Effect of RF Power on SnO Thin Films Obtained by Sputtering

Joseph Um, Byeong-Min Roh*, Sungdong Kim**, and Sarah Eunkyung Kim[†]

Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

*Department of Industrial and Information Systems Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

**Department of Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received July 12, 2012; Revised September 15, 2012; Accepted September 28, 2012)

스퍼터링에 의해 제조된 SnO 박막의 RF 파워에 따른 특성 연구

엄요셉 · 노병민* · 김성동** · 김사라은경[†]

서울과학기술대학교 NID융합기술대학원

*서울과학기술대학교 글로벌융합산업공학과

**서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

(2012년 7월 12일 접수 ; 2012년 9월 15일 수정 ; 2012년 9월 28일 채택)

ABSTRACT

SnO thin films were fabricated by rf reactive sputtering on borosilicate substrates with an Sn target and Ar/O₂ gas mixture. The effect of rf power on the structural, electrical, and optical properties of SnO thin films was investigated with XRD, AFM, SEM, Hall effect measurements, and UV-Vis spectrometer. As a plasma power increased the crystallinity with a preferred orientation of SnO thin films was improved and the grain size slightly increased. However the grains were coalesced and excessively irregular in shape. The electrical conductivity of SnO thin films demonstrated a relatively low p-type conductivity of 0.024 (Wcm)⁻¹ at a higher power condition. Lastly, SnO thin films had poor optical transmittance in the visible range as a plasma power increased.

Key words : Thin films, Density, Conductivity, Tin compounds

1. 서 론

산화주석(tin oxide)의 경우 화학적으로 안정하고 3.6 eV의 넓은 밴드 갭 에너지를 가지고 있는 SnO₂가 일반적이며, SnO₂는 *n*형 반도체 특성을 띠고 있고 디스플레이용 투명전극, 태양전지, 가스센서 등에서 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻⁶⁾ 반면 SnO는 2.7~3.4 eV의 밴드 갭 에너지를 가지며 *p*형 반도체 특성을 띠고 있지만 화학적으로 준안정(metastable)한 상태로 알려져 있어 연구가 부진했으나, 최근 TFT(thin film transistor)와 같은 투명 소자 응용으로 많은 관심을 받고 있다.⁷⁾ *p*형 산화물반도체의 경우 도핑된 Cu oxide 나 Zn oxide 연구가 진행되어 왔으며,⁸⁻¹⁰⁾ Sn oxide의 경우에는 *n*형 SnO₂에 Sb, In, Mn, Al, Zn 등을 도핑하는 연구는 있었으나,¹¹⁻¹⁵⁾ *p*형 SnO 연구는 매우 부진한 상태이다.¹⁶⁻¹⁹⁾ *p*형 SnO는 도핑을 하여야 *p*형 특성을 가지는 SnO₂와 달리 도핑없이 박막 자체

가 *p*형을 가지고 있기 때문에 공정이 용이하고, *n*형 SnO₂ 박막과 함께 단종접합 pn 다이오드(homojunction pn diode)를 만들 수 있는 장점이 있다. 또한, SnO 박막은 최고가전자대(VBM: valence band maxima)에 존재하는 Sn 5s orbital 구조 때문에 도핑한 SnO₂, ZnO, NiO 등의 박막보다 전기전도도가 높은 *p*형 반도체를 만들 수 있다고 알려져 있다.^{17,19)}

산화주석박막을 증착방법 중 스퍼터링(sputtering)방법은 비교적 높은 증착속도, 대량생산 호환성, 두께 균일도, 확장성(scalability) 등의 장점으로 인하여 널리 이용되고 있다.²⁰⁾ 일반적으로 스퍼터링 방법은 화학증기증착법(chemical vapor deposition)으로 증착된 박막에 비하여 박막의 균질성, 재현성 및 표면의 구조(morphology) 등에서 우수한 것으로 평가되고, 화학조성(chemical composition)과 박막 성질의 조절이 쉬운 금속 타겟과 화학량(stoichiometry) 조절이 용이한 산화물 타겟을 모두 사용할 수 있어 특성이 다른 박막 공정으로 보고되어 있다.^{20,21)} 더욱이 스퍼터링 방법은 가스분압, 압력, 파워, 온도, 등 공정 변수들을 변화하여 박막의 특성을 쉽게 조절할 수 있다. Lu에 의하면

