

Off-axis 고주파 마그네트론 스퍼터링법을 이용한 이종에피텍셜 ZnO 박막 성장

박재완*** · 박종완** · 이진국*[†]

*한국과학기술연구원 박막재료연구센터

**한양대학교 재료공학과

(2003년 2월 19일 접수; 2003년 3월 7일 승인)

Growth of Heteroepitaxial ZnO Thin Film by Off-axis RF Magnetron Sputtering

Jae-Wan Park,^{***} Jong-Wan Park,^{**} and Jeon-Kook Lee^{*[†]}

*Thin Film Materials Research Center, KIST, Seoul 136-791, Korea

**Division of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received February 19, 2003; Accepted March 7, 2003)

초 록

Off-axis 고주파 마그네트론 스퍼터링법으로 사파이어(0001) 기판 위에 이종에피텍셜 ZnO 박막을 제조하였다. ZnO 박막의 결정성은 증착압력, RF power 그리고 기판온도의 공정조건 변화에 많은 영향을 받았으며, 스퍼터링된 입자의 적당한 kinetic energy와 기판표면에서의 표면이동도(surface mobility)가 조화를 이룰 때 결정성이 우수한 이종에피텍셜 박막을 얻을 수 있었다. 이종에피텍셜 ZnO 박막의 Photoluminescence(PL) 특성 측정 결과, 저온(17 K)에서 약 3.36 eV의 자외선 영역 발광을 관찰할 수 있었으며, 상온에서도 3.28 eV의 자외선 영역 발광을 관찰할 수 있었다. ZnO 박막을 산소 분위기에서 열처리함에 따라 결정성은 향상되는 반면 자외선 영역의 발광은 급격히 감소하는 경향을 보였다.

ABSTRACT

The heteroepitaxial ZnO thin film on sapphire (0001) substrate was prepared by an off-axis Radio Frequency(RF) magnetron sputtering. The crystallinity of ZnO thin film was affected by deposition pressure, RF power, and substrate temperature. High quality heteroepitaxial ZnO thin film was obtained when the kinetic energy of sputtered particles is well harmonized with the surface mobility. In the result of Photoluminescence(PL) of heteroepitaxial ZnO thin film, Ultraviolet(UV) emissions at 3.36 and 3.28 eV were observed at low(17 K) and Room Temperature(RT), respectively. As the ZnO thin film was annealed in O₂ ambient, the crystallinity was improved while UV emission was drastically decreased.

Key words : Heteroepitaxial, ZnO, Off-axis, Photoluminescence, Ultraviolet emission

1. 서 론

ZnO는 varistors,¹⁾ transducers,²⁾ 투명전극,³⁾ 센서,⁴⁾ 촉매 등 다양한 분야에서 오랫동안 연구되어 온 다용도 물질로서, $a=3.249 \text{ \AA}$, $c=5.207 \text{ \AA}$ ⁵⁾의 육방정계(hexagonal) wurtzite 구조를 가지고 있으며, 상온에서 3.37 eV의 극대 밴드갭을 가지고 있는 직접천이형 화합물 반도체이다. 또한 상온에서의 엑시톤 결합에너지(exciton binding energy)가 60 meV⁶⁾로 상당히 크기 때문에 상온에서의 excitonic transition이 관찰⁷⁾된다. ZnO는 이러한 우수한 특성으로 인해 청색 발광 소자뿐만 아니라, 다 방면에서 많은 응용 가능성^{8,9)}을 지니고 있는 차세대 광소자 재료로서 주목을 받아왔으며, GaN과 더불어 청자색을 발생시킬 수 있는

또 하나의 물질로써 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 단결정 성장의 어려움 등으로 인하여 지금까지는 주로 형광물질(phosphor)로써 그 응용이 제한되어 오다가, 최근 분자선 에피텍시(Molecular Beam Epitaxy, MBE),⁷⁾ laser ablation deposition, Pulsed Laser Deposition(PLD),¹⁰⁾ Metal Organic Chemical Vapor Deposition(MOCVD) 등의 획기적인 성장방법을 통한 이종에피텍셜 성장에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹¹⁾

본 연구에서는 off-axis 고주파 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 증착압력, RF power, 기판온도 등의 공정조건이 ZnO 박막의 결정성에 미치는 영향을 조사하였으며, Photoluminescence(PL) 측정을 통하여 광학적 특성을 평가하였다.

