

F 농도 조절을 통한 AZO 박막의 광학적 전기적 특성 향상

장수영¹ · 장준성¹ · 조은애¹ · Vijay Chandrakant Karade¹ · 김지훈³ · 문종하¹ · 김진혁^{1,2†}

¹전남대학교 신소재공학과, ²전남대학교 광전자융합기술연구소

³전기전자컴퓨터공학부, 광주과학기술원

Improvement of Optical and Electrical Properties of AZO Thin Films by Controlling Fluorine Concentration

Suyoung Jang¹, Jun Sung Jang¹, Eunae Jo¹, Vijay Chandrakant Karade¹,
Jihun Kim³, Jong-Ha Moon¹ and Jin Hyeok Kim^{1,2†}

¹Department of Materials Science and Engineering, Chonnam National University,
77 Youngbong-ro, Buk-Gu, Gwangju 61186, Republic of Korea

²Optoelectronics Convergence Research Center, Chonnam National University,
77 Youngbong-ro, Buk-Gu, Gwangju 61186, Republic of Korea

³School of Integrated Technology, Gwangju Institute of Science and Technology,
123 Cheomdangwagi-ro, Buk-gu, Gwangju 61005, Republic of Korea

(Received January 25, 2021 : Revised February 9, 2021 : Accepted February 10, 2021)

Abstract Zinc oxide (ZnO) based transparent conducting oxides (TCO) thin films, are used in many applications such as solar cells, flat panel displays, and LEDs due to their wide bandgap nature and excellent electrical properties. In the present work, fluorine and aluminium-doped ZnO targets are prepared and thin films are deposited on soda-lime glass substrate using a RF magnetron sputtering unit. The aluminium concentration is fixed at 2 wt%, and the fluorine concentration is adjusted between 0 to 2.0 wt% with five different concentrations, namely, Al₂ZnO₉₈(AZO), F_{0.5}AZO_{97.5}(FAZO1), F₁AZO₉₇(FAZO2), F_{1.5}AZO_{96.5}(FAZO3), and F₂AZO₉₆(FAZO4). Thin films are deposited with an RF power of 40 W and working pressure of 5 m Torr at 270 °C. The morphological analysis performed for the thin film reveals that surface roughness decreases in FAZO1 and FAZO2 samples when doped with a small amount of fluorine. Further, optical and electrical properties measured for FAZO1 sample show average optical transmissions of over 89 % in the visible region and 82.5 % in the infrared region, followed by low resistivity and sheet resistance of $3.59 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ and 5.52 Ω/sq , respectively. In future, these thin films with excellent optoelectronic properties can be used for thin-film solar cell and other optoelectronics applications.

Key words solar cells, thin films, transparent conducting electrode, F, Al co-doped ZnO (FAZO).

1. 서 론

투명전극(transparent conducting oxide, TCO)은 투명하면서 전도성 또한 가지는 물질로서, 평면 패널 디스플레이(flat panel displays), 태양전지(solar cells), 박막 트랜지스터(thin film transistors), LED (light-emitting

diodes), 반도체 레이저(semiconductor LASER) 등 다양한 광전자 소자 분야에서 활용되고 있다. 특히 박막 태양전지에 window layer로서 사용되는 투명전극은 빛을 흡수층까지 전달해야 하므로 광학적으로 투명해야 하고 캐리어의 이동이 원활해야 하므로 전기적으로 전도성이 좋아야 한다. 따라서 태양전지에 적용되기 위한 적합한

[†]Corresponding author

E-Mail : jinhyeok@chonnam.ac.kr (J. H. Kim, Chonnam Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, 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.

