

OHP 필름위에 증착된 AZO 반도체 박막의 광학 및 전기적인 특성 분석

김경보¹, 이종필², 김무진^{3*}

¹인하공업전문대학 금속재료과 교수, ²중원대학교 전기전자공학전공 교수, ³강남대학교 IoT 전자공학과 교수

Optical and electrical properties of AZO thin films deposited on OHP films

Kyoung-Bo Kim¹, Jongpil Lee², Moojin Kim^{3*}

¹Professor, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Inha Technical College

²Professor, Department of Electrical and Electronic Engineering, Jungwon University

³Professor, Department of IoT Electronic Engineering, Kangnam University

요약 본 논문에서는 투과도가 높은 OHP 필름상에 AZO 반도체 물질을 기반으로 한 광센서를 제작하여 광소자 특성 및 이를 구성하고 있는 반도체 소재의 물성에 대해 설명한다. 최근 전자소자 분야에서 주요 이슈가 되고 있는 플렉서블 광소자를 구현하기 위해서 최초로 투명하고 굽힘성이 있는 OHP 필름을 기판으로 사용하였다. 또한, 투명 전극 및 반도체 물질로 양산에 사용되고 있는 ITO는 인듐의 희소성 때문에 가격이 높다. 따라서 이 물질을 대체할 수 있는 소재를 발굴해야 하며, AZO 소재가 가능성이 있는지 Au/Al/AZO/OHP 필름 구조의 광센서 소자를 구현하여 광학 및 전기적인 특성을 평가하였다. 소자 및 이를 구성하는 소재들은 벤딩(굽힘)에 의한 물성 변화가 없었으며, 이와 같은 결과들은 차세대 소자로의 적용에 대한 가능성을 제공한다. 하지만, 양산을 위해서는 OHP 필름 표면의 미세한 스크래치를 제거해야 하며, 뿐만 아니라 광전류를 향상시킬 수 있는 재료, 구조 기반으로 최적화된 소자를 연구해야 할 것이다.

주제어 : 투명 OHP 필름, AZO 반도체 물질, 광센서, 투명전극, 벤딩특성

Abstract In this paper, an optical sensor based on an AZO semiconductor material is fabricated on an OHP film with high transmittance, and the characteristics of the optical element and the properties of the semiconductor material are described. In order to realize a flexible optical device, which is a major issue in the field of near-electronic devices, a transparent and bendable OHP film was used as a substrate. In addition, ITO, which is used for mass production as a transparent electrode and a semiconductor material, is expensive due to the scarcity of indium. Therefore, it is necessary to find a material that can replace it. The optical and electrical properties of the Au/Al/AZO/OHP structure are implemented to evaluate whether AZO is possible. It was found that devices and materials had no characteristic change by bending, and these results provide a possibility for application to a next-generation device. However, it is necessary to remove fine scratches on the surface of the OHP film, as well as optimized devices based on materials and structures that can improve the photocurrent.

Key Words : Transparent OHP film, AZO, Optical sensor, Transparent electrode, Bending property

*Corresponding Author : Moojin Kim (moojinkim7@kangnam.ac.kr)

Received July 25, 2020

Accepted September 20, 2020

Revised August 12, 2020

Published September 28, 2020

1. 서론

자동차와 드론을 포함한 4차 산업혁명에서 중요한 부품으로 센서가 있으며, 이것은 미세한 변화를 감지하여 모듈을 통해 필요한 곳에 신호를 제공하며, 제어하는 기기들과 연동된다[1,2]. 이와 같은 센서중에서 사람의 시각과 연관되는 것으로 빛에 반응하는 광센서가 있으며, 물체의 모양이나 빠르기 등에 의하여 빛이 물체에 반사되는 것을 받아들여 소자 특성에 차이가 생기는 것으로 나타나며, 적외선, 가시광선, 자외선 등의 다양한 파장에 따라 반응하는 반도체를 이용하는 소자이다[3,4].

