Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 19, No. 5, p. 461, May 2006.

논 문 19-5-11

기판의 결정구조에 따른 RF 스퍼터링 ZnO 박막의 성장과 미세구조 분석

Growth of ZnO Thin Films Depending on the Substrates by RF Sputtering and Analysis of Their Microstructures

유인성[1,a], 소순진[2], 박춘배[1]
(In-Sung Yoo[1,a], Soon-Jin So[2], and Choon-Bae Park[1])

Abstract

To investigate the ZnO thin films which are interested in the next generation of short wavelength LEDs and Lasers, the ZnO thin films were deposited by RF sputtering system. At sputtering process of ZnO thin films, substrate temperature, work pressure respectively is 100 ℃ and 15 mTorr, and the purity of target is ZnO 5 N. The ZnO thin films were in-situ annealed at 600 ℃ in O_2 atmosphere. The thickness of ZnO thin films has implemented about 1.6 ㎛ at SEM analysis after in-situ annealing process. We have investigated the crystal structure of substrates, and so structural properties of ZnO thin films has estimated by using XRD, FWHM, FE-SEM and AFM. XRD and FE-SEM showed that ZnO thin films grown on substrates had a c-axis preferential orientation in the [0001] crystal direction. XPS spectra showed that ZnO thin film was showed a peak positions corresponding to the O1s and the Zn2p. As form above XPS, we showed that the atom ratio of Zn:O related 1:1.1504 on ZnO thin film, so we could obtained useful information for p-type ZnO thin film.

Key Words : ZnO thin films, RF sputtering, In-situ annealing, Crystal structure

1. 서 론

Ⅱ-Ⅵ족 화합물 반도체인 ZnO는 직접천이형 반도체이며, 육방정계 울자이트(Wurzite) 결정구조를 갖는다[1]. ZnO는 상온에서 3.37 eV의 wide band gap을 가지고 있으며, 현재 단파장 영역의 LED나 LD에 널리 사용되고 있는 GaN와 구조적으로나 광학적으로 비슷한 특성을 가지고 있어, 보다 안정적이고 경제적으로 저렴한 ZnO 기반의 LED 개발에 대한 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다[2-5]. ZnO는 이러한 특성 이외에도 GaN에 비해 여러 가지 장점들이 있는데 이를 정리하면 다음과 같다. ① 매우 낮은 결함 밀도를 갖는 고품질의 ZnO 박막의 합성이 가능하다. ② ZnO 박막 성장에서 격자 부정합 문제를 해결할 수 있는 고품질의 ZnO 기판이 상용화되었다. ③ ZnO의 exciton binding 에너지는 GaN (24 meV)에 비해 약 2.5배가 높은 60 meV로, ZnO 광소자가 실현될 경우 고효율의 광소자를 기대할 수 있다. ④ Zn-O 결합력이 Ga-N 결합에 비해 크기 때문에, 융점이 약 2000 ℃가 되며 이로 인한 기계적, 열적 저항력이 높아 소자로서의 신뢰성을 높일 수 있다[6,7].

ZnO는 일반적으로 침입형 Zn 이온(Zn_i^{2+})이나 산소 공공 이온(Vo^{2+}) 등과 같은 부정비화합물에 의한 도너 이온이 존재하여 n형 전도특성을 보인다. ZnO계 LED와 LD의 개발에 있어서 가장 중요한 연구 과제는 스트레스가 적고 화학 양론비가 우수한 p형 ZnO 박막의 제작이다. ZnO 박막의 제

1. 원광대학교 전기전자 및 정보공학부
(전북 익산시 신용동 344-2)
2. (주)나리지*온 옵토디바이스사업부
a. Corresponding Author : yooinsung@naver.com
접수일자 : 2006. 3. 8
1차 심사 : 2006. 3. 24
심사완료 : 2006. 4. 6

작과 p형 ZnO 박막의 제작에 관한 연구는 최근 많은 연구 그룹에서 보고되고 있으나, 재현성이나 특성 부분에서 아직 많은 개선이 요구되고 있는 상태이다[4,5,7-11].

