

Atomic Layer Deposition법에 의한 Al-doped ZnO Films의 전기적 및 광학적 특성

안하림* · 백성호** · 박일규***† · 안효진*†

*서울과학기술대학교 신소재공학과, **대구경북과학기술원 에너지시스템공학과, ***영남대학교 전자공학과

Electrical and Optical Properties of Al-doped ZnO Films Deposited by Atomic Layer Deposition

Ha-Rim An*, Seong-Ho Baek**, Il-Kyu Park***† and Hyo-Jin Ahn*†

*Department of Materials Science and Engineering,

Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

**Energy research Division, Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology (DGIST), Daegu 711-873, Korea

***Department of Electronic Engineering, Yeungnam University, Gyeongbuk 712-749, Korea

(2013년 7월 29일 접수 : 2013년 8월 15일 최종수정 : 2013년 8월 16일 채택)

Abstract Al-doped ZnO(AZO) thin films were synthesized using atomic layer deposition(ALD), which accurately controlled the uniform film thickness of the AZO thin films. To investigate the electrical and optical properties of the AZO thin films, AZO films using ALD was controlled to be three different thicknesses (50 nm, 100 nm, and 150 nm). The structural, chemical, electrical, and optical properties of the AZO thin films were analyzed by X-ray diffraction, X-ray photoelectron spectroscopy, field-emission scanning electron microscopy, atomic force microscopy, Hall measurement system, and UV-Vis spectrophotometry. As the thickness of the AZO thin films increased, the crystallinity of the AZO thin films gradually increased, and the surface morphology of the AZO thin films were transformed from a porous structure to a dense structure. The average surface roughnesses of the samples using atomic force microscopy were ~3.01 nm, ~2.89 nm, and ~2.44 nm, respectively. As the thickness of the AZO films increased, the surface roughness decreased gradually. These results affect the electrical and optical properties of AZO thin films. Therefore, the thickest AZO thin films with 150 nm exhibited excellent resistivity ($\sim 7.00 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$), high transmittance ($\sim 83.2\%$), and the best FOM ($5.71 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$). AZO thin films fabricated using ALD may be used as a promising candidate of TCO materials for optoelectronic applications.

Key words Al-doped ZnO, atomic layer deposition, thickness, electrical properties, optical properties.

1. 서 론

투명전도성 산화물(TCO, Transparent Conducting oxide)은 전도성과 투과도에 따라 다양한 optoelectronic devices에 널리 사용되고 있다. 그 중에서 디스플레이나 태양 전지에 응용되는 TCO는 우수한 전기적($\rho \leq 10^{-3} \Omega\text{-cm}$) 및 광학적(transmittance $\geq 80\%$) 특성이 요구된다.¹⁾ 이러

한 특성을 만족하는 대표적인 TCO 물질에는 ITO(Sn: In_2O_3), FTO(F: SnO_2), AZO(Al:ZnO) 등이 있다. 이들 중 ITO는 매우 높은 투과율($\geq 90\%$), 낮은 비저항($< 10^{-4} \Omega\text{-cm}$), 높은 일함수($> 4.8 \text{ eV}$), 뛰어난 에칭 성능 등의 장점으로 현재 가장 많이 사용되고 있는 TCO 물질이다. 그러나 In의 수요 상승 및 수급량 부족으로 인한 가격 상승과 고온에서 In과 Sn이 환원되는 열적 및 화학적 불

†Corresponding author

E-Mail : ikpark@ynu.ac.kr (I.-K. Park, Seoul Nat'l Univ. of Sci & Techn),

hjahn@seoultech.ac.kr (H. -J. Ahn, Seoul Nat'l Univ. of Sci & Techn)

© 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.