다양한 분야에서 광범위하게 활용되고 있으며, 비교적 간단한 광스위치로부터 최근 스마트폰에 적용되는 카메라 센서나 CCD (Charge Coupled Device)와 같은 고도 기술이 필요한 전자기기까지 다양한 곳에 사용되고 있다. 최근에는 반도체 기술 발전으로 기능이 다양하고 복잡한 CPU가 내장된 센서가 생산되고 있으며, 우리 생활과 밀접한 정보기에 사용되고 있다. 인간의 감각보다 민감한 센서들이 만들어지면서 Fig. 1(a)처럼 공장에서 정밀하고 정확한 제어나 사람을 닮은 로봇이 사람을 대신하는 공장자동화를 가능하게 하고 있다.

안전한 산업현장은 센서와 이들과 연관된 제어시스템 개발인 것으로 센서를 포함한 연관된 산업들은 중요한 기간 산업으로 급부상하고 있다. 무엇보다 안전이 중요한 자동차 산업 부문에서는 무인 자동차 개발을 위해서 센서 개발이 주요한 이슈로 급부상하고 있는데, 전 시스템을 자동화시키고 차량과 외부 환경 파악을 하기 위해 전체에 배치되어 있다[Fig. 1(c)]. 반도체 분야의 지속적인 발전은 기존에는 불가능했던 작으며, 성능이 우수하고 저가인 소자들의 양산을 가능하게 하였다[5,6].

최첨단 장비들은 광학적 비접촉 방식으로 구성된 정밀하고, 재현성이 높은 자동화 센서 시스템을 요구하고 있기 때문에 공장 자동화(스마트팩토리 [Fig. 1(b)])를 위해서는 전자시스템 구축이 필수적이며, 이 중에서 기본 광센서 기술에서는 광민감도가 높은 반도체 재료의 발굴이며, 다음으로 이를 이용한 광소자 제작이다.

최근 광센서를 포함한 전자소자분야는 벤딩이 가능하도록 유기물이나 steel 기판을 이용하여 소자를 제작하고 있다. 또한, 차세대 기술을 위하여 투명하고 가볍고, 플렉서블 및 스트레처블 특성이 우수한 소재에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 플렉서블 광센서를 초저가로 생산이 가능하도록 우리 주변에서 구할 수 있

는 기판 소재를 최초로 활용하고자 한다.



Fig. 1. (a) Product quality evaluation in the production line with optical sensors, (b) Smart factories with sensors and control systems, and (c) Various sensors in autonomous vehicles.

2. 본론

본 연구에서는 디스플레이 분야의 투명전극[7-9]으로 사용되는 인듐(Indium)의 희소성 때문에 비교적 가격이 높고, 휘는 특성이 취약한 ITO(Indium Tin Oxide) 물질을 대체할 수 있는 AZO(Aluminium Zinc Oxide)를 투명한 플라스틱 기판상에 구현하여 광센서 소자를 제작하여 그 특성을 분석하였다.

AZO 박막은 이미 polyethylene naphthalate (PEN) 이나 polyethylene terephthalate (PET) 와 같은 다양한 기판상에 코팅되어 막질 특성이 평가되었다[10,11].

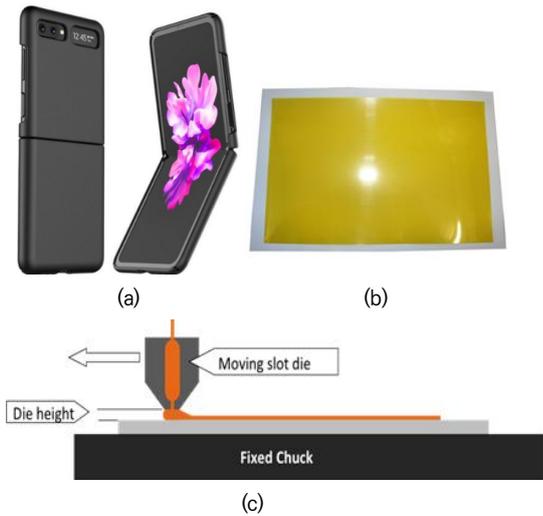


Fig. 2. (a) Samsung's Galaxy Z-Flip, (b) Polyimide film coated on glass, and (c) Slot-die coating technology.