2. 실험방법

Fig. 1에 나타난 바와 같이 off-axis 고주파 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 사파이어(0001) 기판 위에 ZnO

[†]Corresponding author : Jeon-Kook Lee
E-mail : jkleemc@kist.re.kr
Tel : +82-2-958-5563 Fax : +82-2-958-6851

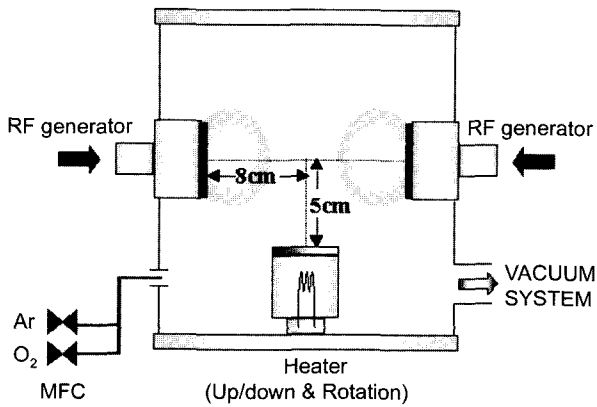


Fig. 1. Schematic diagram of off-axis RF magnetron sputtering system.

Table 1. Sputtering Conditions

Substrate	Sapphire (0001)
Substrate temperature	600~650°C
RF power	80~150 W
Deposition pressure	3.5~30 mTorr
Gas ratio	Ar/O ₂ =35/7
D _{S-T} * (Horizontal/Vertical)	8/5 cm

*D_{S-T} : Distance between substrate and target.

박막을 제조하였다. 기판은 아세톤과 에탄올을 이용하여 초음파 세척기에서 각각 10분간 세척하여 표면의 이물질 및 불순물을 제거하였다. 증착된 ZnO 박막의 uniformity 증대를 위하여 기판을 약 15 rpm으로 회전시켰으며, heating block으로부터의 열전도 향상을 위해 silver paste로 기판 holder에 부착하였다. Table 1은 본 실험에서 적용한 스퍼터링 조건을 나타내고 있다. 결정학적 특성에 미치는 박막의 두께 영향을 배제하기 위해 약 2500 Å의 두께로 동일하게 증착하였으며, 후열처리 온도가 ZnO 박막의 결정성에 미치는 영향을 조사하기 위해 750~950°C에서 30분간 산소 분위기에서 열처리하였다. ZnO 박막의 결정성 및 미세조직은 High Resolution X-Ray Diffraction(HR-XRD) rocking curve와 Field Emission Scanning Electron Microscopy(FESEM)을 통하여 각각 분석하였다. HR-XRD phi-scan을 통하여 박막과 기판과의 방위 관계를 조사하였다. 광원으로 325 nm 파장의 He-Cd 레이저를 사용하여, 저온(17 K)과 상온에서의 PL 특성을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. ZnO 박막의 결정성

스퍼터링법으로 제조된 ZnO 박막은 기판온도, 증착압력, RF power, 타겟과 기판과의 거리 등 증착조건에 따라

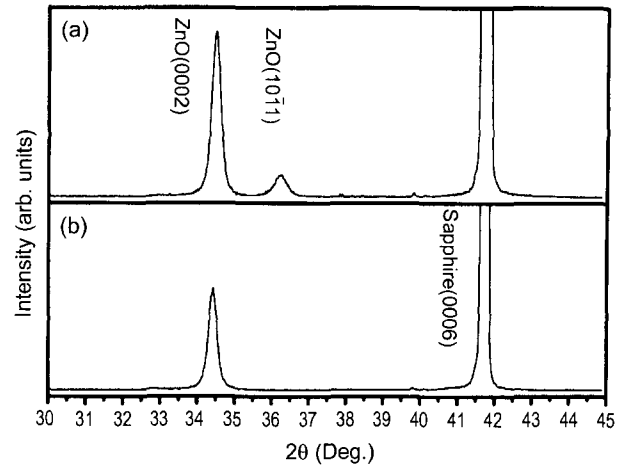


Fig. 2. XRD patterns of ZnO thin films grown at 600°C and 80 W : (a) 15 and (b) 5 mTorr.

에 따라 우선방위(preferred orientation)의 특성이 변한다고 알려져 있으며, 본 결과에서도 증착조건에 따라 c-축 배향성이 영향을 받게 되어 ZnO(0002)면 피크와 동시에 ZnO(10 $\bar{1}$ 1)면 피크가 나타나는 것을 X-Ray Diffraction(XRD) 분석을 통하여 관찰할 수 있었다. Fig. 2는 600°C, 80 W에서 증착한 ZnO 박막의 증착압력에 따른 XRD 패턴의 변화를 나타내고 있다. 증착압력 15 mTorr에서 제조된 박막의 XRD 패턴에서는 Fig. 2(a)처럼 ZnO(0002)면 피크와 함께 ZnO(10 $\bar{1}$ 1)면 피크가 나타나는 반면, 증착압력 5 mTorr에서 제조된 박막의 XRD 패턴에서는 Fig. 2(b)처럼 ZnO(10 $\bar{1}$ 1)면 피크가 사라지고 단지 ZnO(0002)면 피크만 나타나는 것을 볼 수 있다. 본 연구는 사파이어(0001) 기판 위에서 이중에피택셜 ZnO 박막을 성장시키는 것이 목적이므로 이와 같이 ZnO(0002)면 피크만 관찰되는 증착조건을 기본적인 성장조건으로 하여 추가적인 실험 및 분석을 실시하였다.