본 연구에서는 앞으로 ZnO LED에 적용될 기판의 시험평가를 위하여 현재 R·G·B LED 제조설비에 사용되고 있는 여러 기판들 중 스트레스가 적고 전기적·광학적 특성이 우수한 ZnO 박막의 제조를 위해 기판의 결정구조가 ZnO 박막의 결정구조에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. ZnO 박막의 시편을 제조하기 위해 결정구조가 서로 다른 기판위에, RF 스퍼터링 방법으로 5 N ZnO를 증착하고, 이렇게 증착된 ZnO 박막에 산소이온의 주입과 강한 c축 우선 배향 특성을 주기 위함과 동시에 박막의 스트레스를 줄이기 위하여 in-situ annealing을 실시하였다. 이렇게 결정구조가 서로 다른 기판위에 증착하여 얻은 ZnO 박막 시편의 특성을 비교 분석하였다.

2. 실 험

2.1 실험 방법

본 연구에서 기판의 결정구조에 따른 ZnO 박막의 특성을 비교, 분석에 사용된 in-situ annealing ZnO 박막 시편은 RF 스퍼터링 방법으로 ZnO 5N 타겟을 사용하여 약 1.6 μm 두께로 증착하였다. 증착에 사용된 기판은 n-type GaAs (100), n-type GaP (100), Sapphire (0001), n-type Si (100)을 사용하였다. RF 스퍼터링 증착조건은 초기진공도 8.0×10^{-6} Torr, 작업진공도 15 mTorr 이었고, RF power는 210 W로 하였으며, 분위기는 아르곤과 산소를 각각 32 sccm과 8 sccm으로 혼합 설정하였다. 표 1에 as-grown ZnO 박막 증착조건을 정리하였다. 이렇게 증착된 ZnO 박막은 산소이온의 주입과 강한 c축 우선 배향 특성을 주기 위함과 동시에 박막의 스트레스를 줄이기 위하여 in-situ annealing을 실시하였다. 확산이라는 불순물들의 이동은 에너지에 크게 의존함으로, annealing 온도와 시간은 Zn가 활성화하기 시작하는 430 ℃보다 Zn가 활성화하는데 필요한 600 ℃에서 2시간동안 진행하였으며, annealing 분위기는 O_2를 사용하였다. 온도는 in-situ 상태에서 600 ℃까지 급상승 시켰으며, 열처리 후에는 자연냉각을 실시하였다.

표 1. As-grown ZnO 박막 증착을 위한 RF 스퍼터링 조건.

Table 1. Conditions of RF sputtering to deposit as-grown ZnO thin films.

파라미터	공정 조건
기판	GaAs (100) GaP (100) Sapphire (0001) Si (100)
스퍼터 타겟	ZnO 5N
초기 압력	8×10^{-6} Torr
작업 압력	15 mTorr
RF Power	210 W
Pre-스퍼터링 시간	5 min
증착 시간	3 hr
기판 온도	100 ℃

2.2 특성 분석

기판의 종류에 따른 ZnO 박막 시편의 결정구조 분석은 XRD (X-ray diffraction), FWHM (Full Width at Half Maximum)을 이용하였으며, 기판의 결정구조가 ZnO 박막에 미치는 영향을 거시적으로 확인하기 위하여 FE-SEM (Field-Emission Scanning Electron Microscope)을 이용하여 분석하였다. In-situ annealing후의 기판에 따른 ZnO 박막의 표면 grain size 변화와 RMS roughness 분석은 AFM (Atomic Force Microscope, KBSI: MultiMode + BioScope)으로 수행되었다. 또한 캐리어의 거동 분석을 위한 홀 효과 측정은 van der Pauw 구성의 HL5500PC 시스템을 이용하여 상온에서 측정되었다. O_2분위기의 in-situ annealing 후에 ZnO 박막의 Zn와 O의 정량분석을 위하여 XPS (X-ray Photoelectron Spectrometer, KBSI: ESCALAB 250 XPS spectrometer) 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 RF 스퍼터링 후 600 ℃의 O_2 분위기에서 2시간 동안 in-situ annealing을 실시한 기판의 종류에 따른 ZnO 박막시편의 XRD 패턴을 보여주고 있다. 모든 기판의 ZnO 박막에서 약 34.4°의 우수한 (0002) ZnO 피크를 보여주고 있으며, 기판의 종류에 따라서 XRD 피크의 강도는 큰 차이가 있음을 확인하였다. Sapphire 기판의 경우에

