

PLD를 이용한 Antimony가 도핑된 p 형 ZnO 박막의 구현

Realization of p-type Conduction in Antimony Doped ZnO Thin Films by PLD

배기열¹, 이동욱¹, J. Elanchezhian², 이원재², 배윤미², 신병철², 김일수^{2,a}, F. K. Shan³
(Ki-Ryeol Bae¹, Dong-Wook Lee¹, J. Elanchezhian², Won-Jae Lee², Yun-Mi Bae², Byoung-Chul Shin²,
Il-Soo Kim^{2,a}, and F. K. Shan³)

Abstract

Antimony (Sb) doped ZnO thin films (0.1 at.%) were deposited on sapphire (0001) substrates at various temperatures (200 - 600°C) by using pulsed laser deposition technique. All the thin films have been characterized by X-ray diffractometer, atomic force microscopy and spectrophotometer to investigate their structural, morphological and optical properties, respectively. Hall measurements were also carried out to identify the electrical properties of the thin films. These thin films were constituted in wurtzite structure with the preferential orientation of (002) diffraction plane and had as high as 80% optical transmission in the visible range. The bandgap energy also was determined by spectrophotometer which was around 3.28 eV. Hall measurements results revealed that the Sb doped ZnO thin film (0.1 at.%) grown at 500°C exhibited p-type conduction with a carrier concentration of $8.633 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, a mobility of $1.41 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ and a resistivity of $51.8 \Omega \cdot \text{cm}$. We have successfully achieved p-type conduction in antimony doped ZnO thin films with low doping level even though the electrical properties are not favorable. This paper suggests the feasibility of p-type doping with large-size-mismatched dopant by using pulsed laser deposition.

Key Words : PLD, ZnO thin films, Sb doped, Hall effects

1. 서 론

질화갈륨 (이하 GaN)은 현재 상용화 되고 있는 발광 다이오드 (LEDs)와 레이저 다이오드 (LDs) 같은 광학소자를 제작하는데 주로 사용되고 있는 재료이다. 광대역 반도체 (widegap semiconductor) 재료인 산화아연 (이하 ZnO)은 GaN과 같은 결정 구조 (wurtzite)와 비슷한 에너지 밴드갭 (ZnO: 3.3 eV, GaN: 3.4 eV)을 가지고 있다. 이와 같은 유사성 때문에 ZnO는 자외선 영역에서의 단파장 광전

소자 (short-wavelength optoelectronics)로의 응용에 매우 유망한 재료로 각광받고 있다[1]. ZnO는 광전소자로의 응용에 GaN에 비해 여러 가지 이점을 가지고 있다. 쉽고 다양한 결정성장법을 통해 고품질의 ZnO 기판 제작이 가능하고, 이로 ZnO 기반 소자 제작비용을 절감 할 수 있을 뿐만 아니라 상온에서 2.4배 큰 여기 결합에너지 (large exciton binding energy) (60 meV)는 강한 NBE 여기 발광 (near band edge excitonic emission)을 가능케 한다. 게다가 고 에너지 방사선(high energy radiation)에 대한 저항력을 가지고 있어 우주·항공 분야로의 응용이 가능하다. 이와 더불어 ZnO는 투명 전도성 산화물 (transparent conductive oxide, TCO)로서 투명 전극 필름 (transparent conductive films), 태양전지 (solar cells window), 벌크 탄성과 소자 (bulk acoustic wave device) 등의 재료로 사용 될 수 있다[2].

1. 동의대학교 나노공학과
(부산시 부산진구 엄광로 995)
2. 동의대학교 전자세라믹스센터
3. 중국 칭다오대학교 물리과학부
a. Corresponding Author : iskim@deu.ac.kr
접수일자 : 2009. 7. 27
1차 심사 : 2009. 8. 12
심사완료 : 2009. 8. 26