Fig. 3(a)는 600°C, 5 mTorr의 증착조건 하에서 RF power의 변화에 따른 ZnO 박막의 증착속도 및 ZnO(0002)면에 대한 HRXRD rocking curve의 Full Width at Half Maximum(FWHM) 값의 변화를 나타내고 있다. RF power가 80에서 120 W로 점차 증가함에 따라 박막의 결정성은 향상되어 rocking curve FWHM 값이 1.59에서 0.84°로 감소하다가, RF power가 150 W로 더욱 증가하자 FWHM 값이 1.91°로 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 120 W 미만의 RF power에서는 타겟으로부터 스퍼터링된 ZnO 원자들이 사파이어 기판 위에서 에피택셜 성장을 하기 위한 충분한 kinetic energy를 공급받지 못하기 때문에 좋은 결정성을 보이지 못하는 것이며, 120 W를 초과하는 RF power에서 결정성이 나빠지는 원인은 C. R. Aita *et al.*¹²⁾이 언급한 바와 같이 다음의 세 가지 가능성으로 설명할 수 있다. 첫째는 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 RF power

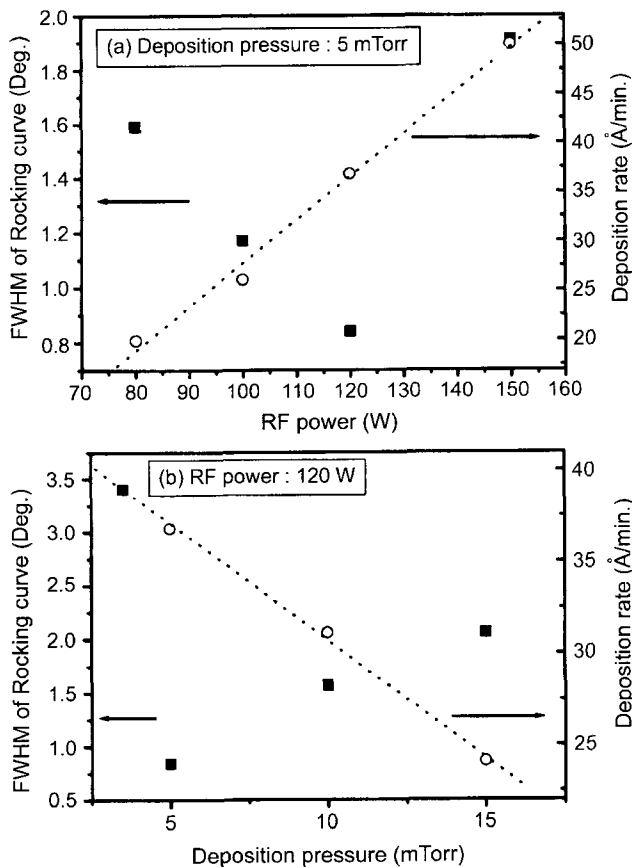


Fig. 3. Effect of (a) RF power and (b) deposition pressure on FWHM of HRXRD rocking curve of ZnO thin films grown at 600°C.

의 증가에 비례하여 증착속도도 직선적으로 증가하기 때문에 기판 표면의 ZnO 원자들이 충분히 확산/재분배되기 전에 새롭게 스퍼터링된 원자들이 그 위에 계속적으로 증착되어 기존 원자들이 에피택셜 성장을 위한 안정한 자리로 찾아가는 것을 방해¹³⁾하는 것이 원인이다. 둘째는 RF power가 증가함에 따라 상대적으로 Zn 이온/ZnO 이온의 비가 증가하게 되는데, Zn 이온들이 기판 표면에서 산소와 결합하여 ZnO를 구성할 경우에는 이미 산화물 형태로 스퍼터링된 ZnO에 비해 결정학적으로 무질서하기 때문이라고 하였다. 그리고 셋째는 RF power가 증가함에 따라 타겟으로부터 방출되는 이차전자(secondary electron)의 에너지가 증가하게 되고, 이차전자와 박막과의 충돌은 박막의 가열을 초래하게 되는데, 이러한 가열은 박막의 두께에 따른 응력구배(stress gradient)를 유도하여 박막의 uniformity를 떨어뜨릴 뿐만 아니라, 화학양론적 산화물(stoichiometric oxide)의 형성을 저하시킨다고 하였다. 그러나 본 실험은 이차전자의 충돌에 의한 가열이 박막의 결정성에 큰 영향을 미칠 만큼 낮은 온도에서 이루어진 공정이 아니므로, 첫 번째와 두 번째의 원인이 더 타당하

