반응성 스퍼터링법으로 제조된 Al_2O_3 막을 이용한 $\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{ZnO}$ 투명 히터의 내식성과 투과도 개선 연구

방금혁 · 최두호*

동의대학교 신소재공학과

Simultaneous Improvement in the Corrosion Resistance and Visible Transparency of $\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{ZnO}$ Transparent Heaters with Reactively Sputtered Al_2O_3 Layers

Geumhyuck Bang and Dooho Choi*

School of Advanced Materials Engineering, Dong-Eui University, Busan 47340, Republic of Korea

Abstract: In this study, we report a methodology that simultaneously improved the corrosion resistance and visible transparency of $\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{ZnO}$ transparent heaters with the addition of reactively sputtered Al_2O_3 layers. To assess corrosion resistance, ZnO and Al_2O_3 layers with thicknesses in the range of 0-20 nm were deposited onto 20 nm-thick Cu layer, and the corrosion behavior of the underlying Cu layers was investigated by evaluating the sheet resistance change in an 85 °C/85% humidity test. While the 20 nm-thick ZnO layer was not an effective moisture barrier, showing a sheet resistance increase of more than 50% after 10,000 m, the sheet resistance of the Cu layer below the 5 nm-thick Al_2O_3 layer did not show an observable increase for equal duration. Optical transmittance was also investigated by constructing glass/ $\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ structures with varying thicknesses for the top ZnO and Al_2O_3 layers, in the range of 10-30 and 10-60 nm, respectively. The thicknesses of the bottom ZnO and Cu layers were fixed at 30 nm and 10 nm. The results revealed that the average visible light transmittance of the $\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ structure increased by 2.5% over the optimized $\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{ZnO}$ structure.

(Received January 6, 2021; Accepted January 20, 2021)

Keywords: Al_2O_3 , reactive sputtering, transparent heaters, sheet resistance, optical transmittance, corrosion

1. 서 론

ITO (Indium Tin Oxide)는 높은 가시광선 투과도와 낮은 면저항 특성으로 투명 히터에 사용되고 있는 대표적인 물질이다. 하지만 희토류인 Indium의 첨가와 필수적인 고온 공정으로 인한 높은 제조원가, 높은 면저항, 산화물 특유의 취성으로 인한 글라스 곡면부에서의 크랙발생등의 문제점으로 인해 투명 히터 적용에 한계가 있고 이에 대한 대체 연구가 활발히 진행 중이다 [1,2,3]. 이를 대체하기 위해 연구중인 물질로는 카본 나노튜브 (carbon nanotube) [4], 그래핀 (graphene) [5,6], 은 나노와이어 (Ag nanowire) [7,8], 산화물/금속/산화물 (oxide/metal/oxide) [9,10] 등이

있는데 카본 나노튜브와 그래핀은 높은 가시광선 투과도를 보이지만 면저항이 높아 투명 히터 적용에 적합하지 않고 은 나노와이어는 높은 가시광선 투과도와 낮은 면저항을 가지지만 면상 발열이 아닌 선상 발열로 발열 균일도가 떨어지며 열적 안정성과 장기신뢰성이 취약하여 상업적 투명 히터 적용에 적합하지 않다. 반면, 산화물/금속/산화물 구조의 투명히터는 높은 가시광선 투과도와 낮은 면저항을 가질뿐만 아니라 박막 내 균일한 면저항의 분포로 인한 균일한 발열특성, 그리고 간단한 공정과 대면적화 등의 장점으로 인해 ITO의 대체물질로 크게 각광받고 있다. 하지만 산화물/금속/산화물 투명히터의 산화물로 주로 사용되는 ZnO 산화물층은 수분 투과성이 높아 고온환경에 지속적으로 노출 시 금속층의 부식에 취약하게 되어 장기안정성이 취약하다는 단점을 가지고 있다 [11,12].

