

# 기판 온도의 영향에 따른 펄스레이저 증착법으로 성장된 ZnO 박막의 발광 특성

김영환\* · 김성일

한국과학기술연구원 나노소자연구센터, 서울 136-791

(2009년 7월 17일 받음, 2009년 9월 4일 수정, 2009년 9월 4일 확정)

펄스레이저 증착법으로 박막의 결함 생성을 최소화하여 우수한 발광 특성을 가지는 ZnO 박막 성장에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 기판 온도를 400°C에서 850°C까지 변화시켜 박막을 증착한 후 엑스선 회절법, 원자힘 현미경, photoluminescence (PL) 등을 사용하여 박막의 특성 변화를 분석하였다. 그 결과 ZnO 박막은 기판 온도에 관계없이 (0001) 사파이어 기판에 c-축 배향성을 가지며 성장하였음을 확인하였고 기판온도 600°C에서 가장 조밀한 박막이 형성되면서 박막에 응력이 거의 걸리지 않고 결정성도 우수함을 확인하였다. PL 분석 결과 역시 600°C에서 증착된 ZnO 박막이 UV 발광 피크의 반치폭 및 결함에 의한 가시영역에서의 발광 등을 고려했을 때 가장 뛰어난 특성을 보여주었다. 이와 같은 결과는 ZnO 박막의 발광 특성이 박막의 구조적 특성과 매우 밀접한 관계가 있음을 나타내며 또한 기판 온도가 매우 중요한 역할을 함을 나타낸다. 결론적으로 기판 온도 600°C에서 우수한 UV 발광 특성을 가지면서 결함에 의한 가시영역 발광이 거의 나타나지 않는 ZnO 박막을 성장시킬 수 있었고 이러한 박막은 UV 광소자에 응용될 수 있을 것으로 생각된다.

주제어 : ZnO 박막, 펄스레이저 증착법, 기판 온도, c-축 배향성, Photoluminescence

## I. 서 론

ZnO는 육방정계 울자이트(wurzite) 결정구조를 가지는 II-VI족 반도체로서 상온에서 직접천이의 넓은 밴드갭 (3.36 eV)을 가지고 있으며 또한 엑시톤 결합에너지가 60meV로써 ZnS (20 meV)나 GaN (21 meV) 보다 매우 크기 때문에 상온에서 안정적으로 빛을 낼 수 있는 장점을 가지고 있다 [1]. 그리고 ZnO는 원재료의 가격이 저가일 뿐만 아니라 고에너지 영역에서 광투과율 및 에너지 수집율이 크다. 이러한 특성들로 인해 ZnO는 발광다이오드(light emitting diode: LED) 나 반도체레이저(laser diode: LD)와 같은 단파장 발광소자의 재료로서 각광 받고 있다. 더불어 ZnO는 스핀트로닉스, 압전변환기, 그리고 Mn 또는 Co를 도핑한 자성반도체로 응용되고 있다 [2]. 또한 최근 태양전지에 대한 연구가 활발해 지면서 ZnO는 투명산화물전극으로 응용이 많이 되고 있으며 특히 CIGS 박막 태양전지의 윈도우층으로 많이 활용되고 있다 [3].

ZnO는 응용분야에 따라 여러 가지 형태 즉, 나노점, 나노선, 나노벨트, 나노로드 및 박막 등의 형태로 제조되고

있다 [4-7]. 특히 ZnO 박막에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. ZnO박막 제조에는 여러 가지 방법이 사용되고 있으며 대표적인 방법으로는 스퍼터링 [8], 펄스레이저 증착법(pulsed laser deposition: PLD) [9], 분자빔 에피택시 (molecular beam epitaxy: MBE) [10], 및 유기금속화학 증착법(metalorganic chemical vapor deposition: MOCVD) [11] 등이 있다. 그 중 PLD법은 장치가 간단하고, 증착공정이 용이하며, 증착하고자 하는 박막의 조성을 제어하기 쉽기 때문에 널리 사용되고 있다. 뿐만 아니라 강한 에너지를 사용하기 때문에 증착속도가 빠르고, 높은 산소 압력에서 박막 증착이 가능하기 때문에 산화물 반도체인 ZnO 박막의 제조에 적합하다.