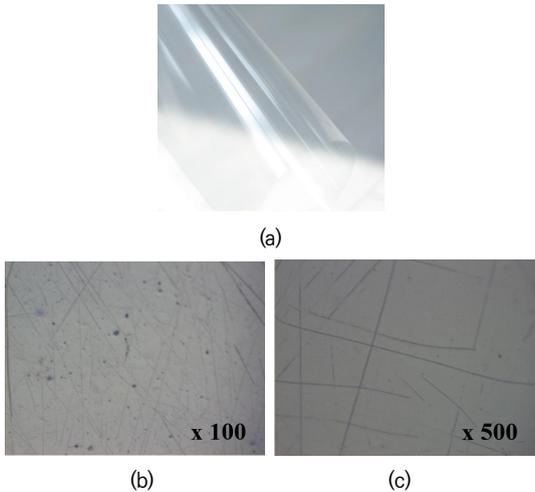


Fig. 3. (a) OHP film. Images for (b) 100 and (c) 500 magnification observed by optical microscope.

2.1 플렉서블 기판 및 투명전극 소재를 기반으로 한 광센서 소자 제작

현재 Fig. 2(a)의 플렉서블 AMOLED 디스플레이가 적용되어 갤럭시 Z-Flip이라는 제품명으로 출시되고 있다[12-14]. 이것이 가능한 이유는 액체 폴리이미드를 대면적의 유리기판에 균일한 막을 도포할 수 있는 slot

die 기술로 코팅(Fig. 2(c))한 후 furnace장비를 이용한 특별한 열처리를 통해 400도 이상의 온도에서 견디도록 했기 때문이다[14]. Fig. 2(b)는 글라스상에 폴리이미드가 코팅된 샘플의 이미지이다. 폴리이미드는 카본(Carbon)과 수소(Hydrogen) 등 유기물을 구성하는 성분으로 이루어져있기 때문에 노란색을 나타낸다. 투명 디스플레이를 생산하기 위해서는 투명한 폴리이미드를 개발해야하며, 고온에 견딜 수 있도록 관련된 업체들이 개발중이다. 이와는 반대로 저온으로 디스플레이 양산이 가능하도록 기술개발도 추진중이며, 이 방법이 성공한다면 본 논문에서 기관으로 사용하는 OHP(OverHead Projector) 필름이 투명 플렉서블 디스플레이의 주요한 소재로 사용가능할 것이다.

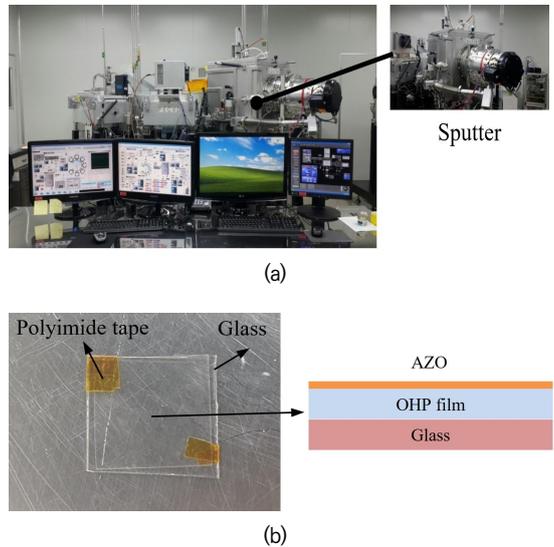


Fig. 4. (a) Sputter equipment, and (c) AZO thin layer on OHP film/Glass.