Al_2O_3 는 높은 광투과도 특성을 보이며, 극박 두께에서도

- 방금혁: 석사과정, 최두호: 조교수

*Corresponding Author: Dooho Choi

[Tel: +82-51-890-1723, E-mail: dhchoi@deu.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

우수한 수분침투 방지막으로 알려져 있다 [13]. Al_2O_3 박막은 다양한 스퍼터링으로 증착이 가능한데 대표적으로 Al_2O_3 타겟을 직접 스퍼터링 하는 방법 (target sputtering) 과 Al 타겟을 스퍼터 하는 도중 O_2 가스를 흘려 증착과정에서 화학반응을 이용하여 Al_2O_3 층을 형성시키는 반응성 스퍼터링법 (reactive sputtering) 이 있다. 타겟 스퍼터링법의 경우 일반적으로 증착률이 매우 낮으며 이를 해결하기 위해서 전력을 증가시켜야 하지만 산화물 타겟의 높은 취성으로 인해 높은 전압이 인가되면 스퍼터 타겟에 손상이 발생할 수 있어 전력 증가에 한계가 있다 [14]. 반면, 반응성 스퍼터링법을 이용한 Al_2O_3 박막의 증착은 연성의 특성을 가지는 금속 타겟을 사용하기 때문에 인가되는 전력을 상당히 증가시킬 수 있어 타겟 스퍼터링법에 비해 매우 높은 증착률이 가능하고 박막 내 유입되는 O_2 가스양에 따라 박막의 조성비 조절이 용이한 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 OMO 구조의 투명 히터 상부에 우수한 수분침투 방지막으로 알려진 Al_2O_3 박막을 반응성 스퍼터링법으로 증착하여 투명 히터의 고온 내식성 향상과 더불어 광 투과도의 증가가 동시에 가능한 방법을 제시한다.

2. 실험 방법

20 mm × 20 mm의 유리 (Non alkali glass, Corning E2000) 기판을 별도의 처리없이 이용하였다. 증착 전 챔버의 기저압력 (base pressure)은 5.0×10^{-7} Torr 이하로 유지하였고, 모든 증착 과정에서 20 sccm Ar 가스 (99.9999%)를 주입하여 챔버 내 압력을 1×10^{-2} Torr (ZnO , Al_2O_3), 3×10^{-3} Torr (Cu)로 상승 유지시킨 후 DC 100 W (Cu), RF 50 W (ZnO), RF 60 W (Al_2O_3)를 인가하여 박막을 형성하였다. 반응성 스퍼터링의 경우 1 sccm의 O_2 가스를 Ar 가스와 혼합 주입하여 챔버 내 압력을 1×10^{-2} Torr로 유지한 상태에서 Al 타겟에 RF 150 W를 인가하는 반응성 스퍼터링법을 이용하여 Al_2O_3 박막을 형성하였다. 모든 스퍼터 타겟의 직경은 3 inch였으며, 기판의 회전속도는 15 RPM (revolution per minute)으로 유지하였으며 기판에 대한 인위적인 가열이나 냉각은 실시하지 않았다.

ZnO , Cu 박막의 두께는 유리기판상에 다양한 두께의 박막을 증착한 후 Alpha-step surface profiler (D-100, KLA Tencor)를 이용하여 측정하였으며, 도출된 ZnO 와 Cu의 증착률은 각각 0.046 nm/s와 0.51 nm/s이었다. Al_2O_3 박막의 굴절률과 두께는 실리콘 (Si) 웨이퍼 기판상에 증착한 Al_2O_3 박막을 Spectroscopic Ellipsometry (M2000D, Woollam)를 이용하여 70° 각도로 입사되는 400 – 1000 nm

파장의 빛에 대해 5점 매핑 (mapping) 법으로 측정하였고, 도출된 반응성 스퍼터링과 타겟 스퍼터링의 증착률은 각각 0.0094 nm/s와 0.00098 nm/s이었다. 상부 산화물 층의 종류와 두께가 부식특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 Cu 층의 두께를 20 nm를 고정한 채 상부에 ZnO 및 Al_2O_3 층을 0-20 nm 증착 후 85 °C/85%의 항온항습 분위기에서 유지 실험(85/85 테스트)을 실시하였고 노출 시간에 따른 면저항의 증가를 통하여 부식 정도를 판단하였다. 또한 ZnO/Cu/ZnO 투명 히터 구조의 상부 ZnO 와 최상단에 증착되는 Al_2O_3 층을 두께를 변화시키며 가시광선 투과도의 변화를 측정하였다. ZnO 및 Al_2O_3 산화물의 표면 형상을 확인하기 위해 UHR FE-SEM (Ultra High Resolution Field-Emission Scanning Electron Microscopy, S-5500, Hitachi High-Technologies Co.)을 이용하였다. 시편의 면저항은 4점 측정기 (4 Point measurement system, CMT-100S, AIT)를 이용하여 측정하였고, 광투과도 자외-가시광선 분광계 (UV-Visible spectrophotometer, Agilent)를 이용하여 측정하였으며 유리기판 자체의 광 흡수도는 제외하고 나타내었다. 투명 히터의 성능 평가를 위해 20 mm × 20 mm 크기의 면상 발열체를 제작하였으며 직류 (direct current) 전력 공급장치 (EPS-3305, EZT)로 전압을 인가하였으며 비접촉식 적외선 카메라 (PTI120, Fluke)를 이용하여 투명히터의 온도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1(a)는 본 연구에서 내식특성 평가를 위해 제작한 시편의 모식도이다. Glass기판 위에 Cu층의 두께를 20 nm로 고정시킨 채 상부 ZnO 와 Al_2O_3 층의 두께를 0-20 nm로 변화시키며 제작하였다. 그림 (b), (c)는 7.5 nm의 두께를 가진 ZnO 와 Al_2O_3 의 FE-SEM 표면 형상 사진을 각각 보여주며, 모두 기공 없이 연속 박막을 형성한 것을 확인할 수 있다.

