구조를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 투과도 곡선을 측정된 결과, RF파워가 30, 40, 50, 60W로 변화함에 따라 가시광 영역에서의 평균 투과도는 각각 75.6, 81.5, 80.9, 78.8%로 조사되었다. 가시광 영역에서의 평균 투과도는 큰 차이를 보이지는 않았지만, RF파워 40W와 50W에서 80% 이상의 비교적 우수한 값을 나타내었다. 전기적 특성 측정 결과, RF파워 50W에서 증착한 ITZO 박막이 $8.02 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 비저항과 $50.13 \Omega/\text{sq.}$ 의 면저항으로 가장 우수한 전기적 특성을 나타내었다. 식 (1)에 나타낸 Haacke에 의해 제안된 재료 평가 지수(Φ_{TC})와 식 (2)에 나타낸 Fernández가 제안한 재료 평가 지수(FOM)는 RF파워 50W에서 증착한 ITZO 박막에서 각각 $23.90 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$ 와 $5883 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ 로 가장 큰 값을 나타내었다.

본 연구를 통해 상온에서 증착한 비정질의 ITZO 박막이 우수한 광학적 및 전기적 특성을 나타냄을 확인할 수 있었고, 향후 공정 조건에 대한 체계적인 연구를 진행한다면 ITO 박막을 대체할 매우 유망한 투명 전도막 재료가 될 수 있을 것으로 생각된다.

References

- [1] H. Jang, J. Lee, J. Kwak, D. Lee, J. Park, B. Lee, and Y. Noh, "Progress of display performances : AR, VR, QLED, OLED, and TFT," *J. INF. DISP.*, vol. 20, no. 1, Feb. 2019, pp. 1-8.
- [2] A. Phadke, "An Overview of Current Display Technologies and Possible Future Technologies," *2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, Coimbatore, India, Feb. 2019, pp. 1-6.
- [3] Y. Fujisaki, M. Nakata, Y. Nakajima, H. Tsuji, M. Miyakawa, G. Motomura, H. Fukagawa, T. Shimizu, T. Tsuzuki, T. Takei, and T. Yamamoto,

- "Oxide/Organic Semiconductor Electronics on Plastic Substrates for Flexible AMOLED Displays," *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 47, issue 1, May 2016, pp. 633-636.
- [4] M. Chung, S. Kim, D. Yoo, and J. Kim, "Materials and Characteristics of Emerging Transparent Electrodes," *Appl. Chem. Eng.*, vol. 25, no. 3, Apr. 2014, pp. 242-248.
- [5] T. Takatoshi, H. Takeshi, N. Tomoyuki, I. Hiroshi, K. Toshiyuki, F. Shun, and Y. Kazuhiro, "Development of a Vertically-stacked Color-tunable Polychromatic Organic-light-emitting-diode Device for Roll-to-roll Manufacturing," *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 47, issue 1, May 2016, pp. 42-45.
- [6] H. Zhuang, J. Yan, C. Xu, and D. Meng, "Transparent Conductive Ga₂O₃/Cu/ITO Multi-layer Films Prepared on Flexible Substrates at Room Temperature," *Applied Surface Science*, vol. 307, no. 15, Apr. 2014, pp. 241-245.
- [7] B. Houg, S. L. Lin, S. W. Chen, and A. Wang, "Influence of An In₂O₃ Buffer Layer on The Properties of ITO Thin Films," *Ceramics International*, vol. 37, issue 8, Dec. 2011, pp. 3397-3403.
- [8] J. Park, Y. Joung, and S. Kang, "Electrical and Optical Properties of the IZTO Thin Film Deposited on PET Substrates with SiO₂ Buffer Layer," *J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.*, vol. 21, no. 3, Mar. 2017, pp. 578-584.
- [9] 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 SiO₂ Buffer Layer," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 5, Oct. 2019, pp. 887-892.
- [10] S. Hong, "Polymeric Substrate Materials for Flexible Displays," *Polymer Science and Technology*, vol. 28, no. 6, Dec. 2017, pp. 470-475.
- [11] U. Betz, M. K. Olsson, J. Marthy, M. F. Escola, and F. Atamny, "Thin Films Engineering of Indium Tin Oxide : Large Area Flat Panel Displays Application," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 200, issues 20-21, May 2006, pp. 5751-5759.
- [12] 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.
- [13] D. Son, Y. Ko, D. Jung, J. Boo, S. Choa, and Y. Kim, "Thermal Effect on Characteristics of IZTO Thin Films Deposited by Pulsed DC Magnetron Sputtering," *Bull. Korean Chem. Soc.*, vol. 32, issue 3, Mar. 2011, pp. 847-851.
- [14] J. Bae, J. Moon, S. Jeong, J. Kim, J. Kang, D. Kim, J. Kim, J. Park, and H. Kim, "Transparent Conducting Indium Zinc Tin Oxide Anode for Highly Efficient Phosphorescent Organic Light Emitting Diodes," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 155, issue 1, Jan. 2008, pp. J1-J6.
- [15] H. C. Pan, M. H. Shuao, C. Y. Su, and C. N. Hsiao, "Influence of Sputtering Parameter on the Optical and Electrical Properties of Zinc-doped Indium Oxide Thin Films," *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 23, no. 4, June 2005, pp. 1187-1191.
- [16] G. Haacke, "New Figure of Merit for Transparent Conductors," *J. Appl. Phys.*, vol. 47, issue 9, Aug. 1976, pp. 4086-4089.
- [17] S. Fernández, A. Martínez-Steele, J. J. Gandía, and F. B. Naranjo, "Radio frequency sputter deposition of high-quality conductive and transparent ZnO : Al films on polymer substrates for thin film solar cells applications," *Thin Solid Films*, vol. 517, issue 10, Mar. 2009, pp. 3152 - 3156.
- [18] N. Hu, H. Cai, X. Dai, G. Chen, Y. Wang, and D. Zhang, "Figure of merit for front electrodes of solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 161, Mar. 2017, pp. 382-387.

저자 소개



최병균 (Byeong-Kyun Choi)

2004년 영동대학교 전자공학과 졸업(공학사)

2006년 인하대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2012년-현재 전남대학교 대학원 전기 및 반도체공학과 (박사과정)

※ 관심분야 : LED, 광학재료 및 공정



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