투명전극의 특성은 $10^{-3} \Omega\text{cm}$ 이하의 비저항, 85 % 이상의 가시광선 영역의 투과율을 가져야 한다. 또한 기존 투명전극의 350 nm 이하 및 800 nm 이상의 파장 영역에서 낮은 투과율을 보완하기 위해 넓은 금지대(band gap)를 갖는 물질의 개발 역시 필수적이다.¹⁾

이러한 특성을 만족하는 물질은 indium doped tin oxide 이며 현재까지 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다.²⁾ 특히, ITO는 낮은 비저항($\sim 10^{-4} \Omega\text{cm}$)과 높은 투과율(> 85 %) 특성을 가져 고성능의 투명전극을 요구하는 다양한 분야에 사용되고 있다.³⁾ 하지만 ITO는 인듐(In)의 고갈로 인한 희소성과 이에 따른 경제적 문제가 있고,⁴⁾ 수소 플라즈마 환경에서 열적 화학적 안정성이 낮으며 기계적인 굽힘 등 응력에 취약하기 때문에 박막을 얇게 증착해야 하는 문제가 있다.⁵⁾

이러한 문제를 해결하기 위해서 많은 대체 물질들이 연구되고 있는데, 그 중에서도 산화 아연(ZnO)은 가시광선 및 근적외선 범위에서 우수한 투과도와 3.3 eV 이상의 금지대(band gap), 낮은 비저항 특성을 가져 n형 반도체로서 상대적으로 높은 전도성을 띄고 있다.⁶⁾ 게다가 ITO의 구성원소인 In과 비교하여 아연(Zn)은 자원이 매우 풍부하고, 열적 화학적 안정성이 높으며 독성 또한 없기 때문에 차세대 TCO 물질로써 적합하다.^{6,7)}

하지만, 순수한 ZnO의 경우 고성능 소자로 쓰이기에 ITO에 비해 비저항 및 금지대 특성이 상대적으로 떨어진다. 따라서 3족원소나 Mg 혹은 F 등을 도핑해서 특성을 향상시킨다. 3족원소의 경우 B, Al, Ga 및 In 등이 있는데, 이를 ZnO에 도핑 할 경우 Zn와 치환되어 도너(donor) 역할을 하면서 전기적 특성을 향상시킨다. 또한 Mg이나 F의 경우 ZnO에 도핑되어 금지대를 넓히고 투과도를 향상시켜 광학적 특성을 향상시킨다.⁸⁾

다양한 3족 원소와 F의 조합 중에서도 Al-F를 ZnO에 동시에 도핑할 경우, 실온에서 전이 레벨이 낮아 자유 전자를 공급하기 쉽기 때문에 전자 이동도가 높아져 전기적 특성이 향상되고 F와 O의 치환으로 인해 발생한 전자들이 전도대에 쌓여 금지대를 증가시킴으로 인해 광학적 특성이 향상된다.⁹⁾

ZnO 기반 투명전극을 증착시키는 방법에는 졸겔 방법(sol-gel method),¹⁰⁾ CVD (chemical vapor deposition),¹¹⁾ 펄스 레이저 증착법(pulse laser deposition),¹²⁾ 스프레이 열분해(spray pyrolysis),¹³⁾ 마그네트론 스퍼터링(magnetron sputtering)¹⁴⁾ 등 다양한 방법이 있다. 그 중에서도 RF 마그네트론 스퍼터링 증착법은 저온 공정이 가능하며 독성이 있는 물질로부터 안전하게 사용 가능한 장점이 있다. 또한 두께 제어가 용이해서 재현성 있는 박막을 만들어낼 수 있다.

본 연구에서는 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용해 유

리기판에 F과 Al을 동시에 도핑한 ZnO (F and Al co-doped ZnO, FAZO)를 증착하여 F의 함량(0~2.0 wt%)이 박막의 전기적, 광학적, 구조적 특성에 주는 영향을 분석하였다

2. 실험방법

2.1 타겟제작

RF 마그네트론 스퍼터링 시스템을 사용하여 박막을 증착하기 위해 고순도의 ZnO (99.99 %), Al_2O_3 (99.99 %), ZnF_2 (99.99 %) 파우더를 이용하여 타겟을 제작하였다. Al 함량을 2 wt%로 고정하고 F 함량을 0~2.0 wt%로 0.5 wt%씩 조절하여 총 5개의 타겟을 제조하였다. 각각의 파우더를 각 함량에 맞게 Nalgene 병에 담고 용매인 IPA과 함께 지르코니아 볼을 넣어 48시간 동안 ball-milling을 실시해 파우더를 균일하게 교반 하였다. 그리고 dry oven을 이용해 80 °C에서 72시간동안 상압의 대기 분위기에서 건조를 진행하였다. 건조된 분말을 틀(mold)을 이용하여 성형하였으며 CIP (cold isostatic pressing) 방법으로 2차 압축을 진행하였다. 이후, 로(furnace)를 이용하여 1,100 °C에서 8시간 동안 소결하여 타겟을 제작하였다.