[†]Corresponding author : Sarah Eunkyung Kim
E-mail : eunkyung@seoultech.ac.kr
Tel : +82-2-970-6599 Fax : +82-2-944-6026

반응성 스퍼터링을 이용해 증착한 ZnO의 경우 플라즈마 파워가 증가할수록 플라즈마내 Ar 이온 생성이 증가하여 ZnO 증착속도는 높아졌고, 증가된 이온에 의해 Zn 원자가 많아지고, 기판(substrate)에 더 많은 핵(nuclei)이 생성되어 표면의 구조는 조밀해졌고 결정립(grain) 사이지는 줄었다고 하였다. 또한 플라즈마 파워가 증가할수록 우선 성장 방향(preferred orientation)을 강하게 가지는 결정구조(crystalline)가 형성된다고 하였다.²²⁾ 반면 Hamzaoui에 의하면 SnO₂ 산화물 타겟을 이용한 스퍼터링으로 증착된 SnO₂의 경우 플라즈마 파워가 높아질수록 결정립 사이즈가 증가함을 보고하였다.²³⁾ 또한 RF 파워가 증가할수록 높은 에너지를 가진 원자들에 의한 결함(defect)이 많이 발생하여 박막의 투과도가 떨어짐을 설명하였다. 스퍼터링 조건에 따른 박막의 물성 변화가 매우 큼을 알 수 있다.

본 연구에서는 반응성 스퍼터링 방법을 이용하여 p형 SnO 박막을 증착하였으며, 가스 유량, 온도, 압력을 고정한 조건에서 플라즈마 파워를 변화시켜 파워에 대한 SnO 박막의 구조적, 전기적, 광학적 특성 변화를 연구하였다.

2. 실험 방법

시편(20 × 20 mm²)은 불규산(borosilicate) 유리 와 실리콘 웨이퍼의 두 가지 기판을 사용하였고, Sn 타겟(99.99%)과 Ar과 O₂ 가스를 혼합하여 반응성 스퍼터링으로 제작하였다. 공정 압력, 가스 유량, 그리고 온도는 고정하고, 플라즈마 파워를 200~500 W로 변화시켜 실험을 진행하였다. 증착 속도(deposition rate)는 플라즈마 파워가 증가할수록 4.4 Å/sec 에서 13.9 Å/sec로 증가하였다. Table 1에 각 시편의 공정 변수들을 설명하였다. 공정 조건별 시편의 밀도 변화량의 동향을 측정하기 위해서 질량과 부피를 다음과 같이 측정하였다. 질량은 박막 증착 전후로 전자저울(소수점 4자리)로 측정하여 계산하였고, 부피는 삼차원 측정기(3D profiler: Dektak 150, Veeco)로 측정한 박막의 두께와 사각형 새도 마스크(shadow mask)를 사용해 증착한 박막의 면적을 이용하여 계산하였다. 제작된 시편들의 구조적 분석을 위해서 X선 회절계(XRD: ATX-G Rigaku)와 atomic force microscopy(AFM: Dimension 3100, Veeco)를 이용하여 박막의 결정구조, 우선 성장 방향, 표면거칠기를 확인하였고, 미세구조는 전계방출주사현미경(FE-SEM: JSM-7600F, JEOL)으로 관찰하였다. 광학적 분석을 위해

선 UV-Vis 분광계(Lamda 35, PerkinElmer)를 이용하여 각 시편의 투과도를 측정하였다. 박막 특성 분석을 위해서는 약 2000 Å 두께의 박막을 유리기판에 증착하였고, 밀도 계산을 위해서는 1 μm 두께의 박막을 실리콘 기판에 증착하였다. 마지막으로 전기적 분석으로 홀 효과 측정 시스템(HEMS: HMS-3000 Ecopia, 5500G magnetic field)을 이용하여 각 시편의 전기전도도(electrical conductivity), 캐리어 농도(carrier concentration), 그리고 이동도(mobility)를 측정하였다. 홀 측정을 위해선 주석(Sn)을 전극으로 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1의 XRD 분석 결과에서 확인할 수 있듯이 플라즈마 파워가 증가할수록 SnO 박막의 우선 성장 방향(preferred orientation)이 강해졌고, 우선 성장 방향에 대한 결정면간 거리(d-spacing)은 감소하였으며, 결정립 크기는 증가하였다. XRD 데이터에 의거하여 결정면간 거리는 Bragg's law에 의해 계산되었으며 결정립 크기는 해당 픽(peak)의 반가폭(FWHM, Full Width at Half Maximum)을 이용한 Scherrer의 방법을 이용하여 계산하였다.²⁴⁾ 200 W의 경우 (101) 픽이 넓고 강도(intensity)가 낮은 구조를 보여서 XRD 데이터에 의한 결정립 크기는 계산하지 않았으나, Fig. 2 SEM 미세구조 사진에 의해서 200 W인 경우 결정립이 가장 작은 것으로 나타났으며, 결정립