ZnO 박막을 UV 발광소자로 응용하기 위해서는 우수한 광 특성을 가지는 n형 및 p형 ZnO 박막을 필요로 한다. 특히, ZnO 박막에서 많이 관찰되는 여러 가지 결함에 의한 가시 영역에서의 발광을 최소화하는 것이 매우 중요한 요소이다. ZnO 박막은 일반적으로 박막 성장 시 여러 가지 결함들이 많이 생성되는 것으로 알려져 있다. 이러한 결함으로 인해 가시 영역 발광이 나타날 뿐만 아니라 이러한 결

\* [전자우편] youngkim@kist.re.kr

합들이 n형의 첨가물로 작용하여 ZnO 박막은 n형 반도체 특성을 지니게 된다. 따라서 n형 ZnO 박막의 성장은 용이한 것으로 알려져 있으나 p형 박막 성장에는 치명적인 약점으로 작용한다. 즉, 결함이 생성되는 성장 조건하에서 p형을 위한 도핑을 할 경우 서로 상쇄되는 효과가 발생하므로 p형 ZnO 박막을 제조하기가 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 그러므로 p형 ZnO 박막을 성장시키기 위해서는 n형을 유발시키는 여러 가지 결함 생성을 최소화할 수 있는 성장 조건이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 PLD법을 사용하여 결함 생성을 최소화할 수 있는 박막 성장 조건에 대해 연구하고자 하였으며 이를 위하여 박막의 특성에 영향을 주는 여러 가지 증착 변수 중에서 기판 온도에 따른 ZnO 박막의 특성 변화를 고찰하였다.

## II. 실험방법

ZnO 박막을 펄스레이저 증착법을 사용하여 사파이어(0001) 기판에 in-situ로 증착하였다. 본 실험에서는 주로 박막 증착 온도에 따른 ZnO 박막의 특성 변화를 고찰하기 위하여 기판 온도를 400 °C부터 850 °C까지 변화시켰다. 그 외 증착 조건은 다음과 같다. 먼저 레이저로는 248 nm 파장을 가지는 KrF 엑시머레이저를 사용하였고, 타겟은 순도 99.99%인 1 인치 크기의 ZnO 타겟을 사용하였다. 레이저 에너지 밀도는 2 J/cm<sup>2</sup>, 레이저 반복율(repetition rate)은 5 Hz, 기판과 타겟 사이의 거리는 5 cm, 그리고 산소압력은 350 mTorr로 고정하였다. 박막을 증착하기 위하여 먼저 진공챔버를 1×10<sup>-6</sup> Torr 이하까지 진공을 만든 후 산소를 사용하여 진공챔버 압력을 350 mTorr로 유지하고, 기판 온도를 원하는 온도로 맞춘 후 타겟 표면에 존재할 수 있는 불순물을 제거하기 위하여 약 1 분간 타겟 표면을 pre-ablation 한 후 박막 증착을 시작하였다. 박막 증착은 1시간 동안 하였으며 그 결과 박막의 두께는 동일한 조건에서 Si 기판 위에 성장된 박막의 두께를 볼 때 약 400~600 nm인 것으로 추정된다.

박막 증착 후 박막의 결정 구조를 엑스선 회절법(X-Ray Diffraction, XRD, Cu-Kα선)을 사용하여 분석하였고, 박막의 표면 미세구조를 원자힘 현미경(Atomic Force Microscopy, AFM)을 사용하여 관찰하였다. ZnO 박막의 광학적 특성을 조사하기 위하여 325 nm 파장의 He-Cd 레

이저를 이용하여 상온에서 photoluminescence (PL)를 측정하였다.

## III. 실험결과 및 고찰

기판 온도에 따른 ZnO 박막의 결정 구조를 알아보기 위하여 XRD 분석을 행하였고 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 기판 온도에 관계없이 ZnO(000 $l$ ) 피크만 관찰되었다. 이는 모든 ZnO 박막이 사파이어(0001) 기판 위에 c-축 배향성을 가지며 성장했음을 의미한다. ZnO 박막의 결정 구조를 좀 더 자세히 알아보기 위하여 ZnO(0004) 피크를 자세하게 분석해 본 결과 Fig. 2에 삽입된 그림에 나타낸 바와 같이 피크의 위치가 기판 온도가 높아짐에 따라 작은 2θ쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 이것은 ZnO(0004)면의 격자상수가 점점 커짐을 의미한다. 벌크 ZnO(0004)면의 격자 상수는 1.3017 Å이다 [12]. 이를 기준으로 볼 때 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 기판 온도가 500 °C 이하에서는 벌크 값보다 작은 격자상수를 가졌으며, 600 °C 이상인 경우에는 벌크 값보다 큰 격자상수를 가졌으나 기판온도가 600 °C인 경우 거의 벌크 값과 유사함을 확인하였다. 박막의 기판에 수직 방향으로의 응력 변형은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다 [13]:

$$e^{\perp} = ((c - c_{bulk}) / c_{bulk})$$

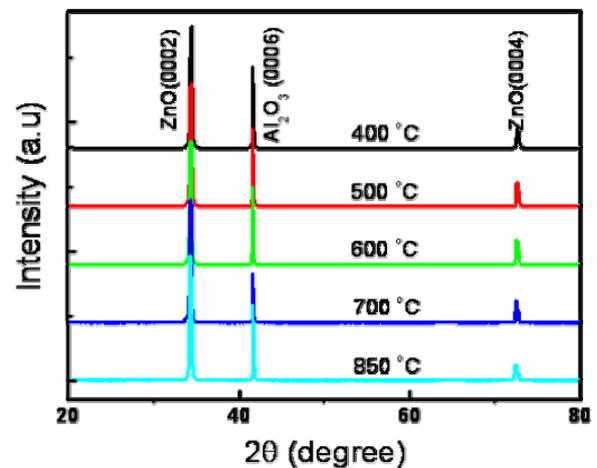


Figure 1. XRD patterns of ZnO thin films deposited on sapphire (0001) substrates by PLD depending on the substrate temperature.

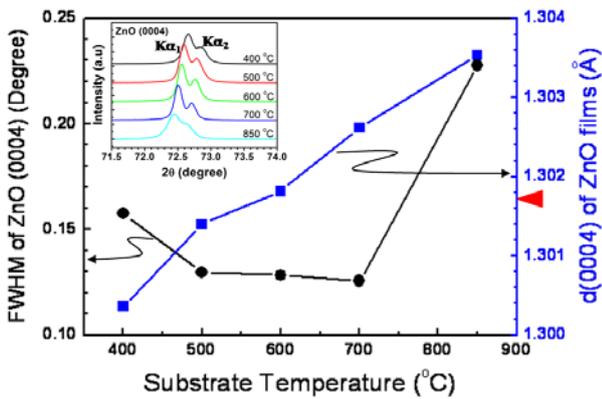


Figure 2. Variation of full width half maximum and lattice constant of ZnO (0004) peak depending on the substrate temperature. The inset shows shift of ZnO (0004) peak toward lower 2θ angle with increasing the substrate temperature. The red ◀ in the right Y-axis denotes the lattice constant of bulk ZnO (0004).

여기서  $c_{\text{bulk}}$ 는 벌크 ZnO의 격자상수이다. 따라서 Fig. 2에 나타난 결과를 볼 때 ZnO 박막의 응력 변형 상태가 기판 온도에 따라 변화함을 알 수 있다. 즉, 500°C 이하에서는 박막에 기판과 평행한 방향으로 인장 응력(tensile stress)이 걸리고, 600°C 이상에서는 압축 응력(compressive stress)이 걸려있음을 알 수 있다. 또한 응력 변형의 크기는 기판 온도가 낮아지거나 높아질수록 증가함을 알 수 있다. 그러나 600°C에서 증착된 ZnO 박막의 경우 거의 벌크 값과 유사한 격자 상수를 가지는데 이는 박막에 응력 변형이 거의 존재하지 않음을 의미한다. 이러한 결과는 기판 온도에 따라 열에너지에 의한 기판 표면에서의 흡착원자의 확산 속도와 같은 kinetic factor가 다르기 때문에 ZnO 박막이 사파이어 기판 위에 여러 가지 다른 도메인을 가지면서 성장되고 그에 따라 박막과 기판과의 격자상수 불일치 정도가 변화하기 때문인 것으로 사료된다 [2].