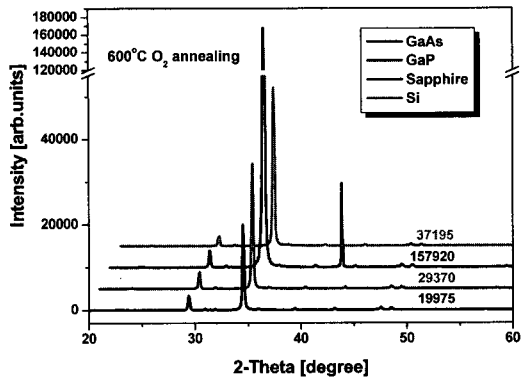


그림 1. ZnO 박막의 XRD 패턴.
Fig. 1. XRD patterns of ZnO films.

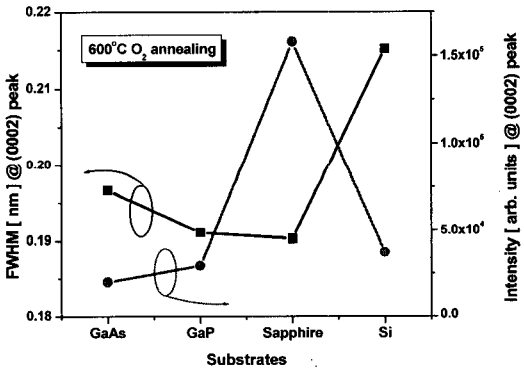


그림 2. ZnO 박막의 (0002) 피크에서 검출된 FWHM 곡선.
Fig. 2. FWHM curve measured at (0002) peak of ZnO films.

는 다른 기판들보다 약 5배 이상 높은 약 150,000 이상의 피크를 나타내었다.

그림 2는 (0002) ZnO 피크에 대한 XRD 분해능을 0.002° 단위로 증가하여 얻은 FWHM이다. 그림 2에서와 같이 Sapphire 기판인 경우에는 모든 기판들 중 FWHM 수치가 가장 낮은 0.1903을 보였다. 본 연구에서 모든 기판의 FWHM 수치는 이전연구에서 보고된 Sapphire 기판의 0.21~0.23보다 낮은 0.19~0.22를 나타내었으며, Sapphire 기판이 아닌 GaAs, Si 기판의 0.29~0.40보다 더욱 낮은 수치를 나타내었다. 본 연구의 증착온도는 이전연구에서 보고된 증착온도보다 낮은 100 ℃의 저온에서 증착함으로써 grain size가 균질하며 결정성이

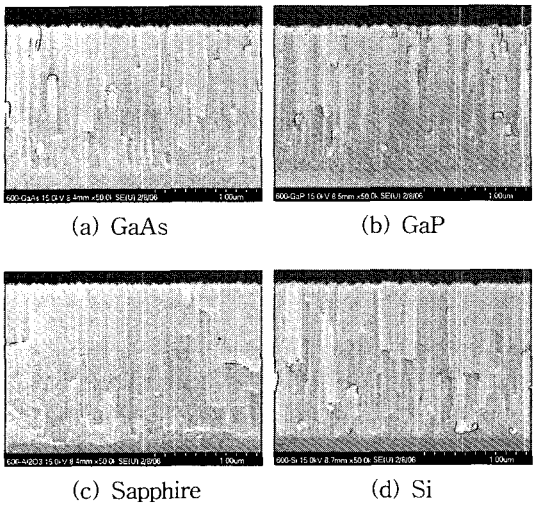
표 2. 기판의 결정구조.
Table 2. Crystal structure of substrates.

Substrates	결정구조	격자상수
ZnO	Wurzite	a=3.250 Å c=5.207 Å
GaAs (100)	Zinc Blende	a=5.653 Å
GaP (100)	Zinc Blende	a=5.4505 Å
Sapphire (0001)	Wurzite	a=4.758 Å c=12.99 Å
Si (100)	Diamond Cubic	a=5.4037 Å

우수한 고품질의 ZnO 박막이 증착된 것으로 사료된다[10-12]. ZnO 박막의 XRD 패턴과 FWHM을 살펴보면 여러 기판들 중 Sapphire 기판의 ZnO 박막이 다른 기판의 ZnO 박막보다 월등히 우수한 특성을 나타내었다.