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of SnO thin films.

Table 1. Deposition Condition of Tin Oxide Thin Films

Sample #	O ₂ flow (sccm)	Ar flow (sccm)	Pressure (Pa)	Sub. Temp. (°C)	Power (W)	Deposition Rate (Å/sec)	Density estimated (g/mm ³)
1	9	61	0.67	300	200	4.394	1.4801
2	9	61	0.67	300	300	7.03	1.8512
3	9	61	0.67	300	500	13.945	3.7312

Fig. 2. SEM images of SnO thin films, (a) 200 W, (b) 300 W, and (c) 500 W.

Fig. 3. AFM images of SnO thin films, (a) 200 W, (b) 300 W, and (c) 500 W.

의 크기가 플라즈마 파워가 증가할수록 다소 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 플라즈마 파워가 증가할수록 결정 구조가 뚜렷하게 나타났으며, 300 W에서는 (101) 픽이 우선 성장 방향이었으나, 500 W에서는 (101) 픽이 감소하고 상대적으로 (110) 픽이 증가하는 것을 볼 수 있다. 플라즈마 파워가 증가할수록 우선 성장 방향을 강하게 가지는 결정구조가 형성된다고 보고된 바 있고,²²⁾ 이는 플라즈마 파워가 증가할수록 산소와 아르곤이 Sn 타겟과 충돌(bombardment)이 커져서 Sn 타겟 표면에 스퍼터된 Sn 분자(molecule)이 많아지고, 기판 표면에 도착하는 Sn의 kinetic energy도 증가하기 때문이다.²⁵⁾ 그래서 플라즈마 파워가 증가할수록 표면은 거칠어지고 삼차원적으로 자라는 경향을 보이며, 결정성도 좋아진다. 또한, 플라즈마 파워가 증가함에 따라 결정방향이 바뀌었으며 결정면간 거리의 감소는 박막의 미세구조 변화의 한 요인으로 볼 수 있다. Fig. 3은 표면 거칠기를 AFM으로 관찰한 사진이다. 박막의 표면거칠기(roughness, R_a)는 다소 증가하는 경향을 보였고 매우 불규칙한 미세구조를 볼 수 있다. 이는 플라즈마 파워가 증가할수록 핵 성장이 활발하게 이루어지고, 산화주석박막 내 원자들의 확산 또한 활발해짐에 따라서 결정성이 향상된 것으로 사료된다. 하지만 AFM 분석 결과를 보면 표면의 수직 상승과 같은 아주 불규칙한 형태를 보이고 있고, 특히 특정방향의 결정립에 응집(coalesce)된 것과 같은 형태를 나타내기 때문에, 이는 시편 내에 전체적인 표면 높낮이에 차이가 생긴 것으로 사료된다. 결정들의 불규칙하고 응집되어있는 형태로 인해 AFM 결과로 결정립 크기는 계산 하지 않았으며, 앞에서

설명한 것과 같이 결정립 변화에 대해서는 평균값을 주는 XRD 결과로 분석하고 SEM 사진과 비교하였다.