리라 사료된다. Fig. 3(b)는 600°C, 120 W의 증착조건 하에서 증착압력의 변화에 따른 ZnO 박막의 증착속도 및 HRXRD rocking curve FWHM 값의 변화를 나타내고 있다. 증착압력이 3.5에서 5 mTorr로 증가함에 따라 rocking curve FWHM 값은 3.41에서 0.84°로 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 증착압력이 10, 15 mTorr로 더욱 증가하자 FWHM 값이 1.57, 2.06°로 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 원인은 Fig. 3(a)의 결과에서 언급한 바와 같이 RF power가 박막의 결정성에 미치는 영향과 유사하게 설명될 수 있다. 즉, 증착압력의 증가에 따라 증착속도가 직선적으로 비례하여 감소되는 것으로 볼 때, 5 mTorr 미만의 증착압력 하에서는 빠른 증착속도로 인해 기판 표면의 기존 원자들이 충분히 확산/재분배되기 전에 다음 원자들이 그 위에 계속적으로 쌓여 에너지적으로 충분히 안정한 자리를 찾아가지 못하기 때문이다. 5 mTorr를 초과하는 증착압력 하에서는 타겟으로부터 스퍼터링된 ZnO 입자들이 기판 표면에 도달하기 전에 챔버 내의 아르곤, 산소 가스들과 충돌을 일으켜 충분한 kinetic energy를 확보하지 못하기 때문¹³⁾인 것으로 사료된다.

Figs. 4와 5는 650°C, 120 W의 조건에서 증착압력의 변화가 ZnO 박막의 결정성과 미세구조에 미치는 영향을 HRXRD rocking curve와 FESEM을 이용하여 각각 분석한 결과이다. Fig. 4에서 보면 증착압력이 5에서 10 mTorr 증가하자 rocking curve의 FWHM 값이 0.42에서 0.38°로 감소함을 보이다가, 증착압력이 20, 30 mTorr로 점차 증가함에 따라 FWHM 값이 0.40, 0.49°로 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 Fig. 3(a)와 비교하여 보면, 증착온도 600°C에서는 일반적인 에피택셜 박막이 보이는 0.5° 이하의 rocking curve의 FWHM 값을 가지는 ZnO 박

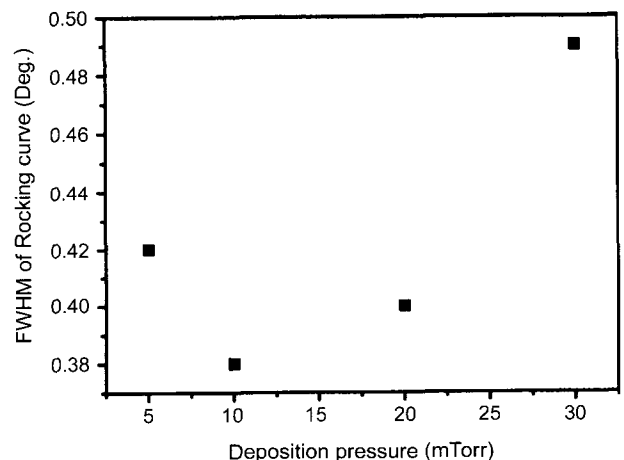


Fig. 4. Effect of deposition pressure on FWHM of HRXRD rocking curve of ZnO thin films grown at 650°C with RF power of 120 W.