기본적으로 ZnO 기반 광전소자를 제작하기 위해서는 n형과 p형의 구현이 반드시 필요하다. 순수한 ZnO는 고유 결함 (native defects)인 아연 침입 (Zn_i)과 산소 공공 (V_O) 으로 인해 자연적으로 n형 반도체 특성을 보이고, 고품질의 n형 ZnO 반도체는 다양한 도핑 (doping)물질의 사용과 도핑 수준 (levels)을 조절함으로써 쉽게 제작할 수 있다. 하지만 p형 ZnO 경우는 고유 결함의 자기보상 (self-compensating)과/ 또는 수소 유입 (hydrogen incorporation) 때문에 그렇지 않다[3]. 다수의 연구소 및 그룹들은 질소(N)[4], 인(P)[5], 비소(As)[6], 리튬(Li)[7], 나트륨(Na)[8] 등을 ZnO에 도핑 함으로써 p형 ZnO를 성공적으로 얻었다고 보고하였지만 명확하지 않은 도핑 메커니즘과 소자 제작을 위한 충분치 않은 p형 특성들은 ZnO 기반 광전소자로의 발전에 여전히 큰 문제로 남아있다[2]. 최근 S. Limpijumnong et al. 등은 새로운 도핑 메커니즘을 제시하였다. 안티모니 (Sb)와 같은 큰 원자 반경을 가진 V족 물질을 도펀트 (dopant)로 사용하여 격자 내의 Zn 원자를 치환시켜 크기로 인한 불일치 (large-sized-mismatched-group V dopant)를 통해 2개의 Zn 공공을 형성시킬 수 있고, Sb의 Zn 치환 에너지는 비슷한 원자 반경을 가진 산소 치환 에너지와 산소 공공으로의 침입 에너지보다 낮다는 것을 이론적으로 나타내었다[9]. 이것을 $Sb_{Zn} - 2V_{Zn}$ complex라 칭한다. 이를 이용해 다수의 연구 그룹들은 Sb를 ZnO에 도핑하여 분자선 에피택시 (MBE)[10], 졸-겔 (Sol-Gel)[11], 그리고 RF 마그네트론 스퍼터링 (RF magnetron sputtering)[12]과 같은 기술들을 이용해서 p형 ZnO 박막을 구현하여 보고하였다. 보고된 모든 논문에서 Sb의 도핑 수준은 높아 제작된 ZnO 박막의 결정질은 상대적으로 낮을 뿐만 아니라 펄스 레이저 증착법 (PLD)을 이용하여 제작된 Sb를 도핑한 ZnO 박막 (이하 Sb doped ZnO)의 특성 보고는 적다[13]. 본 실험에서 우리는 PLD를 이용하여 매우 낮은 수준의 Sb를 도핑하여 p형 ZnO 박막 제작을 시도하였고, 다양한 성장온도에서 제작된 Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 구조적, 광학적 그리고 전기적 특성을 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

Sb doped ZnO 타겟을 제작하기 위해 ZnO 분말 (High Purity Chemicals, 99.99%, 1 μm)과 Sb_2O_3

표 1. PLD 에 의해 제작된 Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 증착조건.

Table 1. Deposition conditions of Sb doped ZnO thin films (0.1 at.%) prepared by PLD.

Parameter	Conditions
Target	Sb doped ZnO (0.1 at.%)
Substrate	DSP sapphire (0001)
T-S distance	50 mm
Pulse energy	200 mJ
Pulse repetition	5 Hz
Base pressure	2.0×10^{-6} Torr
Working pressure	O ₂ , 130 mTorr
Temperature	200°C - 600°C

분말 (Aldrich, 99.9+%, nanopowder)를 원료로 하여 정해진 양의 Sb_2O_3 분말과 ZnO 분말을 플라스틱 용기에 불과 함께 넣어 24시간 동안 습식 볼 밀링 (ball milling)을 실시하였다. 6시간 동안 80°C의 오븐에서 건조 후, 디스크 형태의 타겟을 얻기 위하여 700 kg/cm²의 힘으로 일축 가압 성형을 하고, 24000 kg/cm²으로 정수압 성형 (CIP)을 실시하였다. 성형된 디스크 형태의 분체를 전기로를 이용하여 1400°C에서 4 시간동안 소결하여 디스크 형태의 직경 1 inch의 Sb doped ZnO (0.1 at.%) 타겟을 얻었다. Sb doped ZnO 박막의 제작은 KrF 펄스 엑시머 레이저 (pulsed excimer laser) (Lambda Physik COMPexPro 110, $\lambda = 248$ nm, $\tau = 20$ ns)를 사용하여 레이저 ablation 방법으로 제작되었다. 레이저를 타겟의 표면에 45° 각도로 조사시켰고, 레이저가 입사된 타겟 표면에는 고품질의 플라즈마 플룸이 형성되었다. 제작된 Sb doped ZnO 박막의 정확한 전기적 특성 분석을 위해 절연체인 사파이어 기판 (0001)을 사용하였다.