Sapphire 기판의 ZnO 박막이 월등히 우수한 특성을 나타내는 것은 기판의 결정구조가 ZnO 박막에 영향을 주고 있음을 의미하며, 표 2에 ZnO와 실험에 사용한 기판의 결정구조에 대하여 정리하였다. 표 2에서와 같이 GaAs와 GaP는 Zinc Blende 구조이며, Si은 Diamond Cubic 구조이다. 그러나 Sapphire는 ZnO와 결정구조가 같은 Wruzite 구조이며, 격자상수 a=4.758 Å으로 ZnO의 격자상수 a=3.250 Å과 가장 비슷하였다. 그래서 ZnO 박막을 증착할 때에 다른 기판들보다 mismatch가 가장 적을 뿐만 아니라, 결정구조도 동일하여 초기 결정 생성이 유리하여 우수한 ZnO 박막이 증착된 것으로 사료된다.

그림 3은 600 ℃의 O_2 분위기에서 2시간 동안 in-situ annealing을 실시한 ZnO 박막의 단면을 분석한 FE-SEM 사진이다. Zinc Blende 구조인 GaAs, GaP 기판위에 증착된 ZnO 박막은 증착이 시작되는 기판에서부터 100 nm까지는 결정이 형성되지 못하였으나, 그 이후에는 결정이 형성되기 시작하여 c축 방향으로 우수한 ZnO 박막이 증착됨을 확인하였다. GaAs와 GaP 기판인 경우에는 박막이 증착되면서 차츰 결정의 부피가 커지는 원추형을 나타내었으며, 결정이 c축 방향으로 형성하면서 약간 휘는 경우도 발생하였다. GaP의 ZnO 박막이 GaAs의 박막보다 우수함을 보였는데, 이러한 차이는 ZnO 박막이 형성할 때에 결정의 형성

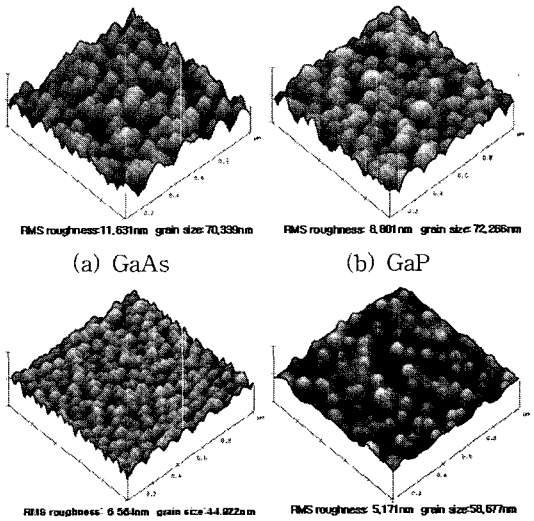


(a) GaAs (b) GaP

(c) Sapphire (d) Si

그림 3. 기판에 따른 ZnO 박막의 결정 분석 (FE-SEM).

Fig. 3. Analysis of crystal structure for ZnO thin films.



(a) GaAs (b) GaP

(c) Sapphire (d) Si

그림 4. ZnO 박막의 AFM 3D 이미지.

Fig. 4. AFM 3D images of ZnO thin films.

이 GaP 기판에서 먼저 형성되기 시작하여 결정성이 조금 더 향상됨을 확인할 수 있었다. GaP의 격자상수 a=5.4505 Å는 GaAs의 a=5.653 Å보다 ZnO의 격자상수 a=3.250 Å에 근접하여 결정형성에 유리한 것으로 판단된다. 이것은 그림 1의 XRD패턴과 그림 2의 FWHM에서 GaP 기판위에 증착시킨 ZnO 박막 특성이 GaAs 기판위에 증착시킨 ZnO 박막 특성보다 조금 더 우수한 것과 잘 일치하였다.