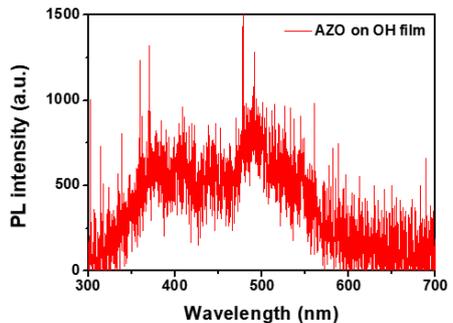


Fig. 5. PL spectrum of AZO/OHP film/Glass structures.

그 이유는 OHP 두께가 100 μm 로 얇아 굽힘성이 우수하며, 또한, 빛의 투과도가 90%이상으로 높기 때문이다(Fig. 3(a)). 그러나 현미경으로 확인해본 필름의 표면은 Fig. 3(b)와 3(c)처럼 많은 스크래치 자국이 관찰되었다. 이는 개선해야 할 문제점으로 향후 이 소재에 대한 집중적인 연구가 필요하다.

투명전극용인 AZO(Aluminium Zinc Oxide)를 Fig. 4(a)와 같이 클러스터 시스템 중의 하나인 sputter 장비로 OHP 상에 두께 1000 \AA 의 얇은 박막을 형성하였으며, 증착된 결과는 Fig. 4(b)에 나타내었다. AZO의 sputter yield를 높이기 위하여 magnetron sputtering을 하였으며, Ar을 이용하여 플라즈마를 형성시켰다[15,16]. 공정 조건은 파워 RF(Radio Frequency) 100W, 압력 10^{-3} Torr이며, 상온에서 진행하였다. 필름이 얇기 때문에 유리에 노란색 폴리이미드 테이프로 고정시켰다(Fig. 4(b)). OHP위에 구현된 AZO 박막의 결정성은 Fig. 5와 같이 PL(Photoluminescence)를 측정하여 관찰하였다.

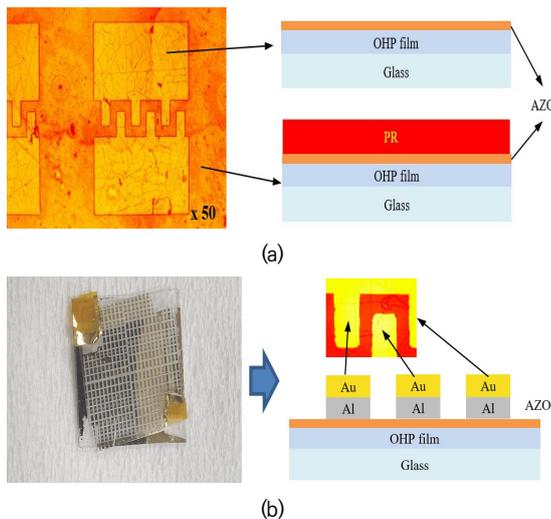


Fig. 6. (a) Images of PR patterning for metal contacts. The upper figure on the right is the cross section of the area without PR, and the lower figure is the image of the part with PR. (b) Photo and cross-section of photo sensor device after metal deposition and PR removal.

외부로부터 AZO에 전압이나 전류를 공급하여 광센선의 동작을 알아보기 위해서는 패턴닝된 전극이 필요하다. 따라서, photolithography와 두 가지 서로 다른 금속 물질(알루미늄과 은)을 하나의 장비로 증착할 수