표 1에는 Sb doped ZnO 박막의 제작 조건을 요약하여 나타내었다.

2.2 분석장치

제작된 Sb doped ZnO 박막의 결정구조는 X-선 회절 분석 장치 (Cu-K α radiation with $\lambda = 1.5406$ Å, X'Pert PRO, PANalytical, Netherlands)를 이용해 분석하였고, 분석조건은 $\theta - 2\theta = 20^\circ - 80^\circ$ 구간에서 행하였다. 표면 거칠기는 주사 탐침 현미경 (SPA - 400, Seiko Instruments)의 AFM 모드에서 2 $\mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 범위를 측정하였다. 전기적 특성

분석은 홀효과 측정 시스템 (HEM-2000, EKG corporation)을 사용하여 Van der pauw 법으로 상온에서 실시하였다. 광학적 특성은 분광 광도계 (Spectrophotometer, Vary-5, Australia)를 이용하여 300 nm- 700 nm범위에서 박막의 투과율을 측정하였고, 측정 결과를 통해 모든 박막의 밴드갭 에너지를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1에는 다양한 온도에서 사파이어 기판 위에 PLD로 제작한 Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 $\theta-2\theta : 20^\circ-80^\circ$ 범위에서의 XRD 패턴들을 나타내었고, 각 패턴 위에는 성장온도를 표시하였다. 제작된 모든 박막은 $34.4^\circ, 41.7^\circ, 72.7^\circ$ 부근에서 peak를 가지고 있다. $34.4^\circ, 72.7^\circ$ 의 peak는 각각 wurtzite 구조를 가진 ZnO의 (002)와 (004)면과 일치하고, 제작된 박막은 c-축으로 우선방위 성장한 것을 알 수 있다. 이들 peak 강도는 성장온도가 증가함에 따라 증가하였고, 이는 박막의 결정질이 향상됨을 의미한다. 이러한 박막의 결정질 변화는 온도에 따른 입자의 이동성 (particle mobility)에 기인한다. 낮은 성장온도에서 낮은 입자의 이동성은 박막의 결정화를 차단 할 것이고, 이로 인하여 peak의 강도 감소시키게 된다. 모든 회절 패턴에서 antimony와 관련된 peak를 찾을 수 없었으므로 0.1 at.%와 같은 낮은 도핑 수준은 ZnO의 구조에 영향을 미치지 않았음을 알 수 있었다. 41.7° 의 peak는 기판인 sapphire의 (0006)면과 일치한다.

그림 2에는 다양한 온도에서 사파이어 기판 위에 PLD로 제작한 Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 범위로 측정된 AFM 이미지를 나타내었다. 각 AFM 이미지마다 성장온도를 표시하였다. 600°C 에서 제작된 박막을 제외한 모든 박막의 이미지 형상은 서로 비슷하고, 600°C 에서 제작된 박막은 그레인의 크기가 증가한 것을 알 수 있다. 이는 Structure Zone model of Thornton (이하 SZT)으로 해석 할 수 있다[14]. 600°C 보다 낮은 성장온도에서 박막성장 거동은 SZT의 Zone I에 해당하고, 600°C 의 박막성장 거동은 천이 영역인 Zone T에 해당한다. Zone T에서는 높은 온도로 인한 표면의 충분한 에너지로 입자의 이동성을 증가시켜 표면 확산을 통해 그레인 크기 증가와 더불어 치밀한 배열을 만든다. 표 2를 살펴보면 거칠기의 변화를 정확하게 알 수 있다. 600°C 보다 낮은 성장온도 영역에서는 온도가 증가함에 따라 주상정

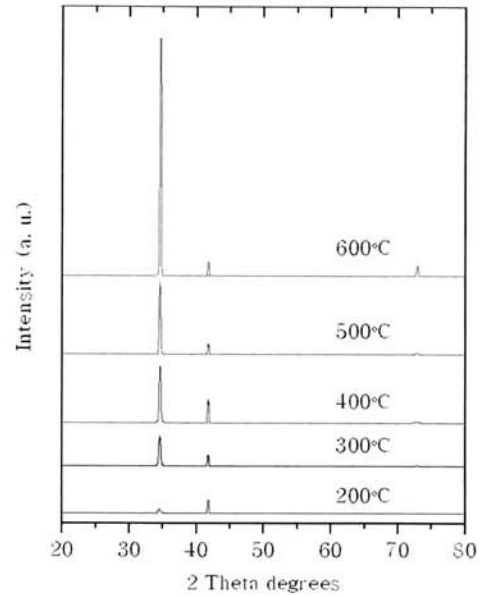


그림 1. PLD를 이용하여 사파이어 기판 위에 다양한 온도에서 제작된 Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 XRD 패턴.