안정성 등의 단점을 갖고 있다.²⁾ 따라서 생산단가를 낮추고 열적 및 화학적 안정성이 높은 TCO 물질 개발의 필요성이 최근 대두되고 있다. 특히 ZnO는 3.27 eV의 band gap을 갖는 전형적인 n-type 반도체로서, 광전 소자로 사용하기 위한 투명전극 물질로 많은 장점을 가지고 있다. 좁은 전도대역을 갖는 ZnO 박막은 도핑물질(Al, Ga, In, B)에 따라 전기적 및 광학적 성질의 조절이 쉽고, 원료가격이 비교적 낮으며, 높은 전도성 및 광학적 투과도를 갖는다. 하지만, ZnO 자체는 저항이 매우 높기 때문에 전도성을 부여하기 위한 별도의 공정이 필요하다. 다양한 extrinsic ZnO 중에서 AZO는 적외선 및 가시광선 영역에서의 투과도나 결정성의 저하 없이 높은 전도성을 가지며, 플라즈마에 대한 내구성이 좋아 ITO 대체물질로서 많은 연구가 이루어지고 있다.^{3,4)} 최근까지 AZO박막을 제조할 수 대표적인 방법은 스퍼터(Sputter), 펄스 레이저 증착법(PLD, Pulse Layer Deposition), 졸겔법(Sol-gel), 원자층 증착법(ALD, Atomic Layer Deposition) 등이 사용되고 있다.^{4,5,6,7)} TCO를 제조하는 방법은 지금까지도 물리 기상 증착법(PVD, Physical Vapor Deposition) 또는 화학 기상 증착법(CVD, Chemical Vapor Deposition) 등이 많이 이용되고 있으나, 나노 수준의 얇은 TCO막을 제조 하기 위하여 최근 원자층 증착법에 이용되고 있다.^{8,9)} 더욱이, 원자층 증착법을 자기제어(self-limiting) 박막 증착 기술이라고도 한다. 자기제어 반응이란 반응물과 표면의 반응만 일어나고 반응물 사이에서는 반응이 일어나지 않으며, 표면에 원자층으로 증착되면 과잉의 반응 기체가 공급되어도 더 이상의 반응이 없다는 것을 의미한다. 따라서 cycle의 수를 조절하여 박막의 두께를 쉽게 제어할 수 있고, 다양한 기판 위에 뛰어난 균일도를 가지는 박막을 증착 할 수 있다는 장점 때문에 나노급 TCO막 제조의 중요한 증착 기술로 주목을 받고 있다.¹⁰⁾ 이러한 장점 때문에 AZO 박막의 제조 시 원자층 증착법이 널리 사용되고 있다. 예를 들어, Dasgupta 등은 증착 할 때 사용되는 기판에 따른 AZO 박막의 특성을 연구하였고, 사파이어 (0001) 웨이퍼 위에 증착된 AZO는 (002)를 우선방향으로 하여 c축으로 성장하였으며 여러 방향으로 성장하는 glass($\rho = 3.0 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$)의 경우보다 더 낮은 비저항($\rho = 7.7 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$) 값을 보였다.¹⁰⁾ Banerjee등은 Al의 양을 조절하여 최적 조건인 3 at%일 때 비저항 $\rho = 4.4 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$, 투과도 $T > 80\%$ 의 특성을 갖는 AZO 박막을 얻었다.¹¹⁾ Geng 등은 후처리로 400 °C에서 800 °C까지 급속열처리(RTA, Rapid Thermal Annealing)를 하였을 때 원자층 증착법으로 제조된 AZO 박막의 특성에 미치는 영향을 보고하였는데, AlOx 층의 환원에 의해 생성된 과도한 산소 원자가 열처리 동안 형성된 산소 빈자리를 채우기 때문

에 열처리 온도가 증가할수록 carrier concentration이 감소하여 저항이 증가하였다.¹²⁾ Baji 등은 박막의 특성에 영향을 주는 인자로서 증착 온도를 고려하였고, 증착 온도에 따라 박막은 40 nm에서 90 nm 범위의 두께를 가지면서, 결정의 성장 방향 및 크기가 변하였으며 210 °C에서 가장 우수한 전기적 특성을 얻었다.⁷⁾

따라서, 본 연구에서는 박막의 두께를 나노 수준으로 얇고 균일하게 조절하기 위해 자기제어 박막 증착기술인 원자층 증착법을 이용하여 AZO films을 제조하였고, 200 °C에서 증착 시간을 조절하여 50 nm, 100 nm, 150 nm의 두께를 갖는 AZO films을 얻었다. 이렇게 얻어진 AZO films의 두께에 따른 구조적, 화학적, 전기적 및 광학적 특성을 규명하였다.

2. 실험 방법

Al-doped ZnO thin films을 원자층 증착법을 이용하여 제조하였고 ZnO 증착용 전구체로 diethylzinc(DEZn)을 사용하였고 Al₂O₃ 증착용 전구체로 trimethylaluminum(TMAI)을 사용하였다. 각각 전구체는 분리되어 반응물질인 H₂O와 함께 growth chamber에 주입되었다. 고순도 N₂ purge gas는 증착시 생성되는 잔여물과 부산물을 제거하기 위해 사용되었다. 기판은 두께가 0.5T, 넓이가 2 cm × 2 cm인 Corning Eagle XG를 사용하였고, 기판 표면의 유기물을 제거하기 위해 아세톤과 D.I water로 초음파 세척을 하였다. DEZn/TMAI의 cycle ratio가 19:1 일 때 가장 우수한 AZO films의 특성을 얻었고, 이 조건 하에서 ZnO와 Al₂O₃의 증착 속도는 각각 1.5~1.6 Å/cycle, 0.9 Å/cycle이며, 증착시 기판온도는 200 °C로 고정되었다. 두께에 따른 AZO films의 특성을 알아보기 위해 증착 시간을 조절하여 50 nm, 100 nm, 150 nm의 두께를 갖는 AZO thin films을 얻었다. 본 논문에서는 앞으로 sample들은 sample A, sample B, sample C로 각각 언급될 것이다.