2.2 RF 마그네트론 스퍼터를 이용한 증착

박막을 증착하기 위해 사용된 기판은 유리 기판(microscope slides, 25*25 mm*1.1T)을 사용하였고 증착하기 전에 초음파 세척기를 이용해 암모니아와 증류수를 1:3 비율로 섞은 용액에 세척을 한 후 hot plate를 이용해 100 °C에서 건조시켰다. 박막 증착 이전에 스퍼터링 챔버의 진공을 2×10^{-6} Torr로 유지하였고 아르곤 가스 유량을 20 sccm, 압력을 5 mTorr, 기판온도를 270 °C로 설정하고 각 함량별 타겟을 40 W의 RF 전력을 인가하면서 600~650 nm 두께로 증착하였다. F의 함량에 따라 각 샘플의 이름은 AZO (0 wt%), FAZO1 (0.5 wt%), FAZO2 (1.0 wt%), FAZO3 (1.5 wt%), FAZO4 (2.0 wt%)로 하였다.

2.3 특성평가

증착된 FAZO 박막의 결정 구조 및 성장 방향을 분석하기 위해 X-선 회절기(X-ray diffractometer: X'pert PRO, Philips, Eindhoven, Netherlands)를 이용했고 박막의 표면 형상 및 두께를 분석하기 위해 field emission scanning electron microscope (S4700, Hitachi, Japan)과 atomic force microscopy (XE-100, Park systems, Korea)을 이용하였다. 박막의 전기적 특성 평가를 위해 hall measurement (HMS-3000, Ecopia, Korea)를 이

용하였다. 그리고 박막의 광학적 특성인 투과도 및 밴드갭 측정을 위해 UV-vis spectroscopy (Cary 100, Varian, Mulgrave, Australia)를 이용하였으며 박막의 조성을 분석하기 위해 energy dispersive spectroscopy (EDS)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 F의 함량에 따른 FAZO 박막의 결정학적 특성을 XRD를 통해 나타낸 결과다. 모든 박막에서 F 도핑농도와 관계없이 대략 34.4°에서 (002) 회절 방향의 주 피크와 대략 72.3°에서 상대적으로 약한 보조 피크 (004)가 나타났다. 이 결과는 모든 박막이 hexagonal wurzite ZnO 구조를 가지고 c-축 방향으로 우선 성장한 모습을 보여준다. F이 존재하는 FAZO (0.5~2.0 wt%) 박막의 (002) 피크는 F 도핑농도가 증가할수록 강도가 약해졌고 제일 적은 함량인 0.5 wt%를 도핑한 FAZO 박막은 AZO보다 더 큰 세기의 피크를 나타냈다. 이는 F을 소량 도핑했을 때 결정성이 증가하다가 더 많은 함량을 넣으면 과량의 F 이온(1.33 Å)들이 산소 이온(1.40 Å)과 치환되면서 이온반경 차이로 인해 결정 내에 공석(vacancy)의 생성으로 결정성이 저하되는 것을 의미한다.¹⁵⁾ 또한 브래그 법칙에 따라 플루오린 이온과 산소 이온이 치환될 때 면간 거리가 소폭 증가해 θ 값이 줄어들면서 왼쪽으로 치우쳐지는 것을 볼 수 있다(d = 면간 거리, θ = 입사각, λ = x-선 파장).