Fig. 1. XRD patterns of Sb doped ZnO thin films (0.1 at.%) on sapphire substrate at various temperature by PLD.

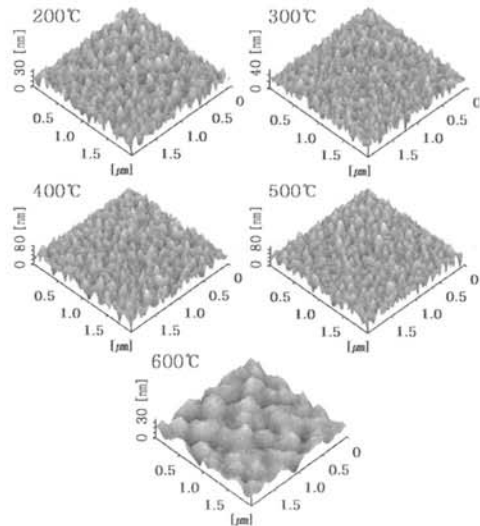


그림 2. 다양한 온도에서 제작된 Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 AFM 이미지.

Fig. 2. AFM images of Sb doped ZnO thin films (0.1 at.%) at various temperature.

표 2. 다양한 온도에서 제작된 Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 RMS 값.

Table 2. RMS values of Sb doped ZnO thin films (0.1 at.%) at various temperature.

	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C
RMS	5.07 nm	6.79 nm	10.9 nm	12.2 nm	5.36 nm

표 3. 다양한 온도에서 제작된 Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 운반자 농도와 형.

Table 3. Carrier concentration and carrier type of Sb doped ZnO thin films (0.1 at.%) at various temperature.

Growth Temperature	Carrier Concentration	Carrier Type
200°C	$-2.376 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	n
300°C	$-8.802 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	n
400°C	$-4.998 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	n
500°C	$8.633 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	p
600°C	$-1.495 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	n

입자의 성장으로 인해 표면 거칠기가 점차 증가하였고, 600°C에서 제작된 박막의 경우, 표면 거칠기가 입자의 표면 확산으로 인해 500°C에서 제작된 박막의 그것보다 2배 이상 감소함을 알 수 있다.

Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 전기적 특성 분석을 위해 홀효과 측정 시스템을 사용하여 상온에서 Van der pauw 법으로 실시하였다. 측정 결과는 표 3과 그림 5에 나타내었다. 표 3을 살펴보면 500°C에서 제작한 박막을 제외한 모든 박막이 n형 반도체 특성을 보이고, 성장온도가 증가함에 따라 운반자 농도 (carrier concentration)가 감소하였다. 500°C에서 제작한 박막은 p형 반도체 특성을 보이고 그보다 높은 온도에서는 다시 n형 반도체 특성을 보인다. 이러한 박막의 성장온도의 증가에 따른 운반자 농도의 감소와 p형 반도체의 형성은 $\text{Sb}_{\text{Zn}} - 2\text{V}_{\text{Zn}}$ complex에 의한 것이라 생각된다. 낮은 성장온도에서의 Sb 원자는 낮은 이동력으로 인하여 ZnO 내부에서 치환효과가 상대적으로 결여되어 n형 반도체 특성을 가지고 있는 것이라 해석될 수 있고, 박막의 성장 온도가 500°C일 때, 이것이 최적화 되는 것을 알 수 있다. 600°C에서 제작된 박막의 다시 n형으로의 전환은 ZnO의 경우, 고