제조된 AZO films의 구조적, 화학적, 형태적 분석을 수행하기 위하여 본 연구에서는 X-선 회절분석(X-ray diffraction, XRD, Rigaku Rint 2500), X-선 광전자 주사법(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS, ESCALAB 250 equipped with an Al K α X-ray source), 주사 전자 현미경(field-emission scanning electron microscopy, FESEM, Hitachi S-4700)을 이용하였다. AZO films의 표면 거칠기 값은 원자력 현미경(Atomic force microscopy, AFM, Park Systems Corp., XE-100)으로 측정되었다. 전기적 특성과 가시광선 영역에서의 광학적 특성은 홀 효과 측정시스템(Hall effect measurement system, Ecopia, HMS-3000)과 자외선-가시선 흡광광도법(UV-Vis Spectro-

photometry, Scinco, S-3100)을 사용하여 각각 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 원자층 증착법으로 제조된 sample A, sample B 및 sample C의 XRD 회절 pattern을 나타낸 것이다.

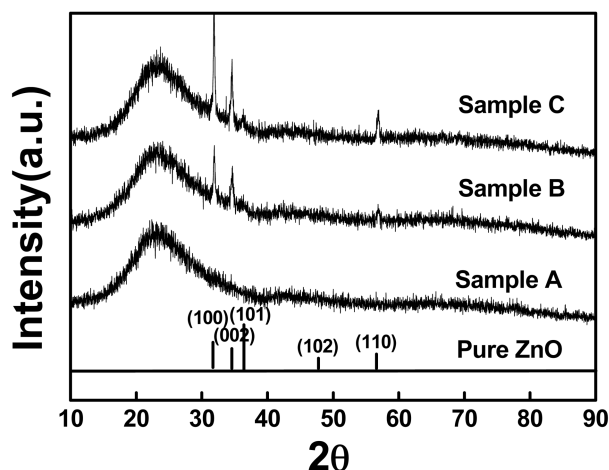


Fig. 1. XRD data of (a) sample A, (b) sample B, and (c) sample C fabricated using ALD.

각 sample들의 주된 회절 peaks는 31.89° , 34.57° , 36.24° , 56.82° 에서 관찰되었으며, 이는 ZnO의 hexagonal wurtzite 구조의 (100), (002), (101), (110) planes과 잘 일치한다 (space group $P6_3mc$ [186], JCPDS card No.80-0075). 일반적으로 DEZn을 전구체로 사용하여 원자층 증착법으로 증착된 순수한 ZnO의 경우 (100), (002), (101)의 peak를 가진다. 하지만, (101)의 peak는 glass 기판의 broad peaks으로 인하여 가려져 강도가 낮은 것으로 보인다. 한편, sample들의 회절 peaks이 약간 오른쪽으로 shift하였는데, 이는 Zn^{2+} 의 이온반경($0.74 \text{ \AA}$)이 Al^{3+} 의 이온반경($0.53 \text{ \AA}$)보다 크기 때문이다. 이러한 결과는 브래그 법칙($n\lambda = 2d \sin\theta$)으로 설명할 수 있다. 특히, 모든 sample의 23.4° 에서 발견되는 broad peaks는 amorphous SiO_2 로 본 연구에서 사용된 기판 peaks로 볼 수 있다.¹³⁾ 특히 sample A의 경우 amorphous SiO_2 peak를 제외한 어떠한 peaks도 관찰되지 않았는데, 이는 sample A의 두께가 너무 얇아 characteristic diffraction peak가 나타나지 않은 것으로 판단된다. AZO films의 두께가 증가할수록 각각의 방향성을 가진 peaks의 강도가 증가하는데 이로부터 증착 두께가 증가할수록 결정성이 향상된다는 것을 알 수 있다. 한편, main peak인 (100) plane에서 격자상수 a 값을 다음과 같은 식으로 계산해 볼 수 있는