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

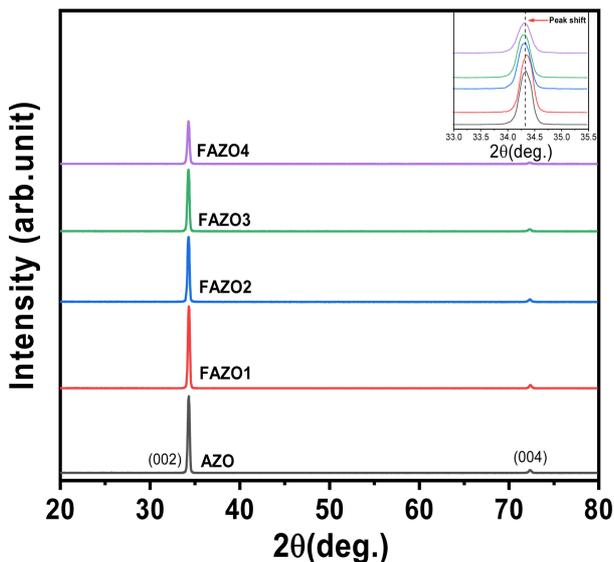


Fig. 1. X-Ray Diffraction Pattern of FAZO films deposited with different F concentration.

Fig. 2의 (a)~(j)는 FAZO 박막의 표면 및 단면의 형태학적 분석을 하기위해 SEM과 AFM을 이용하여 분석을 한 이미지이다. 모든 박막의 치밀성이 매우 크게 나타났지만, F 함량이 증가할수록 결정의 크기가 커지고 박막의 밀도(density)가 낮아지는 경향을 보였다. 이에 따른 결과로, Table 1에서 볼 수 있듯이 거칠기가 증가하였다. 이는 소량의 F을 도핑할 때 F이 결정 내에 존재하는 산소 공공결함을 줄여 주기 때문에 나타난 결과로 보인다. 하지만 더 많은 양의 F을 도핑할수록 산소 공공결함을 없애고 남은 F들이 다시 불순물이 되어 거칠기가 증가한 것으로 보인다.⁸⁾

(f)~(j)는 FAZO 박막의 F 도핑농도에 따른 단면사진이다. 박막의 두께는 FAZO2 박막이 600 nm의 상대적으로 얇은 두께를 나타냈고, FAZO4 박막이 상대적으로 두꺼운 650 nm로 형성되었다. 또한 모든 박막이 금(crack) 및 공공(void) 등의 결정결함이 없이 균일하고 밀집한 형상을 보였다. 이는 기존에 보고된 문헌의 FAZO 박막의 FESEM 이미지와 유사하다.³⁾ 또한, AZO 및 F의 함량에 따른 차이는 확인할 수 없었다.

F 함량에 따른 비저항, 캐리어 농도, 이동도 그리고 면저항을 hall measurement를 이용하여 측정한 결과를 Fig. 3에서 확인하였다. ZnO에 Al과 F을 동시에 도핑하면 Al^{3+} 이온은 Zn^{2+} 이온 자리와 치환되어 전자를 발생시키고, F이온은 O^{2-} 이온 자리와 치환되어 전자를 발생시킨다.¹⁶⁾ F을 소량 도핑(0.5 wt%)한 박막의 경우 $3.59 \times 10^{-4} \Omega cm$ 의 비저항, $8.33 \times 10^{20} /cm^3$ 의 캐리어 농도, $20.8 cm^2/vs$ 의 이동도, 그리고 $5.52 \Omega/sq$ 의 낮은 면저항 값을 보이며 가장 우수한 전기적 특성을 나타냈다. 또한 F의 도핑 농도가 증가할수록 전기적 특성 점진적으로 저하되는 것을 볼 수 있었다. 이는 F을 소량 도핑할 경우 산소와 치환되면서 전자를 발생시켜 전기적 특성을 향상시키지만 더 많은 F을 도핑할수록 결정성이 저하되면서 저항이 증가하기 때문이다.