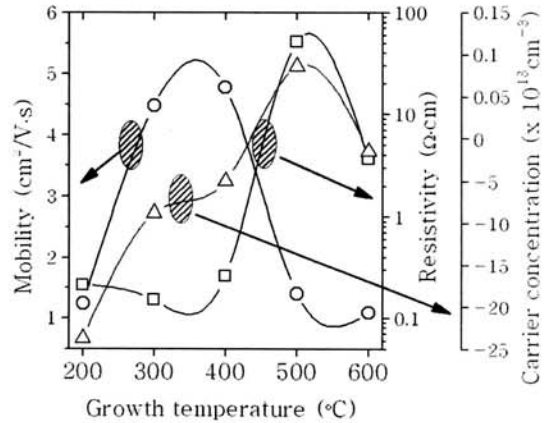


그림 3. 다양한 온도에서 제작된 Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 운반자 이동성(○)과 농도(△), 비저항(□).

Fig. 3. The carrier mobility(○) and concentration (△), resistivity(□) of Sb doped ZnO thin films (0.1 at.%) at various temperature.

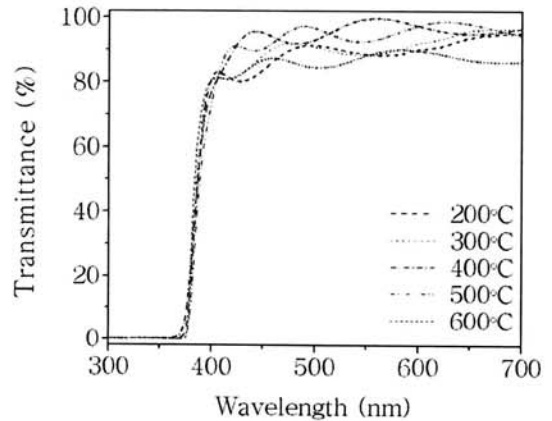


그림 4. 다양한 온도에서 제작된 Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 광학적 투과 스펙트럼.

Fig. 4. Optical transmission spectra of Sb doped ZnO thin films (0.1 at.%) at various temperature.

온에서 산소공공의 형성이 쉽기 때문이라 여겨진다[14]. 그림 5에서의 운반자 이동성 (carrier mobility)과 농도 (carrier concentration)는 선형, 비저항 (resistivity)은 로그 스케일로 나타내었다. 운반자 이동성은 운반자 농도의 감소와 결정성의

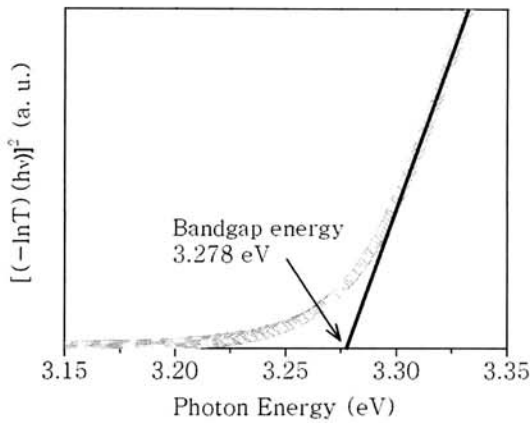


그림 5. 500°C에서 제작된 Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 흡수단에서 외삽을 이용한 밴드갭 에너지 계산법.

Fig. 5. The calculation method of band gap energy by the linear fitting of the relative absorption edge of Sb doped ZnO thin films (0.1 at.%) at 500°C.

증가로 인해 400°C까지의 성장온도에서는 증가하다가 p형 특성을 보일 때 감소하였다. 비저항은 400°C 이하의 성장온도 영역에서는 서로 비슷하다가 p형 특성을 보일 때 급격히 증가하였다. 이는 n형 운반자(전자)의 상쇄와 운반자 농도의 감소 때문이라 생각된다. 500°C에서 제작된 p형 반도체는 $8.633 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 의 운반자 농도, $1.41 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 의 운반자 이동성, $51.8 \Omega \cdot \text{cm}$ 의 비저항 값을 가지고 있었다.

Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 광학적 특성을 알기 위하여 분광광도계를 이용하여 300 nm에서 700 nm까지의 파장범위에서 투과율을 측정하였다. 측정된 모든 박막의 파장에 따른 투과율을 그림 3에 나타내었고, 성장온도에 따라 선의 모양을 변화시켜 표현하였다. 모든 박막은 가시광선 영역에서 80% 이상의 투과율을 가지고 있었고, 날카로운 흡수단 (sharp absorption edge) 또한 관찰되었다. 이 날카로운 흡수단을 통해 광학적 밴드갭 에너지를 계산할 수 있었다. 직접 천이형 반도체 (direct bandgap semiconductor)의 경우 흡수계수 α 는 $-\ln T$ 에 비례하므로 광자 에너지 (photon energy)에 대한 $[-\ln T \times (hv)]^2$ 의 그래프를 도시할 수 있다. 이 그래프에서 흡수단으로부터 $[-\ln T \times (hv)]^2$ 가 0이 되는 지점까지 외삽을 통해 광학적 밴드갭 에너지를 계산할 수 있다[15]. 그림 5

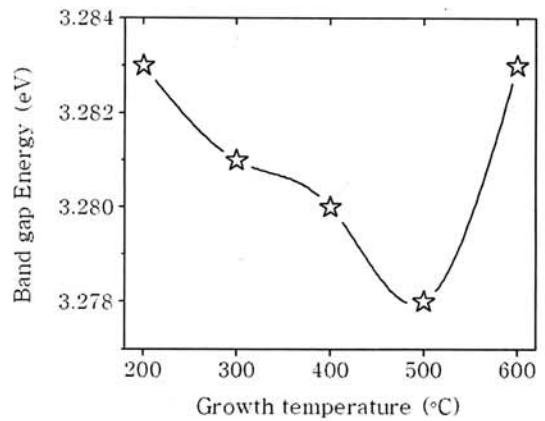


그림 6. 다양한 온도에서 제작된 Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 밴드갭 에너지.

Fig. 6. Band gap energy of Sb doped ZnO thin films (0.1 at.%) at various temperature.

에는 500°C에서 제작된 Sb doped ZnO 박막 (0.1 at.%)의 흡수단으로부터 외삽을 이용하여 밴드갭 에너지 계산 방법을 예를 들어 표현하였다. 모든 박막의 밴드갭 에너지는 그 차이가 거의 없었으며, 그 크기는 0.005 eV이다. 성장 온도가 증가함에 따라 밴드갭 에너지는 3.283 eV에서 3.278 eV로 미약하게 감소하였고, 600°C에서 3.283 eV로 다시 증가하였다. 이러한 밴드갭 에너지의 변화는 운반자 농도에 기인하는 것으로 Burstein - Moss 효과로 알려져 있다[16]. 운반자 농도의 감소는 밴드갭 에너지를 감소시킨다. p형 반도체 특성을 가진 500°C에서 제작된 Sb doped ZnO (0.1 at.%)박막은 가시광선 영역에서 약 90%의 투과율과 3.278 eV의 밴드갭 에너지를 가지고 있었다.

4. 결론

본 실험에서 우리는 PLD를 이용하여 낮은 수준의 Sb를 도핑하여 p형 ZnO 박막 제작을 시도하였다. XRD 분석을 통해 모든 박막은 c-축으로 우선 방위 성장을 하였고, 성장 온도가 증가함에 따라 결정질이 향상되었다. AFM 분석으로 모든 박막의 표면은 매끄러웠고, 그레인 크기는 균일하였다. 온도가 증가함에 따라 표면 거칠기는 증가하였고, 600°C의 성장온도에서 제작한 박막은 충분한 표면 확산에너지 때문에 거칠기가 감소하였다. 전

기적 특성 분석으로 대부분의 박막이 n형 반도체 특성을 보였고, 흥미롭게도 500℃의 성장온도에서 제작한 박막은 p형 반도체 특성을 보였다. 이같은 p형 반도체의 형성 메커니즘은 $Sb_{Zn} - 2V_{Zn}$ complex 때문이라 여겨진다. 분광광도계를 통해 모든 박막은 가시광 영역에서 80% 이상의 투과율을 가지고 있고, 밴드갭 에너지는 모든 박막이 약 3.28 eV로 온도에 따라 크게 달라지지 않았다.