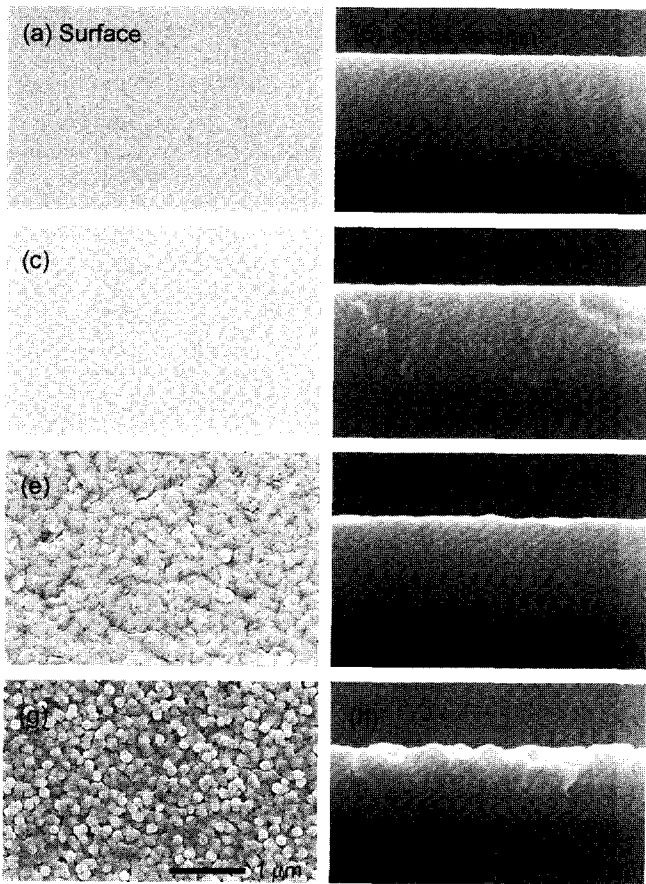


Fig. 5. FE-SEM images of ZnO thin films grown at 650°C and 120 W; (a), (b) 5 mTorr, (c), (d) 10 mTorr, (e), (f) 20 mTorr, and (g), (h) 30 mTorr.

막을 얻을 수 없었지만, 증착온도 650°C에서는 전체적으로 0.5° 이하의 양호한 FWHM 값을 보이는 박막을 얻을 수가 있었다. 즉, 타겟으로부터 스퍼터링된 원자들이 에너지적으로 충분히 안정한 자리로 확산/재분배될 수 있는 적당한 kinetic energy의 공급과 더불어 충분한 기판온도를 통한 표면 이동도(surface mobility)의 확보가 에피텍셀 성장을 위한 중요한 요인¹⁴⁾임을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 FESEM을 통하여 박막의 미세조직을 관찰한 결과이다. 증착압력이 5에서 10 mTorr로 증가함에 따라 미세조직의 큰 변화없이 모두 평탄한 표면을 가지는 것을 알 수 있다. 그러나 증착압력이 20 mTorr로 증가함에 따라 내부에 점차적으로 grain들의 형태가 관찰되기 시작하여 30 mTorr에서는 상당히 거친 표면을 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 증착압력이 증가함에 따라 스퍼터링된 입자들이 챔버 내의 아르곤, 산소 가스들과 충돌을 일으켜 kinetic energy를 많이 잃은 상태에서 기판에 도달하게 되어 기판 표면에서의 충분한 이동도(mobility)를 확보하지 못하기 때문인 것이다. 결과적으로 에너지적으로 충분히 안정한 자리로 이동하지 못한 상태에서 결정화가 진행됨과 동시에

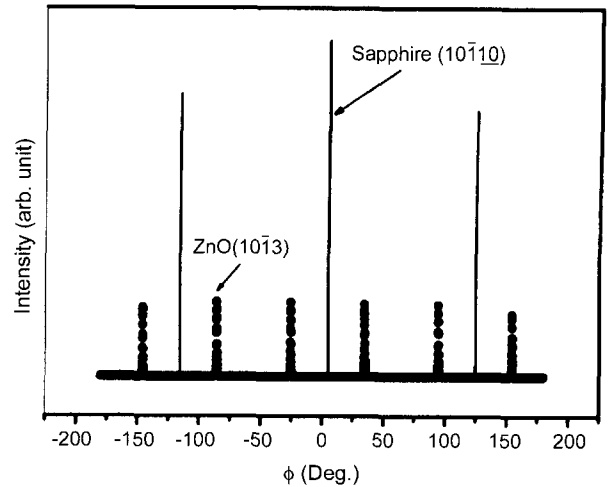


Fig. 6. HRXRD phi-scan pattern of ZnO thin film on sapphire (0001) substrate grown at 650°C with RF power of 120 W and operation pressure of 10 mTorr.

grain들의 성장이 일어났기 때문에 표면 거칠기가 증가한 것으로 사료된다.

Fig. 6은 이중에피텍셀 ZnO 박막이 사파이어(0001) 기판과 어떠한 방위 관계를 가지며 성장하는지를 관찰하기 위해 HRXRD phi-scan을 측정한 결과이다. ZnO에 대한 회절면은 (10 $\bar{1}$ 3)면을 사파이어에 대한 회절면은 (10 $\bar{1}$ 10)면을 각각 선택하였다. 결과를 통해 알 수 있듯이, ZnO 박막은 육방정계(hexagonal) wurtzite 구조에서 볼 수 있는 6 mm 대칭성(6-fold symmetry)을 잘 보이고 있으며, ZnO [10 $\bar{1}$ 0] 방향이 사파이어[10 $\bar{1}$ 0] 방향과 30도의 각도를 이룬 상태에서 수평방향의 방위 관계를 가지며 성장한 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 후열처리 공정