있는 dual sputter를 이용하여 형성하였다. 먼저 금속이 있어야 할 곳과 그렇지 않을 곳을 Fig. 6(a)와 같이 PR(Photoresist)로 패터닝하고 이후 이 샘플을 dual sputter에서 금속막 증착 공정을 진행하여 PR을 제거하면, 원하는 위치의 금속만 남게 되어(Fig. 6(b)), 광센서 제작이 완료된다. Fig. 6처럼 소자 크기를 정한 것은 광센서 특성이 빛에 의해 반응하여 내부에서 많은 캐리어들이 생성되어야 하므로 이에 최적화되도록 설계하였으며, 또한, OHP 표면의 스크래치에 의한 소자 영향성을 줄이고자 하였다. 알루미늄의 스퍼터 타겟은 순도 99.9995%이며, 기관사이의 거리는 20cm, DC 파워 1000W, 공정 압력 10^{-3} Torr 분위기에서 진행하였으며, 고른 코팅을 위해서 5rpm의 속도로 회전시킨 결과 초당 4.5 \AA 의 속도로 쌓였다. 또한, 은은 3×10^{-2} Torr, RF 300W에서 5분간 수행했으며 약 1000 \AA 의 막의 두께가 확인되었다.

2.2 광센서 소자 특성 평가

암실(Dark box)내에 probe station이 구현된 장비(Fig. 7(a))를 이용하여 광센서 소자의 성능을 평가하였다. 빛이 소자에 조사되는 유무에 따른 전류-전압특성을 측정하기 위해서 두 개의 probe tip을 고배율 현미경을 보면서 표면에 있는 은 금속 전극에 접촉하였으며, 그 이미지를 Fig. 7(b)에 나타내었다.

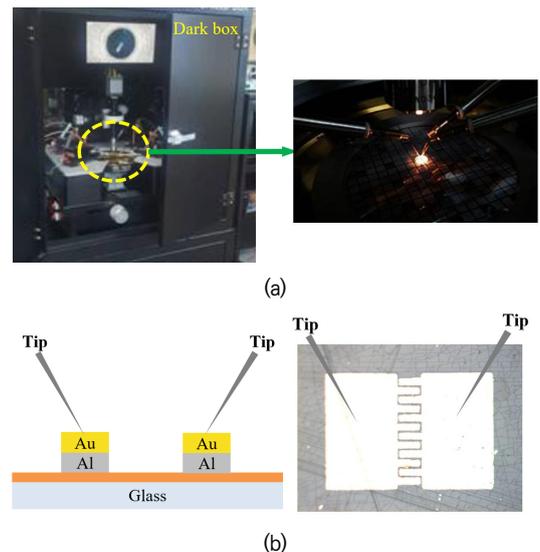


Fig. 7. (a) PL spectrum of AZO/OHP film/Glass structures.

광센서로의 동작을 확인하기 위해 소자에 빛을 조사하기 전후의 전기적인 측정 결과를 Fig. 8(a)에 보였다. AZO와 알루미늄의 일함수(Work function)은 각각 4.6eV, 4.08eV이기 때문에 이 두물질의 접촉은 저항성 특성을 나타내며, 그림에서처럼 전압에 따른 전류는 옴의 법칙에 의해 직선이 됨을 알 수 있다[17]. 빛을 비추었을 때 반도체 물질내의 밴드갭(Bandgap: E_G)보다 큰 광자들에 의해 가전자대역(Valence band)에 있는 전자들은 전도대역(Conduction band)로 여기되어 자유 전자가 되고 전자가 빠져나간 빈자리는 양전하가 된다. AZO의 밴드갭은 약 3.37eV이므로 파장(λ)와의 관계식

$$\lambda = 1.24/E_G \quad (1)$$

(1)로부터 약 350nm이하의 파장을 가진 빛은 전자와 정공 생성에 직접적인 영향을 주며 이들 캐리어들은 외부에서 인가된 전압에 의해 전류가 흐르는데 기여한다.