ZnO와 같은 Wruzite 구조인 Sapphire 기판위에 증착된 ZnO 박막은 결정이 형성되기 시작하는 기판에서부터 우수한 ZnO 결정이 형성되었다. Sapphire의 격자상수 a=4.758 Å으로 ZnO 격자상수 a=3.250 Å과 가장 비슷하여 빠른 결정이 형성되었으며, ZnO 박막의 시작부분과 끝부분 모두 결정의 두께가 일정함과 동시에 c축 배향성이 우수한 ZnO 박막이 형성됨을 확인하였다. ZnO 박막의 XRD 패턴과 FWHM에서 여러 기판들 중 Sapphire 기판의 ZnO 박막이 다른 기판의 ZnO 박막보다 월등히 우수한 특성을 나타내는 것과 박막의 단면 FE-SEM 사진에서 Sapphire 기판의 ZnO박막 결정성이 다른 기판의 ZnO 박막보다 월등히 우수한 것과 일치함을 확인하였다.

Diamond Cubic 구조인 Si 기판위에 증착시킨 ZnO 박막의 경우에도 GaAs와 GaP 기판의 경우와 비슷한 결정성이 나타났으며, FWHM에서와 같이 결정의 균일성에서도 좋지 않음을 확인하였다. Si 기판의 경우에는 공기 중에 조금만 노출되어도 얇은 SiO_2막이 형성되며, 실험에 사용된 Si 기판의 경우에도 얇은 SiO_2막이 형성되어 ZnO 박막 형성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다[12].

FE-SEM 사진 분석에서 기판의 결정구조가 ZnO 박막의 결정 형성에 영향을 미치며, ZnO와 동일한 Wruzite 구조이면서 격자상수 a=3.250 Å와 가장 비슷한 Sapphire 기판에서 가장 우수한 ZnO 박막을 증착시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 현재 반도체 공정에 사용되고 있는 기판위에 ZnO 버퍼층을 증착함으로써, ZnO와 결정성이 다른 기판에서도 고품질의 ZnO 박막을 증착시킬 수 있을 것으로 판단된다[13,14].

그림 4는 기판의 결정 구조가 ZnO 박막의 표면의 grain size와 RMS roughness에 미치는 영향을 분석한 AFM 3D 표면 사진이며, 이미지 스케일은 1 μm×1 μm 이다. AFM 3D 표면사진에서 Sapphire기판위에 증착시킨 ZnO 박막의 표면 grain size는 가장 작고 균일하여 grain size는 가장 작은 44.922 nm를 나타내었다. Sapphire 기판에 증착한 ZnO 박막은 시작부분과 끝부분의 균일한 결정형성으로 grain size가 작아졌으며, 이 영향으로 RMS roughness도 6.564 nm로 낮게 나타내었다. GaAs와 GaP 기판위에 증착시킨 ZnO 박막은

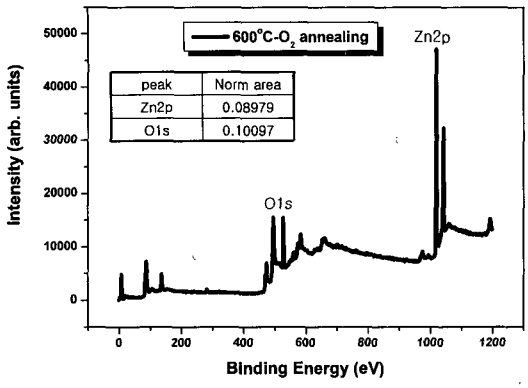


그림 5. ZnO 박막의 XPS 분석.

Fig. 5. Analysis of XPS spectra for ZnO thin films.

FE-SEM에서 확인한 것과 같이 원추형 모양으로 성장하여 grain size가 Sapphire기판 위에 증착시킨 ZnO 박막보다 커진 70.339 nm와 72.266 nm를 나타내었다. GaP의 RMS roughness는 GaP 기판위에 증착시킨 ZnO 박막이 GaAs 기판위에 증착시킨 ZnO 박막보다 우수하여 GaAs의 ZnO 박막의 11.631 nm 더 작은 8.801 nm를 나타내었다. GaAs와 GaP 기판위에 증착시킨 ZnO 박막의 AFM 3D 표면사진에서는 grain이 발견되지 않는 부분도 존재하여 박막의 균질성면에서도 Sapphire 기판위에 증착시킨 ZnO 박막이 우수함을 확인하였다. Si 기판위에 증착시킨 ZnO 박막의 경우에는 완전한 grain 형성이 이루어지지 않아 ZnO 박막 표면의 균질성이 가장 나쁜 특성을 보였으며, 이것은 XRD 패턴과 FWHM에서도 좋지 않은 특성을 보이게 되었다.