Table 1에 나타난 것과 같이 플라즈마 파워가 증가할수록 SnO 박막의 밀도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 플라즈마 파워가 증가할수록 조밀면과 응집된 결정립을 가진 박막형성에 의한 것으로 사료된다. 본 실험에서는 박막의 밀도를 정량적 방법으로 측정한 것이 아니라 후막의 밀도 측정 계산방법으로 진행하였으며, 플라즈마 파워에 의한 밀도의 증감 동향만을 확인하는데 이용하였다. 일반적으로 밀도가 증가할 때 전자흡수(electronic absorption) 특성변화 때문에 분극성(polarizability)이 감소하고,²⁸⁾ 이는 박막의 굴절률(refractive index), 전기전도도(electrical conductivity), 광학적 성질에 영향을 미친다. Lorentz-Lorenz 공식이나 Drude 공식과 같은 굴절률과 밀도의 관계식을 나타내는 공식에서 보듯이 밀도가 증가하면 일반적으로 굴절률이 비선형으로 비례 증가한다.^{28,29)} 그리고 굴절률이 증가할수록 광흡수단(optical absorption edge)은 파장(wavelength)이 긴 방향으로, 즉 광학적 밴드 갭(optical band gap)이 낮은 방향으로 이동한다.³⁰⁾ 본 실험에서 제조된 SnO 박막의 경우 Fig. 4에 나타난 것과 같이 플라즈마 파워가 증가할수록 광흡수단이 긴 파장 방향으로 이동하였으며, 이는 박막 내에 존재하는 Sn 빈자리(vacancy)가 플라즈마 파워가 증가할수록 많아져서 구조적 결함을 생성했기 때문이라 사료된다.⁷⁾ 또한 SnO₂ 박막은 가시광 영역에서 85-90%의 투과도를 가지고 있으나,^{26,27)} 제작된 SnO 박막은 가시광영역에서의 투과도가 매우 낮았으며, 플라즈마 파워가 증가할수록 투과도는 60-70%에서 40-50%로 낮아짐을

Fig. 4. Optical properties of SnO thin films.

Fig. 5. Electrical properties of SnO thin films, (a) Electrical Conductivity and (b) Mobility and Carrier Concentration.

보였다. 일반적으로 SnO는 SnO₂ 보다 산소 비율이 적고 굴절률이 낮아 투과도가 낮게 나타나고, 화학조성, 결정립 크기, 구조적 결함 등 또한 투과도 특성에 영향을 미친다.^{18,19)} 플라즈마 파워가 증가할수록 높은 에너지를 가진 원자들이 많아지고 Sn 빈자리가 많아지면서 구조적 결함을 생성하였고, 결정립 크기는 커졌으며, 표면거칠기도 높아지면서 투과도가 점점 낮아지는 것으로 사료된다.

마지막으로 약 500 nm 두께의 Sn 전극을 증착하여 전

기적 특성을 살펴보았다. 측정 시 팁 접촉에 의한 전극 손상은 나타나지 않았으며, 또한 Sn 전극은 시편과 오믹(ohmic) 접촉을 하고 있어 전기적 특성 파악에 큰 영향을 미치지 않았다. 홀 측정을 통해 각 시편들의 전기적 특성을 측정할 수 있었으며, 이들의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 홀 측정 결과 모든 시편은 p형 전도 형태(conduction type)를 나타내었고, 전기전도도는 0.017(Ωcm)⁻¹에서 0.024(Ωcm)⁻¹로 선행연구들과 비슷한 값을 보였다.^{11,12,17-19,31)} 하지만 SnO₂ 박막에 도핑하여 만든 p형 SnO₂ 박막보다는 다소 낮은 값을 띄고 있다.¹¹⁾ 플라즈마 파워가 증가할수록 Sn 빈자리가 생성되었고,⁷⁾ 이는 소폭 증가한 캐리어 농도에 영향을 주었다. SEM과 AFM 측정 결과에서 보듯이 SnO 박막은 기둥(column)형식으로 불규칙한 결정립 구조를 나타내고 있으며, 이는 이동도 감소에 영향을 미친 것으로 생각된다.

4. 결 론

RF 반응성 스퍼터링 방법을 이용하여 SnO 산화주석박막을 증착하였고, XRD, AFM, UV-Vis 분광계 및 홀 측정을 통하여 박막의 특성을 분석하였다. 본 연구는 플라즈마 파워에 의한 SnO 박막의 구조적, 광학적, 전기적 특성 변화를 고찰하는데 중점을 두었다. 플라즈마 파워가 증가할수록 SnO 박막은 우선 성장 방향이 강해졌고, 우선 성장 방향에 대한 d-spacing은 감소하였으며, 결정립 크기는 증가하였다. 또한 매우 불규칙한 미세구조를 보였다. 플라즈마 파워가 증가할수록 박막 내에 존재하는 결함이 많아져서 SnO 박막의 광흡수단은 긴 파장 방향으로 이동하였고 투과도는 낮아짐을 보였다. 그리고 캐리어 농도의 증가에 의해서 전기전도도가 소폭 증가하였다.