후열처리 온도가 이중에피텍셀 ZnO 박막의 결정성에 미치는 영향을 관찰하기 위해 750, 850, 그리고 950°C, 산소 분위기에서 30분간 각각 열처리한 시편들의 HRXRD rocking curve 측정 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 후열처리 온도가 증가함에 따라 ZnO 박막의 결정성은 점차 향상되어 FWHM 값이 0.38에서 0.35, 0.30, 그리고 0.19°로 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 에피텍셀 성장을 통한 규칙적인 배열을 가지는 원자들로 이루어진 grain들이 후열처리를 실시함에 따라 점차 성장하게 되어 결정성이 향상되는 것이며, 후열처리 온도가 증가함에 따라 grain 성장을 위한 더 많은 thermal energy가 공급되기 때문에 박막의 결정성 향상이 더욱 두드러지는 것으로 사료된다. 특히, 0.19°의 rocking curve FWHM 값은 상당히 좋은 결정성을 의미하는 것으로 스퍼터링법을 통한 고품위의 이중에피텍셀 ZnO 박막의 성장이 가능하다는 것을 보여주는 결과이다.

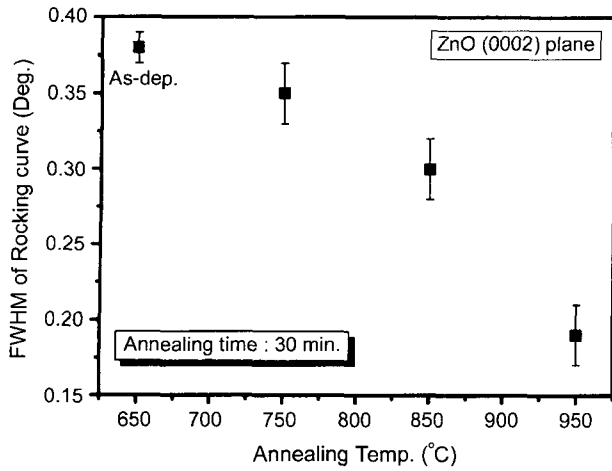


Fig. 7. Effect of post-annealing temperature on FWHM of HRXRD rocking curve of ZnO thin film grown at 650°C with RF power of 120 W and operation power of 10 mTorr.

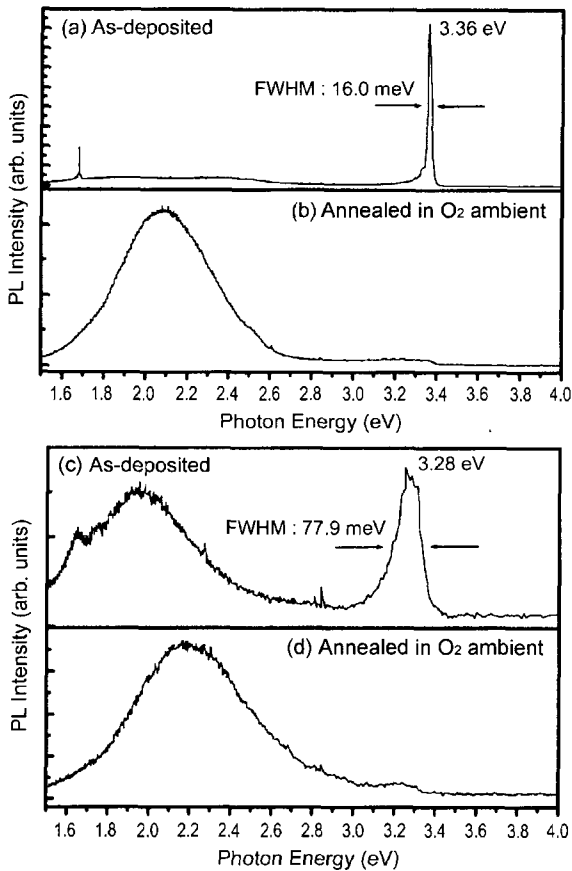


Fig. 8. PL spectra of ZnO thin films measured at (a), (b) 17 K and (c), (d) RT; (a), (c) as-deposited, (b), (d) annealed in O₂ ambient.