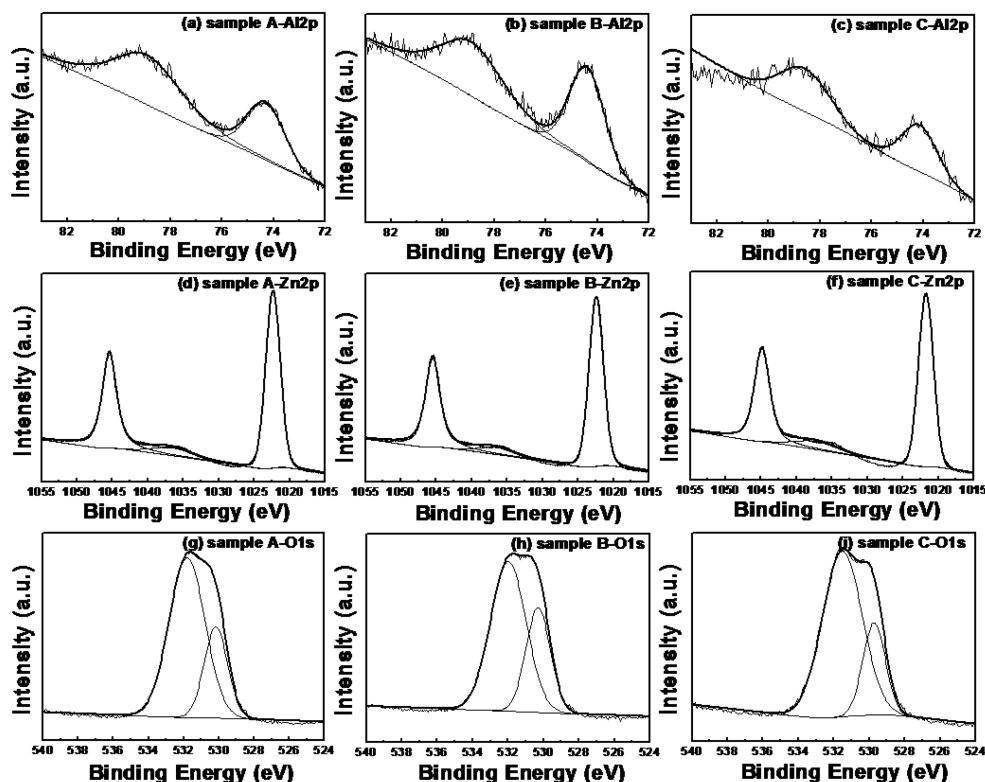


Fig. 2. XPS spectra of the Al 2p, Zn 2p, and O 1s core levels for sample A ((a), (d), and (g)), sample B ((b), (e), and (h)), and sample C ((c), (f), and (i)).

데, AZO films의 격자상수는 두께에 상관없이 $a = 3.78 \text{ \AA}$ ($2\theta = 31.89^\circ$)으로 doping되지 않은 ZnO의 격자상수 $a = 3.24 \text{ \AA}$ 보다 증가하였다.¹⁰⁾

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2}$$

여기에서 d 는 위에서 언급한 브래그 법칙으로 계산할 수 있는 면간거리이며 a 와 c 는 격자상수이다. 또한, 모든 sample에서 metallic Al와 관련된 peak은 관찰되지 않았다. 이 두 가지 사실을 통해 Al^{3+} 이온이 ZnO 격자 내에서 Zn^{2+} 이온을 치환했다는 것을 알 수 있다.¹⁴⁾ 따라서 이 XRD 결과는 Al-doped ZnO films이 성공적으로 제조됐다는 것을 의미한다.

AZO막을 구성하는 원소의 화학적 산화 상태를 알아보기 위해 XPS 분석을 수행하였다. Fig. 2은 AZO막의 Zn $2p$ 와 Al $2p$ core level의 XPS 스펙트럼을 보여준다. 모든 peak은 C $1s$ 의 284.5 eV 를 기준으로 보정되었다. Fig. 2(a)-(c)에서 볼 수 있듯이 Al $2p_{3/2}$ photoelectrons에 대한 peak position은 sample A는 $\sim 74.4 \text{ eV}$, sample B는 $\sim 74.5 \text{ eV}$, sample C는 $\sim 74.25 \text{ eV}$ 에서 관찰되었다. 즉, 73.65 eV 의 binding energy를 갖는 metallic Al이 관찰되지 않았다. 또한, Fig. 2(d)-(f)를 통해 Zn $2p_{3/2}$ photoelectrons은 sample A는 $\sim 1022.3 \text{ eV}$, sample B는 $\sim 1022.4 \text{ eV}$, sample C는 $\sim 1021.7 \text{ eV}$ 에서 관찰되었다. 즉, 1021.2 eV 의 binding energy를 갖는 metallic Zn는 관찰되지 않았다.¹⁵⁾ 게다가, Fig. 2(g)-(i)로부터 O $1s$ peak은 두 개의

peak으로 분리됨을 확인할 수 있다. 일반적으로 $532.6 \pm 0.2 \text{ eV}$ 보다 더 높은 binding energy를 갖는 경우, Zn(OH)_2 phase가 존재함을 의미한다. 이는 Zn이온이 대기 중의 수분을 흡수하면서 형성되는 것으로 보인다. 하지만 O $1s$ 의 peak은 sample A는 531.8 eV 및 530.2 eV 에서, sample B는 532 eV 및 530.3 eV 에서, sample C는 531.5 eV 및 530.3 eV 에서 관찰되었고, 보통 O^{2-} peak은 530.2 eV , O-C peak은 532 eV 에서 형성되므로 Zn이온과 Al 이온이 각각 O^{2-} 와 결합한 형태임을 알 수 있다.^{16,17)} 이러한 결과들로 인하여 Al과 Zn phases은 각각 Al (III) species와 Zn (II) species를 포함하며, 따라서 AZO films은 Al_2O_3 와 ZnO로 구성되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 3(a)-(c)와 Fig. 3(d)-(f)는 각각 원자층 증착법을 통해 제조된 AZO 박막 표면의 top-view FESEM 이미지와 cross-sectional FESEM 이미지를 나타낸다. Top-view FESEM 이미지에서 보여지듯이 sample A, sample B, sample C는 모두 작은 원형의 입자들로(약 6.2 nm) 구성되어있으며 모든 박막은 균일하게 성장 되었다. 게다가 cross-sectional FESEM 이미지의 경우 AZO films의 두께가 sample A의 경우 약 50 nm , sample B의 경우 약 100 nm , sample C의 경우 약 150 nm 로 성장됨을 확인하였다. 일반적으로 TCO의 경우 박막의 표면 상태에 따라 TCO의 전기적 특성이 달라지는데 FESEM 이미지 상에서는 두께에 따른 AZO막의 표면상태의 변화를 자세히 관찰하기가 어렵다. 따라서 우리는 AZO 막의 표면에 대한 조금 더 자세한 분석을 위해 AFM 을 수행하였다.