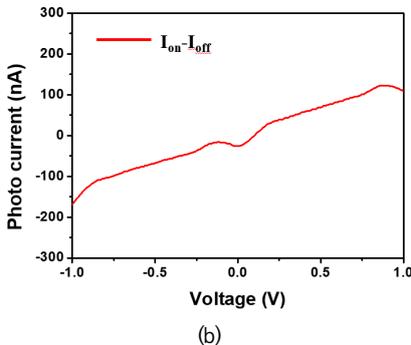
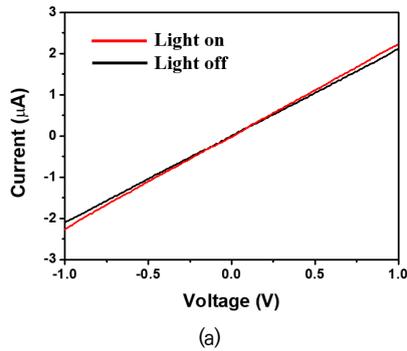


Fig. 8. Graph of (a) voltage and current characteristics before and after irradiating light to the light sensor and (b) current difference (This means the optical current flowing by the carrier generated by the light.).

실제 빛에 의해 야기되는 전류는 Fig. 8(b)와 같이 빛을 조사한 데이터에서 조사하기 전의 값을 빼면 얻을 수 있다. 0V의 전압 근처에서 약간의 왜곡된 그래프를 확인할 수 있는데 이것은 서로 다른 물질인 AZO와 알루미늄의 계면에는 다수의 결합하지 않은 분순물(defect)들이 존재하기 때문에 생성된 캐리어가 이것에 의해 트랩(trap)되어 외부 전류에 기여를 하지 못하기 때문이다.

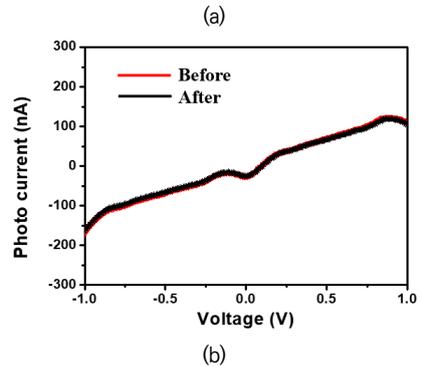


Fig. 9. (a) Bending characteristic evaluation unit, (b) Photoelectric current characteristic before and after bending.

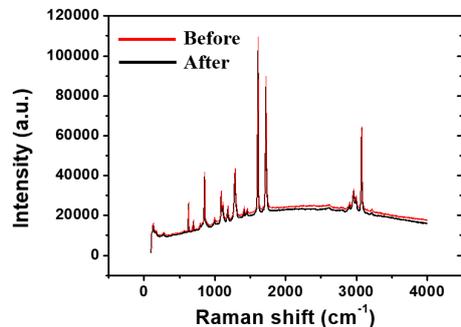


Fig. 10. Raman characteristic before and after bending.

플렉서블 광센서로의 적용을 위한 굽힘 특성을 평가하기 위하여 굽힘의 반경 및 횟수 조절이 가능한 Fig. 9(a)의 장치를 이용하였다. 벤딩 반경은 1mm, 10,000

변 굽혔을 때의 광전류 특성을 Fig. 9(b)에 보였으며, 벤딩에 의한 전기적인 특성 변화는 없는 것을 알 수 있다. 또한, AZO와 OHP 필름의 굽힘에 의한 변성을 확인하기 위하여 Fig. 10에서와 같이 Raman 분석을 하였으며, 굽힘 전·후 반도체 박막 및 기판은 동일한 특성을 나타내었다. 이를 통해 반도체 AZO와 OHP 기판은 플렉서블 광소자에 적합한 재료 및 소재라 할 수 있다.

3. 결론

빛에 의해 반응하는 광소자중 4차 산업혁명의 주요 핵심부품으로 광센서가 있으며, 광에 반응하는 물질인 ITO 반도체를 대체하기 위하여 AZO를 검토하였으며, 또한, 플렉서블 전자소자를 구현하기 위하여 투명한 OHP 필름을 기판으로 사용하였다.