3.3. ZnO 박막의 광학적 특성

Fig. 8은 후열처리 분위기가 박막의 광학적 특성에 미

치는 영향을 조사하기 위해 650°C, 120 W, 10 mTorr에서 증착한 ZnO 박막을 950°C, 산소 분위기에서 30분간 열처리한 시편의 PL 측정 결과이다. 저온 PL 측정 결과인 Fig. 8(a), (b)를 보면, as-deposited 박막으로부터는 가시광선 영역의 발광은 거의 관찰되지 않고, 엑시톤의 재결합과 관련 있는 약 3.36 eV의 자외선 영역 발광만이 관찰되고 있다. 그러나 열처리 후에는 자외선 영역의 발광이 거의 사라지고 약 2.1 eV의 가시광선 영역 발광만이 강하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 상온 PL 측정 결과인 Fig. 8(c), (d)에서도 열처리를 실시하기 전에는 3.28 eV에서의 자외선 영역 발광이 관찰되다가 열처리 후에는 자외선 영역의 발광이 급격히 감소하고 상대적으로 가시광선 영역의 발광이 더욱 증가하는 것을 볼 수 있다. 일반적인 ZnO 박막의 발광 특성은 ZnO 엑시톤 구조와 관련 있는 자외선 영역의 발광¹⁵⁾과 oxygen vacancy, zinc vacancy, 그리고 interstitial zinc¹⁶⁾ 등과 같은 결정 내 결함과 관련 있는 가시광선 영역의 발광으로 구분할 수 있다. 그리고 후열처리 분위기가 박막의 광학적 특성에 미치는 영향에 대해 W. S. Shi *et al.*¹⁷⁾과 B. Lin *et al.*¹⁸⁾은 다음과 같이 보고하였다. ZnO 박막을 산소 분위기에서 열처리할 경우, 자외선 영역의 발광은 감소되는 반면, 가시광선 영역의 발광이 증가하며, H₂/Ar 분위기에서 열처리할 경우에는 자외선 영역의 발광이 증가한다고 하였다. 그리고 Ar 분위기에서 열처리할 경우에는 자외선 영역과 가시광선 영역의 발광이 모두 증가한다고 하였다. 특히 W. S. Shi *et al.*은 산소 분위기에서 열처리할 경우, 자외선 영역의 발광이 감소하고 가시광선 영역의 발광이 상대적으로 증가하는 원인을 다음과 같이 설명하였다. 일반적으로 스퍼터링법에 의해 제조된 ZnO 박막은 비화학양론적 조성을 가지며 과잉의 Zn 원자로 구성¹⁹⁾되어진다. 과잉의 Zn는 열처리 중 산소와 결합하면서 ZnO를 형성하게 되는데, 이때 형성되는 post-formed ZnO는 완전한 육방정계 구조가 아니기 때문에 이러한 결합들이 자외선 영역의 발광을 감소시키고, 상대적으로 결정 내 결함과 관련 있는 가시광선 영역의 발광을 증가시키는 것이라고 하였다. 그리고 이 때 형성된 ZnO가 많은 결함을 함유하고 있다는 것을 열처리 후 XRD rocking curve FWHM 값이 4.047에서 5.947°로 증가하는 것을 통하여 증명하였다. 본 실험에서도 PL 측정 결과에서는 W. S. Shi *et al.*의 결과와 마찬가지로 산소 분위기에서 열처리한 후 자외선 영역의 발광이 감소하고 가시광선 영역의 발광이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 rocking curve FWHM 값을 측정한 결과, 오히려 0.46에서 0.35°로 결정성이 향상되는 것을 관찰할 수 있었는데, 이러한 상반된 결과의 원인은 열처리를 하기 전 박막의 결정성 차이라고 사료된다. W. S. Shi *et al.*의 실험에서는 열처리 전 박막이 다결정(polycrystalline)의 형태로 성장되어 있었기 때문에 열처리 후 생긴 결함과 grain

들의 성장이 결정성을 저하시키는데 기여했다고 볼 수 있지만, 본 실험에서는 열처리 전 박막이 이미 에피택셜 성장을 통한 규칙적인 배열을 하고 있었기 때문에 이러한 결함들이 결정성에는 큰 영향을 미치지 못하고 오히려 열처리를 통한 grain들의 성장이 결정성의 향상에 영향을 주었다고 사료된다.

4. 결 론

Off-axis RF 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 사파이어(0001) 기판 위에 이중에피택셜 ZnO 박막을 제조하였다. ZnO 박막의 결정성은 증착압력, RF power, 그리고 기판온도 등의 공정조건에 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있었으며, 스퍼터링된 원자들의 적당한 kinetic energy와 기판온도가 조화를 이룰 때 기판표면 원자들의 충분한 확산/재분배로 인해 결정성이 우수한 이중에피택셜 박막을 얻을 수 있었다. 후열처리 공정을 통하여 ZnO 박막의 결정성을 향상시킬 수 있었는데, 950°C에서 30분간 열처리한 박막은 FWHM 값이 0.19°인 매우 우수한 결정성을 보였다. ZnO 박막의 PL 측정 결과, 저온에서 결정 내 결함과 관련 있는 가시광선 영역의 발광없이 3.36 eV의 자외선 영역 발광만이 나타나는 것을 관찰할 수 있었으며, 상온에서도 가시광선 영역의 발광과 더불어 3.28 eV의 자외선 영역 발광을 관찰할 수 있었다.