ZnO 박막의 케리어의 거동 분석을 위하여 홀 효과 측정을 실시하였다. 그러나 모든 시편에서 ZnO 박막은 표면저항이 너무 높아 홀 효과 측정 영역에서 벗어나 측정되지 않았다. 이러한 현상은 600 ℃의 O_2 분위기에서 2시간 동안 in-situ annealing을 실시하여 침입형 Zn또는 O공공과 annealing중에 주입된 산소와의 결합으로 반절연성 ZnO 박막이 형성된 것으로 판단된다.

모든 기판의 ZnO 박막은 같은 분위기와 조건에서 in-situ annealing을 실시하였으며, 모든 기판들 중에서 Sapphire 기판위에 증착시킨 ZnO 박막의 특성이 가장 우수하였다. In-situ annealing을 실시하여 침입형 Zn와 annealing중에 주입된 산소의 정량비를 분석하기 위하여 ZnO 박막의 특성이 가장 우수한 Sapphire 기판의 ZnO 박막을 XPS 분석하였으며, 그림 5에서 O1s와 Zn2p의 고유한 binding energy 피크를 확인하였다. 일반적인 ZnO 박막은 침입형 Zn 이온(Zn_i^{2+})이나 산소 공공 이온(Vo^{2+})등과 같은 자연적인 도너 이온이 존재하여 Zn 이온이 산소 이온보다 많이 존재하게 된다. 그러나 600 ℃의 O_2 분위기에서 2시간 동안 in-situ annealing을 실시한 ZnO 박막에서는 산소의 주입으로 인하여 비율이 Zn와 O의 비율이 1:1.1504로 나타내었다. 이렇게 막질의 특성이 개선된 고품질의 ZnO 박막은 향후 ampoule-tube를 이용한 P와 As의 확산공정에서 이전 보고한 연구보다 개선된 p-type ZnO 박막의 결과가 기대된다[5,7].

4. 결 론

본 연구에서는 ZnO LED 기판의 적용평가를 위해 기판의 결정구조가 서로 다른 n-type GaAs (100), n-type GaP (100), Sapphire (001), n-type Si (100) 기판위에 RF 스퍼터링 방법으로 5N ZnO를 약 1.6 um 두께로 증착하였다. 이렇게 증착된 ZnO 박막의 산소이온의 주입과 강한 c축 우선 배향 특성을 위함과 동시에 박막의 스트레스를 줄이기 위하여 600 ℃의 O_2분위기에서 in-situ annealing을 2시간 동안 실시하였다. 이렇게 증착된 ZnO 박막의 특성을 분석하였으며, 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 모든 기판의 ZnO 박막에서 34.4° 주 피크를 보여 (0002) ZnO 우선 배향특성을 나타내었으며, Sapphire 기판위에 증착시킨 ZnO 박막의 XRD 피크는 다른 GaAs, GaP, Si 기판들 위에 증착시킨 ZnO 박막의 피크보다 약 5배 이상 높은 약 150,000 이상의 피크를 나타내었다.
2) 모든 기판에서 FWHM은 0.19~0.22의 낮은 수치를 나타내었으며, Sapphire 기판인 경우에는 모든 기판들 중 FWHM 수치가 가장 낮은 0.1903을 보였다.
3) FE-SEM 분석에서 Sapphire는 ZnO와 결정구조가 같은 Wruzite구조이며, 격자상수도 a=4.758 Å으로 ZnO의 격자상수 a=3.250 Å과 가장 비슷하여 결정성이 가장 우수한 ZnO 박막을 증착시킬 수 있음을 확인하였다.
4) AFM-3D 표면사진에서 Sapphire 기판위에 증착시킨 ZnO 박막의 표면 grain size는 가장 작고 균일한 44.922 nm 크기를 나타내었으며, RMS roughness도 6.564 nm로 낮게 나타났다.