AZO/OHP 구조는 AZO가 패턴이 가능했기 때문에 화학물질에 대한 높은 저항성, 스퍼터 장비로 AZO를 형성시켰기 때문에 저온 공정, 재현성, ITO보다 저가로 생산이 가능함을 확인하였다.

또한, Au/Al/AZO/OHP 필름 구조의 광센서 소자를 제작하였으며, 광 조사에 따른 전압-전류 특성을 조사하였다. 소자 및 소재는 벤딩(굽힘)에 대해 변화가 없음을 관찰하였으며, 이러한 결과들은 플렉서블 광센서 소자로의 적용을 가능하게 한다. 하지만, OHP 필름의 스크래치 해결을 해야하며, AZO 박막의 응용가능성을 보다 확대하기 위해 다이오드나 트랜지스터와 같은 소자를 제작하여 가능성을 추가 검증하여야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] J. I. Lee, S. Lee, H. M. Oh, B. R. Cho, K. H. Seo & M. Y. Kim (2020). 3D Contact Position Estimation of Image-Based Areal Soft Tactile Sensor with Printed Array Markers and Image Sensors. *Sensors*, 20(13), 3796. DOI : 10.3390/s20133796
- [2] A. Inoue, T. Okino, S. Koyama & Y. Hirose. (2020). Modeling and Analysis of Capacitive Relaxation Quenching in a Single Photon Avalanche Diode (SPAD) Applied to a CMOS Image Sensor. *Sensors*, 20(10), 3007. DOI : 10.3390/s20103007
- [3] B. Xie, R. Xie, K. Zhang, Q. Yin, Z. Hu, G. Yu, F. Huang & Y. Cao. (2020). Self-filtering narrowband high performance organic photodetectors enabled by manipulating localized Frenkel exciton dissociation. *Nature Communications*, 11(2871), 1-9. DOI : 10.1038/s41467-020-16675-x
- [4] M. Roslina & M. R. Mokhtar. (2020). Self-referencing optical intensity sensor based on radio-frequency spectrum interrogation, *Optical Fiber Technology*, 53, 102009. DOI : 10.1016/j.yofte.2019.102009
- [5] X. Wang, W. Xu, Izhar & Y.-K. Lee. (2020). Theoretical and Experimental Study and Compensation for Temperature Drifts of Micro Thermal Convective Accelerometer. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 29(3), 277-284. DOI : 10.1109/JMEMS.2020.2977950
- [6] S. Ahmed, X. Zou, N. Jaber, M. I. Younis & H. Fariborzi. (2020). A Low Power Micro-Electromechanical Resonator-Based Digital to Analog Converter. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 29(3), 320-328. DOI : 10.1109/JMEMS.2020.2988790
- [7] S. C. Dixon, D. O. Scanlon, C. J. Carmalt & I. P. Parkin. (2016). n-Type doped transparent conducting binary oxides: an overview. *Journal of Materials Chemistry C*, 4, 6946-6961. DOI : 10.1039/C6TC01881E
- [8] Y. Fang, D. Commandeur, W. C. Lee & Q. Chen. (2020). Transparent conductive oxides in photoanodes for solar water oxidation. *Nanoscale Advances*, 2, 626-632. DOI : 10.1039/C9NA00700H
- [9] M. Esro, S. Georgakopoulos, H. Lu, G. Vourlias, A. Krier, W. I. Milne, W. P. Gillin & G. Adamopoulos. (2016). Solution processed SnO₂:Sb transparent conductive oxide as an alternative to indium tin oxide for applications in organic light emitting diodes. *Journal of Materials Chemistry C*, 4, 3563-3570. DOI : 10.1039/C5TC04117A
- [10] Y. Li, M. Wu, Y. Sun & S. Yu (2019). High-performance flexible transparent conductive thin films on PET substrates with a CuM/AZO structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 13271-13279. DOI : 10.1007/s10854-019-01690-6
- [11] H.-L. Shen, H. Zhang, L-F Lu, F. Jiang & C. Yang (2010). Preparation and properties of AZO thin films on different substrates. *Progress in Natural Science: Materials International*, 20, 44-48. DOI : 10.1016/S1002-0071(12)60005-7
- [12] X. Gao, L. Lin, Y. Liu & X. Huang. (2015). LTFS TFT Process on Polyimide Substrate for Flexible

AMOLED. *Journal of Display Technology*, 11(8), 666-669.