그림 2(a)는 반응성 스퍼터링법과 Al_2O_3 타겟 스퍼터링 방법으로 증착한 Al_2O_3 박막의 증착률 결과이며, 반응성 스퍼터링법의 증착률이 타겟 스퍼터링법의 증착률 대비 약 10배 정도 높은 것을 알 수 있다. 스퍼터링법에 의한 증착률은 일반적으로 인가되는 전력에 비례하여 증가하는데, 금속인 Al target을 사용하는 반응성 스퍼터링법은 높은 전력의 인가에도 타겟 손상이 없어 150 W의 높은 전력을 인가한 반면, 산화물인 Al_2O_3 타겟 스퍼터링법의 경우 70 W 이상의 전력을 인가할 시 타겟에 균열 (crack)이 발생하기 때문에 전력증가에 한계가 있지만, 2배의 인가 전력값 차

Fig. 1. (a) Sample structure used for the 85/85 test, (b) Plan-view SEM micrographs for (b) ZnO (7.5 nm thick) and (c) Al₂O₃ (7.5 nm thick) layers.

이에도 불구하고 10배의 증착률 차이가 나타난 것으로 볼 때 기본적으로 타겟 스퍼터링법에 비해 반응성 스퍼터링법의 증착 속도가 현저히 빠르다는 것을 보여준다. Fig. 2(b)는 반응성 스퍼터링법과 타겟 스퍼터링법으로 제조된 20 nm 두께의 Al₂O₃층에 대한 굴절률 결과이다. 반응성 스퍼터링법으로 제조된 Al₂O₃는 문헌상 보고된 굴절률과 매우 유사한 값을 가지는 반면, 타겟 스퍼터링법으로 제조

된 Al₂O₃의 경우는 상당한 차이를 보였다. 본 연구에서는 높은 증착률과 더불어 문헌상 보고된 굴절률과 유사한 값을 가지는 반응성 스퍼터링법을 이용하여 제조된 Al₂O₃ 박막에 대해 부식 방지막으로서 기능을 검증하고, ZnO/Cu/ZnO구조의 투명히터 구조와 결합하였을 때 투과도에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

그림 3(a)는 Cu층의 두께를 20 nm로 고정시킨 채 상부

Fig. 2. (a) Al₂O₃ deposition rates by the reactive sputtering and target sputtering. The sputtering powers for the reactive sputtering and target sputtering were 150 W and 70 W, respectively. (b) Refractive indices for the Al₂O₃ layers deposited by the two deposition methods. The reported refractive index [15] is also given as a reference.

Fig. 3. (a) Sheet resistance as a function of duration for the 85/85 test. The thicknesses of ZnO and Al_2O_3 layers were varied in the range of 5-20 nm, (b) Optical images of Cu (20 nm)/ZnO (20 nm) samples before and after the 85/85 test for 10,000 minutes of the test.