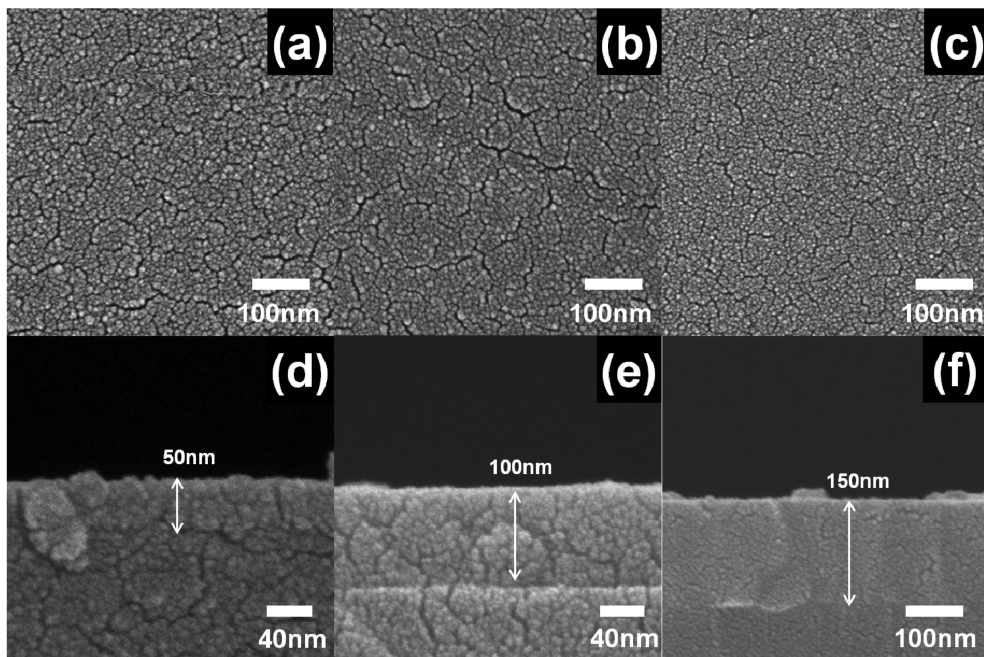


Fig. 3. Top-view FESEM images (a-c) and cross-sectional FESEM (d-f) obtained from samples A, B, and C.

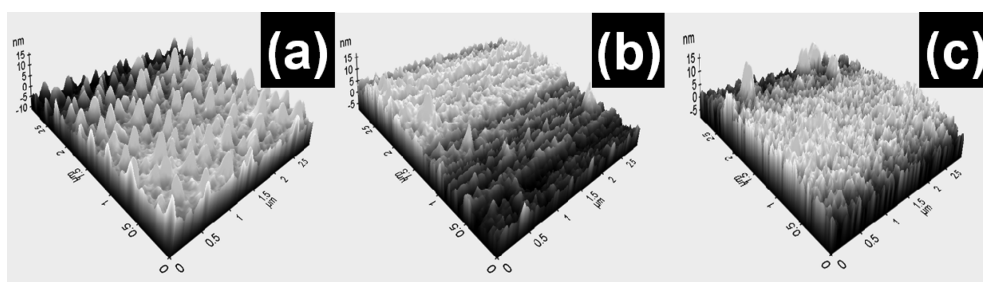


Fig. 4. AFM images (a-c) obtained from samples A, B, and C.