- [13] K. B. Kim, J. P. Lee, M. J. Kim & Y. S. Min. (2019). Trend of Crystallization Technology and Large Scale Research for Fabricating Thin Film Transistors of AMOLED Displays. *Journal of Convergence for Information Technology*, 9(5), 117-124.
DOI : 10.22156/CS4SMB.2019.9.5.117
- [14] K. B. Kim, J. P. Lee, M. J. Kim & Y. S. Min. (2019). Characteristics of Excimer Laser-Annealed Polycrystalline Silicon on Polymer layers. *Journal of Convergence for Information Technology*, 9(3), 75-81.
DOI : 10.22156/CS4SMB.2019.9.3.075
- [15] H. Khachatryan, S. N. Lee, K. B. Kim & M. J. Kim (2019). Deposition of Al Thin Film on Steel Substrate: The Role of Thickness on Crystallization and Grain Growth. *Metals*, 9(12), 1-8.
DOI : 10.3390/met9010012
- [16] H. Khachatryan, S. N. Lee, K. B. Kim, H. K. Kim & M. J. Kim. (2018). Al thin film: The effect of substrate type on Al film formation and morphology. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 122, 109-117.
DOI : 10.1016/j.jpcs.2018.06.018
- [17] Y. Leprince-Wang. (2014). Au Schottky junction with electrodeposited ZnO thin films and nanowires. *The European Physical Journal Applied Physics*, 68(1), 10401.
DOI : 10.1051/epjap/2014140211

김 경 보(Kyoung-Bo Kim)

[정회원]



- 2000년 8월 : 포항공과대학교 신소재 공학과(공학박사)
- 2000년 8월 ~ 2001년 5월 : 포항공과대학교 신소재공학과(박사후임연구원)
- 2001년 5월 ~ 2004년 8월 : 나이비스(차장)

- 2004년 8월 ~ 2008년 12월 : 삼성디스플레이(책임연구원)
- 2009년 1월 ~ 2014년 11월 : 포스코(전문연구원)
- 2014년 11월 ~ 2016년 02월 : 한국생산기술연구원(전문위원)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 금속재료과 교수
- 관심분야 : Solar Cell, Display, Metal processing
- E-Mail : kbkim@inhac.ac.kr

이 종 필(Jongpil Lee)

[정회원]



- 1999년 8월 : 광운대학교 전기공학과(공학석사)
- 2004년 8월 : 광운대학교 전기공학과(공학박사)
- 1991년 2월 ~ 2015년 5월 : 한국전기학원(Director)

- 2015년 6월 ~ 현재 : 중원대학교 전기전자공학전공 교수
- 관심분야 : Solar Heat, Electric Car, Microgrid, Power System
- E-Mail : leejp@jwu.ac.kr

김 무 진(Moojin Kim)

[정회원]



- 2005년 2월 : 포항공과대학교 전기전자공학과(공학박사)
- 2005년 2월 ~ 2012년 8월 : 삼성디스플레이(책임연구원)
- 2012년 8월 ~ 2015년 3월 : 포스코(책임연구원)

- 2015년 4월 ~ 2020년 2월 : 중원대학교 전기전자공학전공 교수
- 2020년 3월 ~ 현재 : 강남대학교 IoT전자공학과 교수
- 관심분야 : Solar Cell, Display, Semiconductor, Laser
- E-Mail : moojinkim7@kangnam.ac.kr