에 ZnO층과 Al_2O_3 층의 두께를 각각 0-20 nm로 변화시키며 증착한 시편에 대해 85/85 테스트를 실시하여 10,000 분까지 유지시킬 때의 면저항 변화를 보여준다. 상부 산화물이 없는 Cu층은 50분 경과 후 가파른 면저항의 증가를 보이며 부식이 급속히 진행되었으며, Cu 상부에 5, 10, 20 nm 두께의 ZnO를 증착한 시편 역시 실험 과정에서 급격한 면저항의 상승이 관찰되었다. 하지만 Cu 상부에 Al_2O_3 를 증착한 시편은 5 nm의 두께에서도 초기 면저항 대비 5%의 미미한 증가만이 확인되었으며, 20 nm 두께에서는 오히려 면저항이 소폭 (6.1%) 감소하였다. 이는 상부 Al_2O_3 층이 효율적인 수분 침투방지막으로서의 역할을 수행한다는 것을 의미하며, 면저항의 감소는 Cu의 박막의 결정립 성장에 의해 수반된 막질 개선과 결정립계 전자산란이 저감된 결과라고 판단된다 [16]. 그림 3(b)는 Cu (20 nm)/ZnO (20 nm) 샘플의 85/85 테스트 전과 10,000 분 후의 시편 사진이다. Cu 상부에 20 nm 두께의 ZnO층에도 불구하고 고온 다습한 환경에서 10,000분이 경과함에 따라 Cu층의 심각한 부식으로 인하여 극심한 면저항의 증가와 함께 시편이 변색된 것을 확인할 수 있다.

그림 4(a)는 투과도 측정에 사용된 Glass/ZnO/Cu/ZnO/ Al_2O_3 의 샘플 구조를 보여주며, 모든 구조에서 하부 ZnO의 두께와 Cu 박막의 두께는 각각 30 nm [17]와 10 nm로 고정되었다. 그림 4(b)는 상부 ZnO의 두께를 10 nm로 고정한 채 Al_2O_3 박막의 두께를 10-60 nm로 변화시키며 측정된 투과도 결과이며, 표 1에 표기한 바와 같이 Al_2O_3

층의 두께가 증가할 때 투과도의 상승이 수반되다가 50 nm의 두께에서 최고 평균투과도 (79.1%)를 보였으며 60 nm의 두께에서는 투과도가 감소하는 특성을 보였다. 하지만 ZnO/Cu/ZnO/ Al_2O_3 구조의 최고 투과도 결과는 최적화된 상하부 ZnO 층만으로 투과도가 최적화된 구조인 ZnO (30 nm)/Cu (10 nm)/ZnO (40 nm)의 평균투과도 (80.9%)보다는 낮은 값을 보였다. 그림 4(c)는 상부 ZnO의 두께를 20 nm로 고정한 채 Al_2O_3 의 박막의 두께를 10-50 nm까지 변화시키며 측정된 투과도 결과이다. 역시 Al_2O_3 층의 두께가 증가할 때 투과도의 상승이 수반되다가 40 nm의 두께에서 최고 평균투과도 (82.1%)가 확인되었으며 50 nm 두께 이상일 때는 하락하는 경향을 보였다. 여기서 최적화된 ZnO (30 nm)/Cu/ZnO (20 nm)/ Al_2O_3 (40 nm) 구조의 평균투과도 (82.1%)는 상하부 ZnO 층으로 최적화된 ZnO/Cu/ZnO 구조보다 높은 가시광선 평균투과도를 보인다는 점은 주목할 만하다. 표 1에 본 연구에서 제작한 ZnO/Cu/ZnO/ Al_2O_3 의 구조에서 상부 ZnO 및 Al_2O_3 두께 변화에 따른 최고투과율과 해당파장, 그리고 가시광선 영역의 평균 투과율에 대해 정리하였다.

그림 5(a)는 가장 높은 투과도를 보이는 ZnO (30 nm)/Cu (10 nm)/ZnO (20 nm)/ Al_2O_3 (40 nm) 구조를 가지는 투명히터의 줄 발열 (Joule heating) 특성을 보여준다. 전압 인가 후 2분 간격으로 0.5 V씩 전압을 증가시키며 실험을 진행하였다. 투명히터는 짧은 시간 (20초) 내에 목표 온도의 약 90%에 도달하였으며, 이러한 빠른 열적 반응속

Fig. 4. (a) Schematic electrode structure for measurement of optical transmittance. Optical transmittance as a function of incident photon wavelength for the electrodes having bottom ZnO and Cu top ZnO and Al₂O₃ layer thicknesses fixed at 30 and 10 nm, respectively, whereas the thicknesses for the top ZnO and Al₂O₃ layers are (b) 10 nm and 10-60 nm and (c) 20 nm and 10-50 nm, respectively. The transmittance for the top ZnO layer (40 nm) without Al₂O₃ layer is also given for comparison.