Acknowledgment

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2012-0003724).

REFERENCES

1. M. Batzill and U. Diebold, "The Surface and Materials Science of Tin Oxide," *Prog. Surf. Sci.*, **79** 47-154 (2005).
2. B. G. Lewis and D.C. Paine, "Applications and Processing of Transparent Conducting Oxides," *MRS Bull.*, **25** [8] 22-7 (2000).
3. J. Kim, B. Kim, S. Choi, J. Park, and J. Park, "SnO₂ Semiconducting Nanowires Network and Its NO₂ Gas Sensor Application (in Korean)," *Kor. J. Mater. Res.*, **20** [4] 223-27 (2010).
4. S. E. Kim and M. Oliver, "Structural, Electrical, and Optical

- Properties of Reactively Sputtered SnO₂ Thin Films,” *Met. Mater. Int.*, **16** [3] 441-46 (2010).
5. S. P. Kim, Y. Kim, S. D. Kim, and S. E. Kim, “The Effect of Vacuum Annealing of Tin Oxide Thin Films Obtained by RF Sputtering,” *J. Kor. Ceram. Soc.*, **48** [4] 316-22 (2011).
  6. H. D. Kim, J. S. Choi, and D. W. Shin, “Fabrication of the Conductive Fiber Coated Sb-doped SnO₂ Layer,” *J. Kor. Ceram. Soc.*, **39** [4] 386-93 (2002).
  7. W. Guo, L. Fu, Y. Zhang, K. Zhang, L. Y. Liang, Z. M. Liu, and H. T. Cao, “Microstructure, Optical, and Electrical Properties of p-type SnO Thin Films,” *Appl. Phys. Lett.*, **96** 042113:1-3 (2010).
  8. H. Kawazoe, M. Yasukawa, H. Hyodo, M. Kurita, H. Yanagi, and H. Hosono, “P-type Electrical Conduction in Transparent Thin Films of CuAlO₂,” *Nature*, **389** [6654] 939-42 (1997).
  9. A. Kudo, H. Yanagi, H. Hosono, and H. Kawazoe, “SrCu₂O₂: A p-type Conductive Oxide with Wide Band Gap,” *Appl. Phys. Lett.*, **73** [2] 220-22 (1998).
  10. A. Tsukazaki, A. Ohtomo, T. Onuma, M. Ohtani, T. Makino, M. Sumiya, K. Ohtani, S.F. Chichibu, S. Fuke, Y. Segawa, H. Ohno, H. Koinuma, and M. Kawasaki, “Repeated Temperature Modulation Epitaxy for p-type Doping and Light-Emitting Diode Based on ZnO,” *Nat. Mater.* **4** [1] 42-6 (2005).
  11. J. Ni, X. Zhao, X. Zheng, J. Zhao, and B. Liu, “Electrical, Structural, Photoluminescence and Optical Properties of p-type Conducting, Antimony-doped SnO₂ Thin Films,” *Acta Mater.*, **57** 278-85 (2009).
  12. Z. Ji, Z. He, Y. Song, K. Liu, and Z. Ye, “Fabrication and Characterization of Indium-doped p-type SnO₂ Thin Films,” *J. Cryst. Growth*, **259** 282-85 (2005).
  13. C. H. Lee, B. A. Nam, W. K. Choi, J. K. Lee, D. J. Choi, and Y. J. Oh, “Mn:SnO₂ Ceramics as p-type Oxide Semiconductor,” *Mater. Lett.*, **65** 722-25 (2011).
  14. J. Ni, X. Zhao, and J. Zhao, “P-type Transparent Conducting SnO₂:Zn Film Derived from Thermal Diffusion of Zn/SnO₂/Zn Multilayer Thin Films,” *Surf. Coat. Tech.*, **206** [21] 4356-61 (2012).
  15. J. Zhao X.J. Zhao, J.M. Ni, and H.Z. Tao, “Structural, Electrical and Optical Properties of p-type Transparent Conducting SnO₂:Al Film Derived from Thermal Diffusion of Al/SnO₂/Al Multilayer Thin Films,” *Acta Mater.*, **58** 6243-48 (2010).
  16. X.Q. Pan and L. Fu, “Oxidation and Phase Transitions of Epitaxial Tin Oxide Thin Films on (1012) Sapphire,” *J. Appl. Phys.*, **89** [11] 6048-55 (2001).