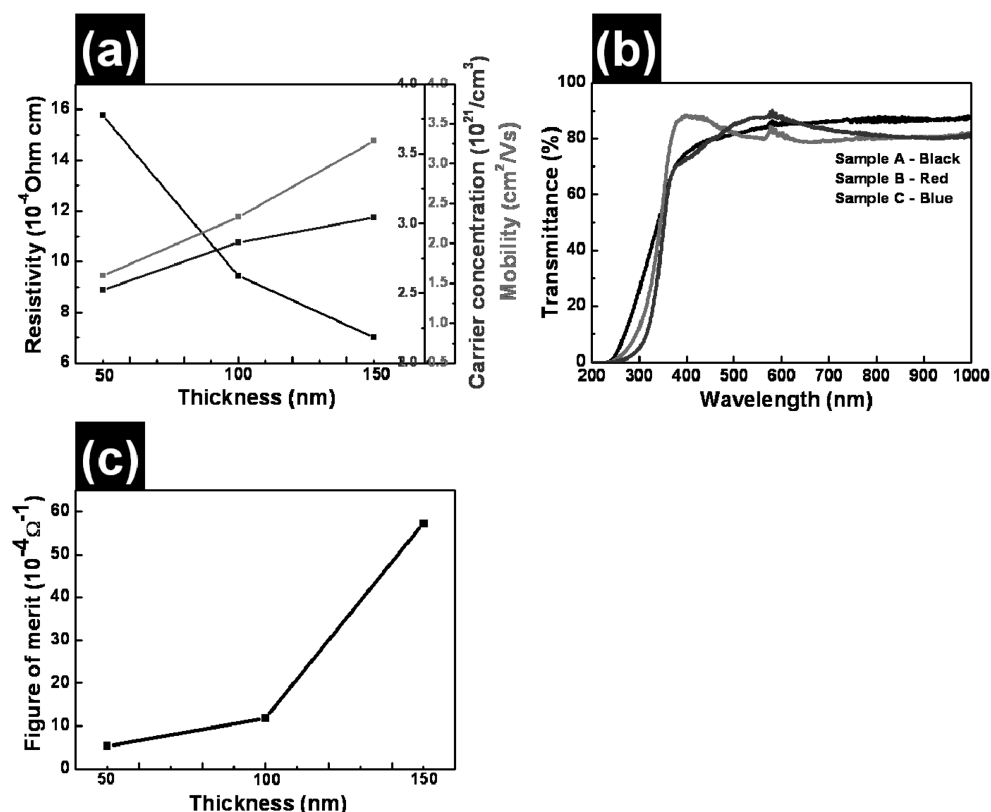


Fig. 5. Electrical properties (a), optical transmission spectra (b), and figure of merit (c) obtained from samples A, B, and C.

Fig. 4(a)-(c)는 원자층 증착법을 통해 제조된 AZO 박막 표면의 AFM 이미지를 나타낸다. 각 sample들의 표면 거칠기는 sample A의 경우 약 3.01 nm, sample B의 경우 약 2.89 nm, sample C의 경우 약 2.44 nm로 증착 두께가 증가할수록 표면 거칠기가 낮아진다. 증착 초기 단계에서는 film의 표면에 많은 핵생성 자리가 존재하고 작은 입자들이 생성된다. 즉, 빈틈이 많고 고르지 못한 표면 상태를 보이지만 증착 시간이 증가하면서 작은 입자들이 성장하거나 그 빈틈을 채워주어 film이 치밀해져 균일성이 증가하는 것으로 보인다.¹⁸⁾ 따라서 AFM의 결과 두께가 증가할수록 입자의 결정성이 증가되고, film의 표면 특성이 향상되며, 구조적 defect가 감소한다. 게다가 모든 샘플들은 표면 거칠기 값이 아주 큰 차이를

보이지 않기 때문에 원자층 증착법으로 성장된 AZO막의 quality는 매우 우수하며 이때 성장된 표면 거칠기가 10 nm 이하의 값을 갖기 때문에 디스플레이 소자에 응용이 가능할 것이라 사료된다.

Fig. 5(a)은 sample A, B, C의 carrier concentration, Hall mobility, resistivity를 포함한 전기적 특성을 나타낸다. 박막의 전기적 특성을 결정하는 인자는 crystallinity, morphology, roughness, porosity, stress, composition, 박막과 기판과의 계면 특성 등 있다.¹⁹⁾ 홀 효과 측정시스템으로 전기적 특성을 측정한 결과, carrier concentration과 Hall mobility는 증착 두께가 증가함에 따라 증가했다. 즉, carrier concentration은 sample A의 경우 $2.52 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, sample B의 경우 $2.86 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, sample

Table 1. Summary for electrical and optical properties of all samples.

Samples	Carrier concentration (cm ⁻³)	Hall mobility (cm ² /Vs)	Resistivity (Ω·cm)	Sheet resistance (Ω/square)	Transmittance (%)
Sample A	2.52×10^{21}	1.59	1.57×10^{-3}	315.8	83.7
Sample B	2.84×10^{21}	2.33	9.43×10^{-4}	94.32	81.4
Sample C	3.04×10^{21}	3.28	7.00×10^{-4}	46.69	83.3

C의 경우 $3.04 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 로, 증가된 막의 두께에 따라 미세하게 향상되었다. Hall mobility 역시 sample A의 경우 $1.59 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, sample B의 경우 $2.33 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, sample C의 경우 $3.28 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 로 증가하였다. 막의 두께에 따라 향상된 이유는 두께가 얇은 경우 표면이 고르지 않아 더 많은 defect가 scattering centre로 작용하며, 결과적으로 carrier가 trapping 될 수 있는 자리를 형성하여 이동할 수 있는 carrier의 수가 적어진다. 이러한 trapping 현상은 결국 potential energy 장벽을 만들어 carrier가 다른 결정으로 이동하는 것을 방해하기 때문에 carrier의 이동도를 낮춘다. 하지만, 두께가 증가하면서 결정성이 향상되고 표면 거칠기가 감소하면서 입자들간의 boundary scattering이 약화되어 이동도가 증가한다.^{18,20)} 또한, Hall mobility의 절대치가 낮는데, 이는 입자의 크기가 약 6.2 nm로 매우 작고, carrier concentration가 10^{21} cm^{-3} 수준으로 매우 높기 때문으로 판단된다.²¹⁾ resistivity는 아래 식으로 설명할 수 있는데, 여기에서 N은 carrier concentration, μ 는 Hall mobility, e는 전자의 전하량($e = 1.602 \times 10^{-19}$)을 나타낸다.²²⁾