5) Sapphire 기판위에 증착시킨 ZnO 박막을 in-situ annealing을 실시한 시편의 XPS 분석에서 O1s와 Zn2p의 고유한 binding energy 피크를 확인하였으며, Zn와 O의 비율이 1:1.1504로 O의 양이 Zn의 양보다 많아졌는데, 이 결과는 향후 ampoule-tube를 이용한 P와 As의 확산공정에서 이전 보고한 연구보다 개선된 p-type ZnO 박막의 결과가 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참고 문헌

[1] S. L. King, J. G. E. Gardeniers, and I. W. Boyd, "Pulsed-laser deposited ZnO for device applications", Appl. Surface. Sci., Vol. 96-98, No. 2, p. 811, 1996.

[2] 김재홍, 이 천, "사파이어 기판 위에 증착된 ZnO 박막의 기판온도와 산소 가스량에 따른 특성", 전기전자재료학회논문지, 18권, 7호, p. 652, 2005.

[3] 배상혁, 윤일구, 서대식, 명재민, 이상렬, "PLD 증착 변수에 따른 II-VI족 화합물 ZnO 반도체 박막의 발광 특성 연구", 전기전자재료학회논문지, 14권, 3호, p. 246, 2001.

[4] W. Xu, Z. Ye, T. Zhou, B. Zhao, L. Zhu, and J. Huang, "Low-pressure MOCVD growth of p-type ZnO thin films by using NO as the dopant source", J. Cryst. Growth, Vol. 265, No. 1, p. 133, 2004.

[5] S.-J. So and C.-B. Park, "Diffusion of phosphorus and arsenic using ampoule-tube method on undoped ZnO thin films and optical properties of P-type ZnO thin films", J. Cryst. Growth, Vol. 285, No. 4, p. 606, 2005.

[6] Y. R. Ryu, W. J. Kim, and H. W. White, "Fabrication of homostructural ZnO p-n junctions", J. Cryst. Growth, Vol. 219, No. 4, p. 419, 2000.

[7] 소순진, 왕민성, 박춘배, "Undoped ZnO 박막에 ampoule-tube 방법을 이용한 P와 As의 확산과 p형 ZnO 박막의 전기적 특성", 전기전자재료학회논문지, 18권, 11호, p. 1043, 2005.

[8] X. L. Guo, H. Tabata, and T. Kawai, "Pulse laser reactive deposition of p-type ZnO film enhanced by an electron cyclotron resonance source", J. Cryst. Growth, Vol. 223, No. 1, p. 135, 2001.

[9] J. Y. Huang, Z. Z. Ye, H. H. Chen, B. H. Zhao, and L. Wang, "Growth of N-doped p-type ZnO films using ammonia as dopant source gas", J. Mater. Sci. Lett., Vol. 22, p. 249, 2003.

[10] J. G. Lu, L. P. Zhu, Z. Z. Ye, F. Zhuge, B. H. Zhao, J. Y. Huang, L. Wang, and J. Yuan, "p-type ZnO films by codoping of nitrogen and aluminum and ZnO-basd p-n homojunctions", J. Cryst. Growth, Vol. 283, No. 3, p. 413, 2005.

[11] J. G. Lu, L. P. Zhu, Z. Z. Ye, Y. J. Zeng, F. Zhuge, B. H. Zhao, and D. W. Ma, "Improved N-Al codoped p-type ZnO thin films by introduction of a homo-buffer layer", J. Cryst. Growth, Vol. 274, No. 3, p. 425, 2005.

[12] M. A. Jung, J. Y. Lee, S. W. Park, H. S Kim, and J. H. Chang, "Investigation of the annealing effects on the structural and optical properties of sputtered ZnO thin films", J. Cryst. Growth, Vol. 283, No. 3, p. 384, 2005.

[13] D.-K. Kim and C.-B. Park, "Photoluminescence studies of GaN films on Si(111) substrate by using an AlN buffer control", J. Kor. Phy. Soc., Vol. 47, No. 6, p. 1006, 2005.

[14] 김덕규, 유인성, 박춘배, "In-situ SiN 박막을 이용하여 성장한 GaN 박막 및 LED 소자 특성 연구", 전기전자재료학회논문지, 18권, 10호, p. 945, 2005.