p형 반도체 특성을 지닌 500℃의 성장온도에서 제작한 ZnO 박막은 c 축 우선 방위 성장을 하였고, 12.2 nm의 표면 거칠기, $8.633 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 의 운반자 농도, 1.41 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 의 운반자 이동성, 51.8 $\Omega \cdot \text{cm}$ 의 비저항 값과 그리고 3.278 eV의 밴드갭 에너지를 가지고 있었다. 이것으로 우리는 제작한 p형 반도체 특성을 지닌 ZnO 박막이 비록 전기적 특성이 호의적이진 않지만, Zn 원자를 큰 크기의 Sb 원자가 치환하여 발생한 불일치로 2개의 Zn 공공을 형성시킨다는 메커니즘으로 인해 아주 작은 도핑 수준에서도 p형 반도체 특성을 실현함으로써 Sb가 좋은 억셉터 (acceptor) 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2007년도 동의대학교 교내연구비 (2007AA229) 에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] F. X. Xiu, Z. Yang, L. J. Mandalapu, D. T. Zhao, and J. L. Liu, "High-mobility Sb-doped p-type ZnO by molecular-beam epitaxy", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, p. 152101, 2005.
- [2] F. K. Shan, G. X. Liu, W. J. Lee, K. R. Bae, B. C. Shin, and H. S. Kim, "Structural, electrical, and optical properties of Na-doped ZnO thin films deposited by pulsed laser deposition", *J. Nanosci. Nanotechnol.*, Vol. 8, p. 5203, 2008.
- [3] C. G. Van de Walle, "Hydrogen as a cause of doping in zinc oxide", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 85, p. 1012, 2000.
- [4] W. Z. Xu, Z. Z. Ye, T. Zhou, B. H. Zhao, L. P. Zhu, and J. Y. Huang, "Low-pressure MOCVD growth of p-type ZnO thin films by using NO as the dopant source", *J. Cryst. Growth*, Vol. 265, p. 133, 2004.
- [5] K. K. Kim, H. S. Kim, D. K. Hwang, J. H. Lim, and S. J. Park, "Realization of p-type ZnO thin films via phosphorus doping and thermal activation of the dopant", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, p. 63, 2003.
- [6] D. C. Look, G. M. Renlund, R. H. Burgener, and J. R. Sizelove, "As-doped p-type ZnO produced by an evaporation/sputtering process", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 85, p. 5269, 2004.
- [7] Y. J. Zeng, Z. Z. Ye, W. Z. Xu, D. Y. Li, J. G. Lu, L. P. Zhu, and B. H. Zhao, "Dopant source choice for formation of p-type ZnO: Li acceptor", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, p. 062107, 2006.
- [8] L. Yang, Z. I. Ye, L. Zhu, Y. Zeng, Y. Lu, and B. Zhao, "Fabrication of p-type ZnO thin films via DC reactive magnetron sputtering by using Na as the dopant source", *J. Electron. Mater.*, Vol. 36, p. 498, 2007.
- [9] S. Limpijumnong, S. B. Zhang, S. H. Wei, and C. H. Park, "Doping by large-size-mismatched impurities: The microscopic origin of arsenic or antimony-doped p-type zinc oxide", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 92, p. 155504, 2004.
- [10] F. X. Xiu, Z. Yang, L. J. Mandalapu, D. T. Zhao, and J. L. Liu, "Photoluminescence study of Sb-doped p-type ZnO films by molecular-beam epitaxy", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, p. 252102, 2005.
- [11] H. Benelmadjat, B. Boudine, O. Halimi, and M. Sebais, "Fabrication and characterization of pure and Sn/Sb-doped ZnO thin films deposited by sol-gel method", *Optics & Laser Technology*, Vol. 41, p. 630, 2009.
- [12] P. Wang, N. Chen, Z. Yin, F. Yang, and C. Peng, "Fabrication and properties of Sb-doped ZnO thin films grown by radio frequency (RF) magnetron sputtering", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 290, p. 56, 2006.

- [13] X. Pan, Z. Ye, J. Li, X. Gu, Y. Zeng, H. He, L. Zhu, and Y. Che, "Fabrication of Sb-doped p-type ZnO thin films by pulsed laser deposition", *Applied Surface Science*, Vol. 253, p. 5067, 2007.
- [14] J. A. Thornton, "High rate thick film growth", *Ann. Rev. Mater. Sci.*, Vol. 7, p. 239, 1977.
- [15] F. K. Shan and Y. S. Yu, "Optical properties of pure and Al doped ZnO thin films fabricated with plasma produced by excimer laser", *Thin Solid Films*, Vol. 435, p. 174, 2003.
- [16] E. Burstein, "Anomalous optical absorption limit in InSb", *Phy. Rev.*, Vol. 93, p. 632, 1954.