$$\rho = 1/(Ne\mu)$$

다시 말해, resistivity는 carrier concentration과 Hall mobility의 곱으로 나타낼 수 있으며, 이 둘의 곱의 역수에 비례한다. 또한 이 두 가지는 위에서 언급한 전기적 특성을 결정하는 인자를 모두 포함하는 결과값으로 볼 수 있다. 따라서, 위의 식을 이용하면 sample들의 resistivity는 sample A의 경우 $1.57 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, sample B의 경우 $9.43 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, sample C의 경우 $7.00 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 이며, 이를 이용한 면저항(sheet resistance)은 sample A의 경우 약 $315.8 \Omega/\text{square}$, sample B의 경우 약 $94.32 \Omega/\text{square}$, sample C의 경우 약 $46.69 \Omega/\text{square}$ 로 계산된다. 따라서, sample C가 다른 sample들에 비해 우수한 전기적 특성을 보임을 알 수 있다. sample C의 전기적 특성 향상은 막두께 증가에 따른 표면의 치밀화 및 결정성 향상과 이에 따른 carrier concentration과 Hall mobility의 증가에 기인한 것으로 보인다. Fig. 5(b)은 AZO 막의 광학적 투과도를 나타낸 것이다. 가시광선 영역에서의 sample들의 평균 투과율은 sample A의 경우

83.7 %, sample B의 경우 81.4 %, sample C의 경우 83.2 %로 관찰되었다. 일반적으로 TCO막의 투과도는 막의 두께가 높을수록 표면의 scattering, 반사 및 광학적 흡수가 증가하기 때문에 투과도가 감소하는 경향을 보인다.²³⁾ 하지만 본 연구에서 AZO 막은 두께에 따라 큰 표면 거칠기의 차이를 보이지 않았으며, 가장 낮은 두께인 sample A가 가장 좋은 투과율을 보였다. 하지만, 모든 AZO 막은 두께와 관계없이 가시광선 영역(400-800 nm)에서 75 % 이상의 높은 투과율을 보였다. sample B와 C의 경우 각각 400 nm와 600 nm 파장 근처에서 부분적으로 높은 투과도를 보이는데, 이는 특정 두께에서 발생하는 anti-reflective 효과에 의한 것으로 추정된다. substrate 굴절률(glass의 경우 1.5~1.6)이 박막(AZO의 경우 가시광영역에서 1.9~2.1)보다 작은 경우, 박막이 특정 두께($d = \lambda/2n$)로 형성되어 있을 때, Fresnel reflection을 억제하여 anti-reflection 효과가 나타난다고 알려져 있다. AZO의 굴절률을 2.0이라고 가정하고 각 파장을 계산하면, 두께가 50 nm, 100 nm, 150 nm인 AZO박막에서 반사도가 낮은 파장은 200 nm, 400 nm, 600 nm이다. 따라서 계산된 결과와 측정된 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 원자층 증착법으로 성장한 AZO막의 전기적 및 광학적 특성을 Table 1에 간략하게 요약하였다.

Fig. 5(c)는 AZO 막의 성능을 비교할 수 있는 기준인 FOM(Figure of Merit)을 나타내며, 이는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\text{FOM} = T^{10} / R_s$$

여기에서 T는 광학적 투과도, R_s 는 AZO막의 면저항을 나타낸다. sample A의 경우 FOM은 $5.31 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$, sample B의 경우 $1.17 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$, sample C의 경우 $5.71 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 로 계산되었다. 이중 sample C가 가장 우수한 FOM특성을 가짐을 알 수 있다. 일반적으로, 스퍼터링, 분무열분해 법 등 타 장비를 이용하여 성장된 AZO 박막의 FOM 값은 $\sim 2.5 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 와 $3.12 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 사이의 범위의 값을 보인다.^{24,25)} 따라서 이 원자층 증착법으로 성장한 AZO막의 경우 우수한 전기적 및 광학적 특성을 나타내며 optoelectronic devices로의 응용에 잠재적으