따라서 ZnO에 알루미늄과 소량의 F을 도핑하면 추가적인 전자가 발생해서 전기적 특성이 향상되는데, 여기서 Moss-Burstein effect에 의해 전도대에 추가 캐리어가 생기면서 금지대(band gap)가 증가해 광학적 특성도 동시에 향상되는 결과를 얻을 수 있다.¹⁷⁾

Fig. 4는 UV-vis spectroscopy를 통해 측정한 FAZO 박막들의 투과율과, 투과율을 tauc plot equation을 통해 얻은 금지대 값이다. 모든 FAZO 박막의 흡수단은 약 337 nm에서 341 nm 사이의 파장영역에서 굳게 형성되었다.¹⁸⁾

FAZO 박막들은 가시광선 영역에서 평균적으로 89%의 투과율로 도핑농도에 따라 큰 차이는 나타나지 않았다. 하지만 적외선 영역에서 F을 도핑한 모든 샘플이

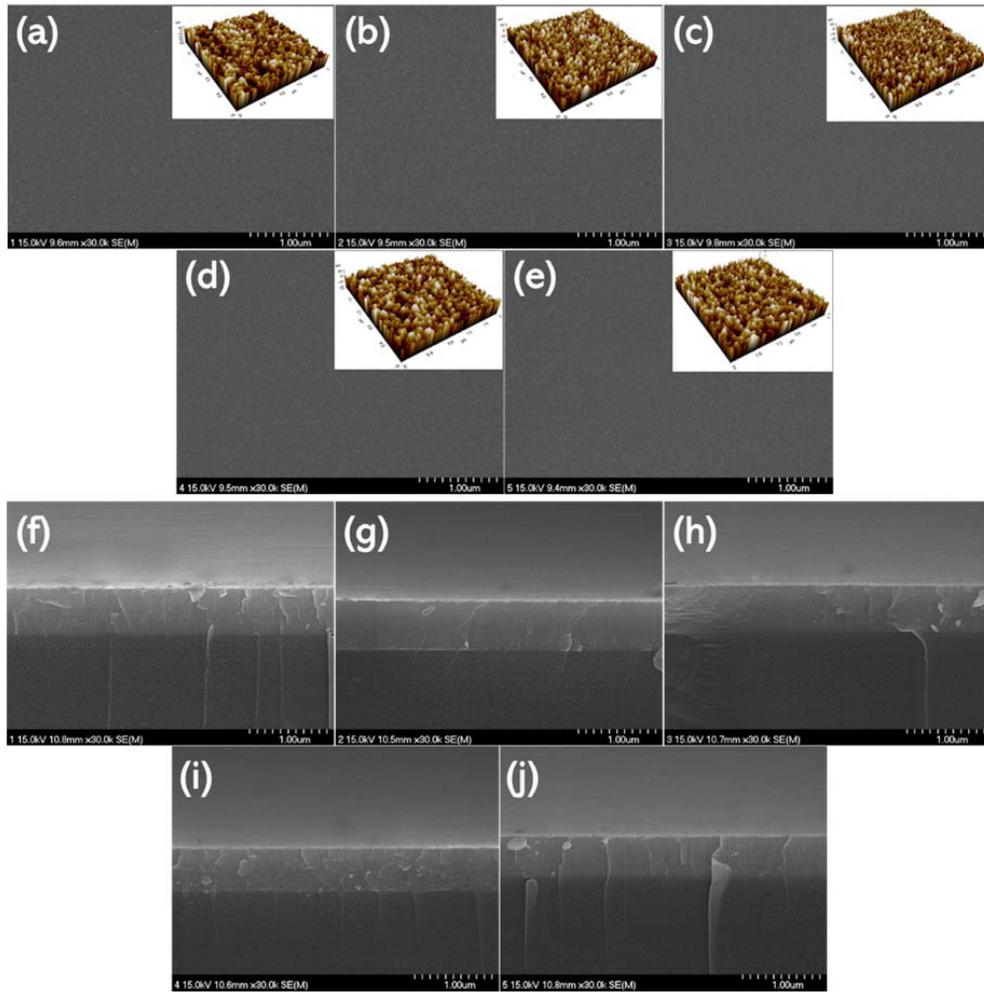


Fig. 2. Surface topographies and Cross-sectional image of FAZO films deposited with different F concentration. (a),(f) AZO, (b),(g) FAZO1, (c),(h) FAZO2, (d),(i) FAZO3, (e),(j) FAZO4.