Table 1. Layer thicknesses of the bottom ZnO, Cu top ZnO and Al₂O₃. The maximum transmittance values with the corresponding wavelengths and the average visible light (wavelength of 400-800 nm) transmittance values are presented. The transmission loss for the glass substrates was excluded for the transmittance measurement.

Thickness (nm)				Visible Light Transmittance	
Bottom ZnO	Cu	Top ZnO	Al ₂ O ₃	Max (Wavelength)	Ave. (λ: 400-800 nm)
30	10	10	0	74.4% (612 nm)	61.4%
			10	82.7% (614 nm)	68.8%
			20	85.5% (625 nm)	73.5%
			30	86.3% (630 nm)	74.6%
			40	89.7% (621 nm)	76.6%
			50	90.0% (632 nm)	79.1%
		20	60	88.6% (627 nm)	76.9%
			0	81.2% (623 nm)	69.1%
			10	87.3% (628 nm)	75.0%
			20	89.3% (645 nm)	79.0%
			30	92.0% (633 nm)	81.1%
			40	91.9% (647 nm)	82.1%
			50	90.8% (643 nm)	81.1%
		30	0	91.4% (699 nm)	79.7%
			40	91.8% (643 nm)	80.9%
			50	89.9% (660 nm)	78.9%
			0		

도는 면상 발열체의 특성에 기인하는 것으로 판단된다 [18]. 그림 5(b)는 발열 재현성을 시험하기 위해 60초 간격으로 3.5 V 전압의 인가와 제거를 10회 반복하며 온도의 증가와 하락을 측정한 결과이다. 최고온도인 약 100 °C에서 최대-최저 온도차이가 1 °C 미만으로서 매우 우수한 열적 재현성을 보이는 것으로 드러났으며, 이는 반복되는 고온 발열에도 히터의 성능에 변화가 없음을 알려준다. 그림 5(c)는 전압증가에 따른 전류와 온도 그래프, 그리고 전력증가에 따른 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 그림 5(b)의 재현성 테스트에서 보였듯이 100 °C도에 도달하는 데 있어 안정적인 선형의 옴릭 전류-전압 거동 (Ohmic I-V behavior)을 보이고 있으며, 또한 선형의 온도-전력 그래프에서 보듯이 인가되는 전력과 발열량은 선형적으로 비례하는 전형적인 줄 발열 특성을 보이고 있다. 그림 5(d)는 히터의 장수명 테스트 결과를 보여준다. 히터의 온도를 약 100 °C와 150 °C로 유지한 채 10,000분 (약 7일) 동안 동작시켰을 때, 전류와 온도의 변화가 관찰되지 않는 것으로 보아 고온환경에서도 치밀한 Al₂O₃층이 효율적인 투습 방지막으로서 역할을 한다고 결론 내릴 수 있으며, 또한 기존에 알려진 ZnO/Cu/ZnO 투명히터의 구조와 결합할 때 가시광선 투과도까지 향상시킬 수 있어 향후 투명 히터 제

Fig. 5. (a) Temperature increase of the ZnO (30 nm)/Cu (10 nm)/ZnO (20 nm)/Al₂O₃ (40 nm) heater as a function of applied direct current voltage. IR camera images at the voltages of 1, 1.5, 2, 2.5, 3 and 3.5 V are also given. (b) Reproducibility test of a heater by repeatedly turning on and off direct current voltage of 3.5 V with a 90 second interval. (c) Relations of current-voltage, temperature-voltage and temperature-power. (d) Long-term heating heater stability test up to 10,000 minutes with the heater temperatures maintained at around 100 and 150 °C, respectively.

조에 활발한 적용이 기대된다.

4. 결 론

기존에 보고된 ZnO/Cu/ZnO 구조를 가지는 투명 히터의 장기 안정성과 가시광선 투과도를 동시에 향상시킬 수 있는 Al₂O₃ 층의 적용 관련 연구를 수행하였다. Al 금속 타겟을 O₂ 분위기에서 증착하는 반응성 스퍼터링과 Al₂O₃ 타겟을 직접 스퍼터링하는 방법으로 증착한 Al₂O₃층의 특성을 비교하였을 때, 반응성 스퍼터링법으로 증착된 Al₂O₃층이 문헌상 보고된 굴절률과 유사한 값을 가지며 직접 스퍼터링법에 비하여 약 10배 빠른 증착률을 보였다. 20 nm 두께의 Cu 박막 상부에 반응성 스퍼터링법으로 증착된 20 nm의 Al₂O₃는 85 °C/85%의 항온항습 분위기에서 10,000분이 경과하여도 Cu 박막의 면저항 증가가 관찰되지 않을 정도로 우수한 투습 방지막의 역할을 수행하는 것으로 드러났다. 또한 ZnO/Cu/ZnO 구조의 최상단에 Al₂O₃층을 증착하여 형성한 ZnO/Cu/ZnO/Al₂O₃ 구조에서 상부 ZnO와 Al₂O₃의 두께 최적화를 실시한 결과 기존의 최적화