로 사용될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원자층 증착법을 이용하여 3가지 두께를 갖는 AZO 막을 제조하였다. AZO 막의 구조, 화학적 상태, 표면 형태, 전기적 및 광학적 특성은 XRD, XPS, SEM, AFM, Hall measurement system, UV-Vis Spectrophotometry를 통해 분석되었다. 증착 초기에 film의 표면은 빈틈이 많고 고르지 못하여 많은 구조적 defect가 존재한다. 하지만, 증착 시간이 증가하면서 입자들이 그 빈틈을 채워주어 film이 치밀해져 균일성이 증가한다. AZO막의 두께 증가에 따른 표면 특성 향상 즉, 막의 균일성이 증가하여 boundary scattering이 약화되며, 이것은 carrier concentration과 Hall mobility를 증가시켜 AZO 막의 전기적 특성을 향상시킨다. 따라서 본 연구에서는 두께가(약 150 nm) 가장 높은 sample C에서 가장 낮은 저항을 보였다. 또한 ALD로 성장한 AZO 막의 경우 균일한 막의 성장으로 인하여 우수한 투과율을 보였다. 따라서, sample C의 경우 우수한 저항 특성($\rho = 7.00 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$), 높은 투과율($T = 83.2\%$, at 550 nm), 우수한 FMO ($5.71 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$)을 나타냈다. 이러한 결과, 원자층 증착법을 이용하여 제조된 AZO 막은 두께에 따라 전기적 및 광학적 특성을 조절하여 디스플레이 및 태양전지 등의 분야에 유용하게 사용될 것으로 전망된다.

감사의 글

This study was financially supported by Seoul National University of Science & Technology.

References

1. T. Minami, *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, S35 (2005).
2. M. S. Kim, *J. KIEEME*, **26**, 194 (2013).
3. S. Yun, J. Lee, J. Yang and S. Lim, *Phys. B*, **405**, 413 (2010).
4. R. Jaramillo and S. Ramanathan, *Sol. Energy Mater. Sol. Cell.*, **95**, 602 (2011).
5. H. Agura, A. Suzuki, T. Matsushita, T. Aoki and M. Okuda, *Thin Solid Films*, **445**, 263 (2003).
6. S. Y. Kuo, W. C. Chen, F. I. Lai, C. P. Cheng, H. C. Kuo, S. C. Wang and W. F. Hsieh, *J. Cryst. Growth*, **287**, 78 (2006).
7. Z. Baji, Z. Labadi, Z. E. Horvath and I. Barsony, *Thin Solid Films*, **520**, 4703 (2012).
8. G. Jimenez, E. Comini, M. Ferroni, A. Vomiero and G. Sberveglieri, *Mater. Chem. Phys.*, **124**, 694 (2010).
9. M. E. Fragala, G. Malandrino, M. M. Giangregorio, M. Losurdo, G. Bruno, S. Lettieri, L. S. Amato and P. Maddalena, *Chem. Vap. Deposition*, **15**, 327 (2009).
10. N. P. Dasgupta, S. Neubert, W. Y. Lee, O. Trejo, J. R. Lee and F. B. Prinz, *Chem. Mater.*, **22**, 4769 (2010).
11. P. Banerjee, W. J. Lee, K. R. Bae, S. B. Lee and G. W. Rubloff, *J. Appl. Phys.*, **108**, 043504 (2010).
12. Y. Geng, Z. Y. Xie, S. S. Xu, Q. Q. Sun, S. J. Ding, H. L. Lu and D. W. Zhang, *J. Solid. State. Electrochem.*, **1**, N45 (2012).
13. Z. Li, T. J. Shi and L. Y. Guo, *J. Serb. Chem. Soc.*, **75**, 385 (2010).
14. S. H. Kim, K. B. Shim, J. P. Ahn and C. S. Kim, *J. Kor. Ceram. Soc.*, **45**, 167 (2008).
15. J. W. Kim and H. B. Kim, *J. Kor. Phys. Soc.*, **59**, 2349 (2011).
16. B. Yang, P. Feng, A. Kumar, R. S. Katiyar and M. Achermann, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 195402 (2009).
17. Y. Fu, H. Du, S. Zhang and W. Huang, *Mater. Sci. Eng. A*, **403**, 25 (2005).
18. X. Yu, J. Ma, F. Ji, Y. Wang, C. Cheng and H. Ma, *Appl. Surf. Sci.*, **245**, 310 (2005).
19. E. Elangovan, M. P. Singh and K. Ramamurthi, *Mater. Sci. Eng. B*, **113**, 143 (2004).
20. A. Jain, P. Sagar and R. M. Mehra, *Mater Sci-Poland*, **25**, 1 (2007).
21. D. J. Lee, H. M. Kim, J. Y. Kwon, H. J. Choi, S. H. Kim, and K. B. Kim, *Adv. Func. Mater.*, **21**, 448 (2011).
22. J. W. Kim, D. K. Kim and H. B. Kim, *J. KIEEME*, **24**, 177 (2011).
23. W. J. Jeong and G. C. Park, *Sol. Energy Mater. Sol. Cell.*, **65**, 37 (2001).
24. S. S. Lin, and J. L. Huang, *Ceram. Int.*, **30**, 497 (2004).
25. M. N. Islam, B. K. Samantaray, K. L. Chopra, and H. N. Acharya, *Sol. Energy Mater. Sol. Cell*, **29**, 27 (1993).