Table 1. Surface roughness parameters of FAZO films with different F concentration (Ra : average roughness, RMA : root mean square).

Samples	Ra (nm)	RMS (nm)
AZO	4.380	5.684
FAZO1	3.055	3.852
FAZO2	2.798	3.569
FAZO3	3.149	4.026
FAZO4	3.160	4.033

AZO 대비 평균 투과율이 향상되었다. 특히 FAZO1이 82.5 %로 가장 높은 투과율을 보였다.

이는 hall measurement 결과에서도 언급했듯이, 산소 결함을 제거하면서 자유전자, 불순물, 포논 등으로 생기는 산란(scattering)이 줄어들어 박막의 결정 내 결함(defect)에서 일어나는 장파장 영역대의 흡수를 줄임으로써 나타난 결과이다.⁸⁾ 투과도 그래프에서 알 수 있었던

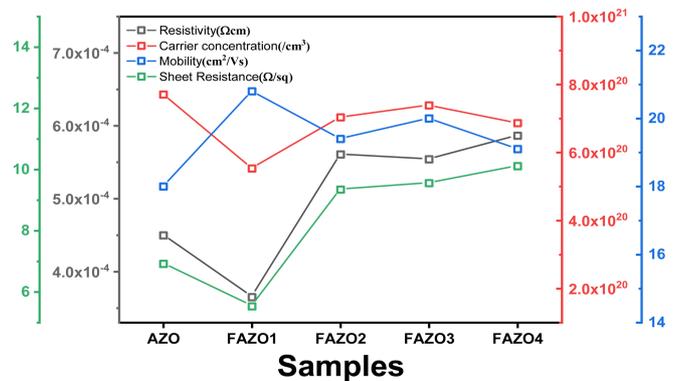


Fig. 3. Electrical characteristic of FAZO films with different F concentration.

흡수단으로 FAZO 박막들이 금지대가 약 3.6 eV가 나온다고 유추할 수 있었다. 흡수단을 통해서 유추해낸 금지대 에너지 결과값은 실제 tauc plot으로 계산한 금지대 에너지 값과 일치했다.

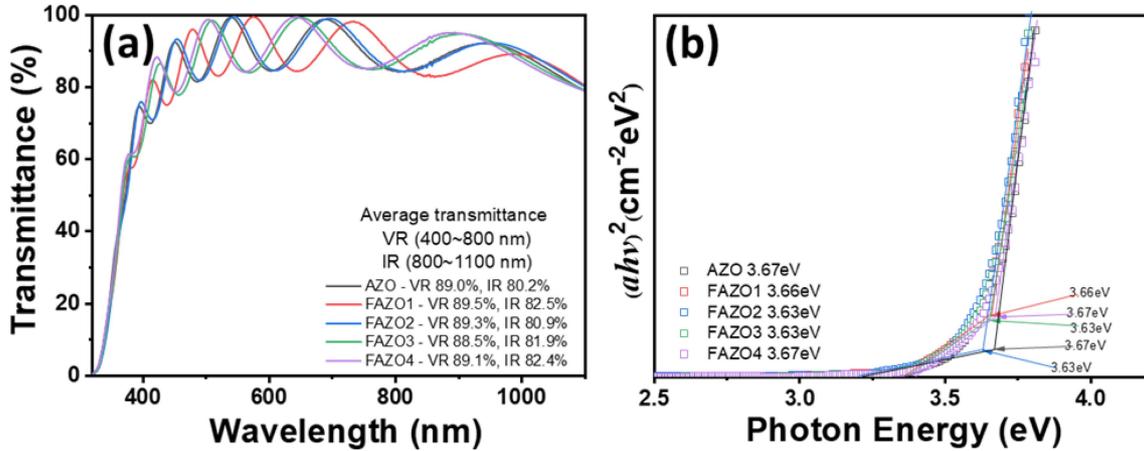


Fig. 4. (a) Transmittance, (b) Optical band gap of FAZO films with different F concentration.