된 ZnO/Cu/ZnO 구조의 가시광선 투과도보다 더 높은 결과를 확보하였다. 반응성 스퍼터링법으로 증착된 Al₂O₃가 적용된 투명히터의 발열시험 결과, 전압 인가 시 약 20초 내에 목표온도에 도달하였으며 약 100 °C의 온도를 유지하기 위하여 전압의 인가와 제거를 반복하였을 때 1% 미만의 매우 우수한 발열 재현성을 가지는 것으로 드러났다. 선형의 전류-전압 거동 (Ohmic behavior)과 선형의 온도-전력 거동 (Joule heating behavior)을 보일 뿐만 아니라 150 °C의 고온 신뢰성 테스트에서도 전류와 온도의 변화가 관찰되지 않는다는 것을 볼 때 치밀한 Al₂O₃층이 수분침투막으로 작용하여 발열층인 Cu의 부식을 효율적으로 억제한다는 것을 알 수 있다.

REFERENCES

1. X. Guo, X. Liu., F. Lin, H. Li, Y. Fan, and N. Zhang, *Sci. Rep.* **5**, 10569 (2015).
2. K. Im, K. Cho, J. Kim, and S. Kim, *Thin Solid Films* **518**, 3960 (2010).
3. D. T. Papanastasiou, A. Schultheiss, D. Muñoz-Rojas, C.

- Celle, A. Carella, J.-P. Simonato, and D. Bellet, *Adv. Funct. Mater.* **30**, 1910225 (2020).
4. L. R. Shobin and S. Manivannan, *Solar Energy Mater. & Solar Cells* **174**, 469 (2018).
  5. S. De and J. N. Coleman, *ACS Nano* **4**, 2713 (2010).
  6. D. Sui, Y. Huang, L. Huang, J. Liang, Y. Ma, and Y. Chen, *Small* **7**, 3186 (2011).
  7. C. Hong, S. Oh, T. Kim, Y. Cha, J. Kwak, J. Shin, B. Ju, and W. Cheong, *Sci. Rep.* **5**, 17716 (2015).
  8. W. Lan, Y. Chen, Z. Yang, W. Han, J. Zhou, Y. Zhang, Q. Su, and E. Xie, *ACS Appl. Mater. & Interf.* **9**, 6644 (2017).
  9. W. Cheong, Y. Kim, J. Lee, C. Hong, H. Choi, Y. Kwak, Y. Kim, and Y. Kim, *Adv. Mater. Technol.* **4**, 1800550 (2019).
  10. M. Miyazaki and E. Ando, *J. Non-cryst. Solids* **178**, 245 (1994).
  11. S. H. Park, S. M. Lee, E. H. Ko, T. H. Kim, Y. C. Nah, S. J. Lee, and H. K. Kim, *Sci. Rep.* **6**, 33868 (2016).
  12. Z. Lin and P. Bristowe, *Phys. Rev. B* **75**, 205423 (2007).
  13. H. Choi, S. Lee, H. Jung, S. Shin, G. Ham, H. Seo, and H. Jeon, *Jap. J. Appl. Phys.* **52**, 035502 (2013).
  14. J. A. García-Valenzuela, R. Rivera, A. B. Morales-Vilches, L. G. Gerling, A. Caballero, J. M. Asensi, C. Voz, J. Bertomeu, and J. Andreu, *Thin Solid Films*, **619**, 288 (2016).
  15. M. A. Hameed, R. K. Jamal, K. A. Aadim, and S. Al-Awadi, *J. Optoelectron. Photon.* **6**, 43 (2015).
  16. C. Detavernier, D. Deduytsche, R. L. Van Meirhaeghe, J. D. Baerdemaeker, and C. Dauwe, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1863 (2003).
  17. D. Kim, T. Lee, and D. Choi, *Korean J. Met. Mater.* **57**, 795 (2019).
  18. D. Lee, G. Bang, M. Byun, and D. Choi, *Thin Solid Films* **697**, 137835 (2020).