  17. Y. Ogo, H. Hiramatsu, K. Nomura, H. Yanagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, “p-channel Thin-Film Transistor using p-type Oxide Semiconductor, SnO,” *Appl. Phys. Lett.*, **93** 032113:1-3 (2008).
  18. L. Y. Liang, Z. M. Liu, H. T. Cao, Z. Yu, Y. Y. Shi, A. H. Chen, H. Z. Zhang, Y. Q. Fang, and X. L. Sun, “Phase and Optical Characterizations of Annealed SnO Thin Films and Their p-Type TFT Application,” *J. Electrochem. Soc.*, **157** [6] H598-H602 (2010).
  19. L.Y. Liang, Z.M. Liu, H.T. Cao, and X.Q. Pan, “Microstructural, Optical, and Electrical Properties of SnO Thin Films Prepared on Quartz via a Two-Step Method,” *Appl. Mater. Int.*, **2** [4] 1060-65 (2010).
  20. K. Ellmer, “Magnetron Sputtering of Transparent Conductive Zinc Oxide: Relation between the Sputtering Parameters and the Electronic Properties,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33** [4] R17-R32 (2000).
  21. S. H. Park, J. H. Kang, and K. S. Yoo, “Fabrication of the SnO₂ Thin Film Gas Sensors using an RF Magnetron Sputtering Method and Their Alcohol Gas-Sensing Characterization,” *J. Kor. Sens. Soc.*, **14** [2] 63-8 (2005).
  22. Y.M. Lu, W.S. Hwang, W.Y. Liu, and J.S. Yang, “Effect of RF Power on Optical and Electrical Properties of ZnO Thin Film by Magnetron Sputtering,” *Mater. Chem. Phys.*, **72** 269-72S (2001).
  23. Hamzaoui and M. Adnane, “Effects of Temperature and r.f. Power Sputtering on Electrical and Optical Properties of SnO₂,” *Appl. Energ.*, **65** 19-28 (2000).
  24. C. Suryanarayana and M. G. Norton, X-ray diffraction -A Practical Approach; p.212, Plenum Press, New York, 1998.
  25. D. Hwang, K. Bang, M. Jeong, and J. Myoung, “Effects of RF Power Variation on Properties of ZnO Thin Films and Electrical Properties of p-n Homojunction,” *J. Cryst. Growth*, **254** 449-55 (2003).
  26. V. V. Kissine, S. A. Voroshilov, and V. V. Sysoev, “Oxygen Flow Effect on Gas Sensitivity Properties of Tin Oxide Film Prepared by R.F. Sputtering,” *Sens. Actuat. B*, **55** 55-9 (1999).
  27. I. H. Kim, J. H. Ko, D. Kim, K. S. Lee, T. S. Lee, J. Jeong, B. Cheong, Y. J. Baik, and W. M. Kim, “Scattering Mechanism of Transparent Conducting Tin Oxide Films Prepared by Magnetron Sputtering,” *Thin Solid Films*, **515** 2475-80 (2006).
  28. K. Vedom and P. Limsuwan, “Piezo- and Elasto-Optic Properties of Liquids under High Pressure. II. Refractive Index vs Density,” *J. Chem. Phys.*, **69** [11] 4772-78 (1978).
  29. W. Rzedkiewicz and A. Pana, “Determination of the Analytical Relationship between Refractive Index and Density of SiO₂ Layers,” *Acta Phys. Pol.*, **116** S92-S94 (2009).
  30. E. Marquiez, J. M. Gonzalez-Lealy, R. Jimenez-Garayay, S. R. Lukicz, and D. M. Petrovicz, “Refractive-Index Dispersion and the Optical-Absorption Edge of Wedge-Shaped Thin Films of Cu_xAs₅₀Se_{50x} Metal-Chalcogenide Glasses,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **30** 690-702 (1997).
  31. Y. Kim, J. H. Jang, J. S. Kim, S. D. Kim, and S. E. Kim, “Nitrogen Doped p-type SnO Thin Films Deposited via Sputtering,” *Mater. Sci. Eng. B*, **177** 1470-75 (2012).