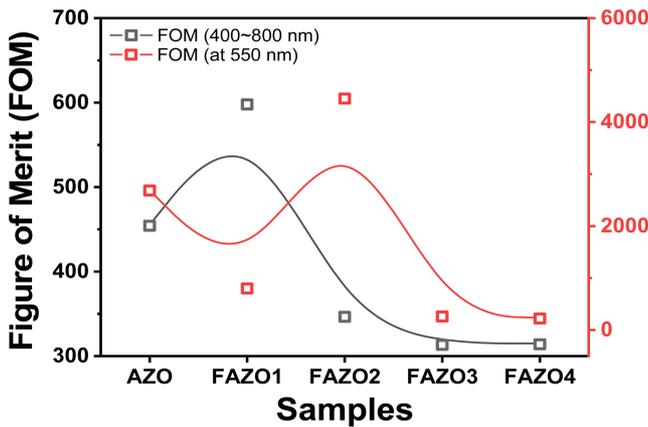


Fig. 5. FOM value of FAZO films with different F concentration.

Tauc plot을 통해 측정된 금지대 값은 전체적으로 비슷하게 3.65 eV의 값을 나타냈으며 이 값은 Moss-Burstein effect를 통해서 얻은 값과 일치한다. Moss-Burstein effect는 도핑으로 인해 캐리어 농도가 증가하면 그 에너지만큼 전도대의 페르미 레벨이 증가하게 되고 결과적으로 금지대 에너지가 증가한다는 것을 수학적으로 나타낸 방정식(equation)이다.¹⁹⁾

$$\Delta E_g = \left(\frac{h^2}{8m^*} \right) \frac{3n^3}{\pi}$$

위 방정식은 Moss-Burstein effect 방정식으로 h는 플랑크 상수이고, n은 캐리어 농도, m*은 전도대에서 전자의 유효질량을 나타내며 ΔE_g 계산값은 캐리어 농도와 비례한다. FAZO 박막들의 캐리어 농도는 비슷한 결과값이 나왔으며 그에 따라 금지대 에너지 역시 비례하는 결과값을 나타냈다.

제조된 투명전극의 전체적인 성능을 비교하기 위해 사

용하는 주된 방법 중 하나는 figure of merit (FOM)이다. 그 중 Haacke가 정의한 성능지수는 다음과 같다.²⁰⁾

$$\phi_{TC} = T_{av}^{10}/R_{sh}$$

여기서 T_{av}는 평균 투과도를 나타내고, R_{sh}는 면저항을 나타낸다. 투과도가 높고 면저항이 낮을수록 φ_{TC} 값이 커지며 값이 클수록 좋은 성능을 가진 투명전극이다. 모든 박막의 FOM 경향성을 Fig. 5에 나타내었다. 기존에 출판된 대부분의 논문에서는, 550 nm에서의 투과율과 면저항 값으로 계산을 하여 투명전극의 특성을 평가하였다. 하지만 550 nm에서의 투과율 값으로 FOM을 계산하게 될 경우, 박막의 두께 및 간섭에 의한 파장 때문에 정확한 성능평가를 하기 어렵다. 따라서 조금 더 신뢰성 있는 평가를 위해 400 ~ 800 nm의 가시광선 영역에서의 평균 투과율을 이용하여 계산하였다. 그래프에서 볼 수 있듯이 550 nm에서 계산한 값과 400 ~ 800 nm에서 계산한 값의 경향성이 달랐다. 550 nm에서의 투과율로 FOM을 계산할 경우, FAZO1이 FAZO2대비 낮은 수치를 보인다. 하지만 면저항 값과 투과율은 FAZO1이 FAZO2보다 높은 수치를 나타내기 때문에 정확하다고 볼 수 없다. 따라서 FAZO박막의 F 함량에 따른 전체적인 특성분석 결과를 보면 FAZO1이 가장 우수하다 것을 알 수 있었는데, 이는 400 ~ 800 nm 평균값으로 계산한 FOM 결과와 일치함을 볼 수 있다.