REFERENCES

1. Y.-P. Wang, W.-I. Lee, and T.-Y. Tseng, "Degradation Phenomena of Multilayer ZnO-glass Varistors Studied by Deep Level Transient Spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, **69** [12] 1807-09 (1996).
2. M. Kadota and T. Miura, "Shear Bulk Wave Transducer Made of (11 $\bar{2}$ 0)-plane Epitaxial ZnO Film on R-sapphire," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 1, **41** [5B] 3281-84 (2002).
3. S. Y. Myong, S. J. Baik, C. H. Lee, W. Y. Cho, and K. S. Lim, "Extremely Transparent and Conductive ZnO:Al Thin Films Prepared by Photo-assisted Metalorganic Chemical Vapor Deposition Using AlCl₃(6H₂O) as New Doping Material," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 2, **36** [8B] L1078-81 (1997).
4. Y. Nakagawa, "Elastic-surface-wave Temperature Coefficients of Delay Line with ZnO Thin Film," *Appl. Phys. Lett.*, **31** [2] 56-7 (1977).
5. D. R. Lide, *Handbook of Chemistry and Physics*, 74th ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 1993.
6. R. Bhargava, *Properties of Wide Bandgap II-VI Semiconductors*, pp. 137, The Institute of Electrical Engineers, London, 1997.
7. D. M. Bagnall, Y. F. Chen, Z. Zhu, T. Yao, S. Koyama, M. Y. Shen, and T. Goto, "Optically Pumped Lasing of ZnO at Room Temperature," *Appl. Phys. Lett.*, **70** [17] 2230-32 (1997).
8. P. K. Song, Y. J. Kwon, J. M. Cha, B. C. Lee, B. K. Ryu, and K. H. Kim, "The Effect of Residual H₂O Pressure on Gallium-doped ZnO Films Deposited by Magnetron Sputtering," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **39** [10] 928-34 (2002).
9. P. K. Song, B. K. Ryu, and K. H. Kim, "Electrical Properties of Sputtered Gallium-doped Zinc Oxide Films Deposited Using Ne, Ar, or Kr Gas," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **39** [10] 935-42 (2002).
10. J. Narayan, K. Dovidenko, A. K. Sharma, and S. Oktyabrsky, "Defects and Interfaces in Epitaxial ZnO/ α -Al₂O₃ and AlN/ZnO/ α -Al₂O₃ Heterostructures," *J. Appl. Phys.*, **84** [5] 2597-601 (1998).
11. H. J. Lim, K. H. Yoon, and Y.-J. Oh, "Preparation of in Situ Patterned ZnO Thin Films by Microcontact Printing," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **39** [7] 687-92 (2002).
12. C. R. Aita and R. J. Lad, "The Effect of RF Power on Reactively Sputtered Zinc Oxide," *J. Appl. Phys.*, **51** [12] 6405-10 (1980).
13. K.-K. Kim, J.-H. Song, H.-J. Jung, S.-J. Park, J.-H. Song, and J.-Y. Lee, "Photoluminescence and Heteroepitaxy of ZnO on Sapphire Substrate (0001) Grown by RF Magnetron Sputtering," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **18** [6] 2864-68 (2000).
14. Y. J. Kim, Y. T. Kim, H. K. Yang, J. C. Park, J. I. Han, Y. E. Lee, and H. J. Kim, "Epitaxial Growth of ZnO Thin Films on R-plane Sapphire Substrate by Radio Frequency Magnetron Sputtering," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **15** [3] 1103-07 (1997).
15. S. L. Cho, J. Ma, Y. K. Kim, Y. Sun, G. K. L. Wong, and J. B. Ketterson, "Photoluminescence and Ultraviolet Lasing of Polycrystalline ZnO Thin Films Prepared by the Oxidation of the Metallic Zn," *Appl. Phys. Lett.*, **75** [18] 2761-63 (1999).
16. K. Vanheusden, C. H. Seager, W. L. Warren, D. R. Tallant, and J. A. Voigt, "Correlation between Photoluminescence and Oxygen Vacancies in ZnO Phosphors," *Appl. Phys. Lett.*, **68** [3] 403-05 (1996).
17. W. S. Shi, O. Agyeman, and C. N. Xu, "Enhancement of the Light Emissions from Zinc Oxide Films by Controlling the Post-treatment Ambient," *J. Appl. Phys.*, **91** [9] 5640-44 (2002).
18. B. Lin, Z. Fu, and Y. Jia, "Green Luminescent Center in Undoped Zinc Oxide Films Deposited on Silicon Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **79** [7] 943-45 (2001).
19. H. Q. Ni, Y. F. Lu, and Z. M. Ren, "Ab Initio Pseudopotential Calculations of Electronic Structure of Off-stoichiometric ZnO," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 1, **40** [6A] 4103-08 (2001).