4. 결 론

RF 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 ZnO에 Al과 F을 동시 도핑한 FAZO 박막을 플루오린 함량별로 제작한 후 박막의 구조적, 전기적, 광학적 특성을 분석하였다. 제조

된 FAZO 박막은 F을 소량 도핑(0.5 wt%)했을 때 가장 전기적, 광학적 특성이 우수했다. $F_{0.5}AZO_{97.5}$ (FAZO1) 박막은 비저항 $3.59 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$, 캐리어 농도 $8.33 \times 10^{20} /\text{cm}^3$, 이동도 $20.8 \text{ cm}^2/\text{vs}$, 그리고 $5.52 \Omega/\text{sq}$ 의 낮은 면저항 값을 가지고 가시광선 영역에서 89.5 %, 적외선 영역에서 82.5 %의 높은 투과도와 함께 3.66 eV의 금지대 에너지 값을 나타내었다.

Acknowledgement

This work was supported by Priority Research Centers Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology(2018R1A6A1A03024334) and This work was supported by the Technology Development Program to Solve Climate Changes of the National Research Foundation (grant no. 2016M1A2A2936784) funded by the Ministry of Science and ICT.

References

1. R. A. Afre, N. Sharma, M. Sharon and M. Sharon, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **53**, 79 (2018).
2. L. Kerkache, A. Layadi and A. Mosser, *J. Alloys Compd.*, **485**, 46 (2009).
3. F.-H. Wang and C.-L. Chang, *Appl. Surf. Sci.*, **370**, 83 (2016).
4. T. Minami, *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, S35 (2005).
5. S. Lu, Y. Sun, K. Ren, K. Liu, Z. Wang and S. Qu, *Polymers*, **10**, 5 (2018).
6. F. Challali, D. Mendil, T. Touam, T. Chauveau, V. Bockelee, A. G. Sanchez, A. Chelouche and M.-P. Besland, *Mater. Sci. Semicond. Process*, **118**, 105217 (2020).
7. K. Ellmer, *Nat. Photonics*, **6**, 809 (2012).
8. I. Kim, K.-S. Lee, T. S. Lee, J.-H. Jeong, B.-K. Cheong, Y.-J. Baik and W. M. Kim, *J. Appl. Phys.*, **100**, 063701 (2006).
9. J. Ma, W. Zhang, J. Lin, Y. Sun, J. Ma, H. Xu, Y. Liu and G. Yang, *J. Alloys Compd.*, **819**, 153012 (2020).
10. K. D. A. Kumar, S. Valanarasu, A. Kathalingam, V. Ganesh, M. Shkir and S. Faify, *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.*, **123**, 801 (2017).
11. M. Purica, E. Budianu, E. Rusu, M. Danila and R. Gavrilă, *Thin Solid Films*, **403-404**, 485 (2002).
12. Y. R. Ryu and S. Zhu, *J. Appl. Phys.*, **88**, 201 (2000).
13. M. Krunko and E. Mellikov, *Thin Solid Films*, **270**, 33 (1995).
14. K. Ellmer, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33**, R17 (2000).
15. Q. Li, L. Zhu, Y. Li, X. Zhang, W. Niu, Y. Guo and Z. Ye, *J. Alloys Compd.*, **697**, 156 (2017).
16. X. Meng, H. Zhang, X. Zhang, G. Zheng, X. Xie, B. Han, F. Yang, H. Pei and Y. Wang, *Optik*, **219**, 165105 (2020).
17. J. G. Lu and S. Fujita, *J. Appl. Phys.*, **101**, 083705 (2007).
18. J. Tauc, R. Grigorovici and A. Vanacu, *Phys. Status Solidi*, **15**, 627 (1966).
19. T. T. A. Tuan, D.-H. Kuo, K. Lin and G.-Z. Li, *Thin Solid Films*, **589**, 182 (2015).
20. G. Haacke, *J. Appl. Phys.*, **47**, 4086 (1976).

<저자소개>

장수영

전남대학교 신소재공학부 석사과정

장준성

전남대학교 신소재공학부 박사과정

조은애

전남대학교 신소재공학부 박사과정

Vijay Chandrakant Karade

전남대학교 신소재공학부 박사과정

김지훈

광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 박사과정

문종하

전남대학교 신소재공학부 교수

김진혁

전남대학교 신소재공학부 교수