기판 온도에 따른 ZnO 박막의 결정성을 알아보기 위하여 ZnO(0004) 피크의 반치폭을 조사하였다. 반치폭은 ZnO(0004) 피크를 Gaussian 피팅하여 구하였으며 Fig. 2에 그 결과를 나타내었다. 그 결과 예상한대로 기판 온도가 올라갈 경우 반치폭이 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 기판 온도가 400°C에서 500°C로 증가할 경우 반치폭이 크게 감소한 후 500-700°C 영역에서는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 기판 온도가 850°C로 증가할 경우 반치폭이

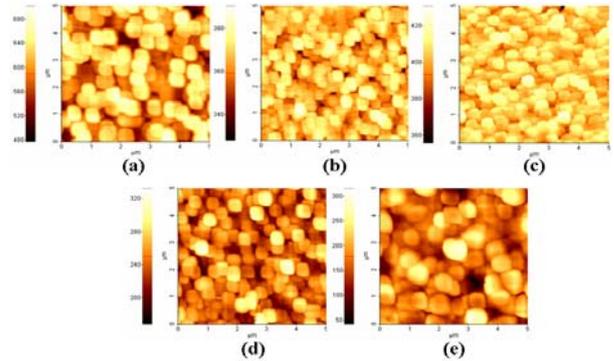


Figure 3. Surface morphologies of ZnO thin films according to the substrate temperature observed by AFM. Surface roughness of the film is shown in the brackets: (a) 400°C [25 nm], (b) 500°C [5.1 nm], (c) 600°C [4.2 nm], (d) 700°C [14.9 nm], and (e) 850°C [19.6 nm].

급격히 증가하였다. 이것은 뒤에 나타낸 PL 결과에서 알 수 있듯이 박막에 결함이 매우 많이 존재하기 때문인 것으로 사료된다.

박막의 표면 미세 형상을 원자힘현미경을 사용하여 관찰하였고 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 ZnO 박막은 기판인 사파이어와의 격자불일치도가 존재하기 때문에 기판온도에 관계없이 island growth 형태로 박막이 성장하였음을 볼 수 있다. XRD 결과를 볼 때 이러한 입자들은 모두 c-축 배향성을 가지며 성장한 것이다. 먼저 박막의 표면 거칠기를  $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$  영역에서 조사한 결과 기판 온도가 증가함에 따라 표면 거칠기 값이 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 박막의 표면 거칠기는 기판온도 600°C에서 가장 낮은 값을 가졌으며 그 값은 4.2 nm이었다. 입자크기(lateral grain size)는 기판온도가 400~700°C 영역에서는 350~450 nm로 큰 차이가 없었으나 기판 온도가 850°C인 경우 약 700 nm로 크게 증가함을 확인하였다. 이상과 같이 박막의 표면 미세 형상을 원자힘현미경으로 살펴본 결과 기판 온도가 600°C인 경우 가장 평편하고 조밀한 박막이 성장되었음을 확인할 수 있었다.

ZnO 박막의 광 특성을 PL을 사용하여 분석하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 ZnO 박막의 PL 스펙트럼을 크게 2가지 영역 즉, ZnO의 밴드 에지 발광인 UV 발광과 ZnO 박막의 결함에 의한 가시 발광 부분으로 나타내었다. 먼저 UV 발광을 살펴보면 기판 온도가 400°C에서 500°C로 높아질 경우 UV 발광 피크의

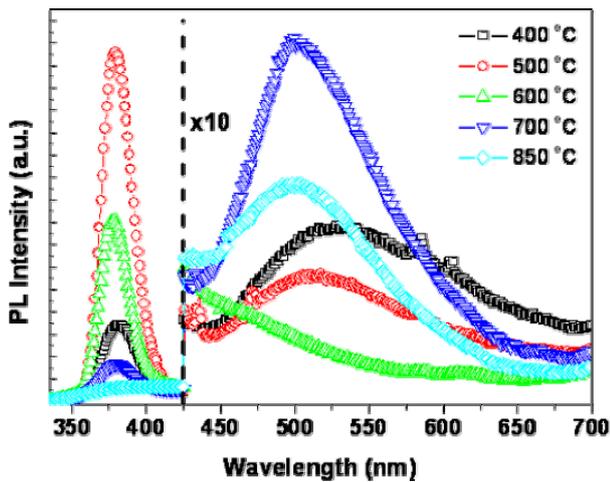


Figure 4. Photoluminescence spectra of ZnO thin films depending on the substrate temperature.

세기가 크게 증가하였다. 그러나 기판 온도가 그 이상으로 올라가면 감소하는 경향을 나타내었다. 기판 온도 600 °C의 경우는 감소폭이 크지 않아 400 °C보다 큰 값을 가졌으나, 기판 온도가 700 °C 이상에서는 UV 발광 특성이 크게 저하되었으며 850 °C인 경우 UV 발광이 거의 나타나지 않았다. 산소 공공 또는 산소 antisite ( $O_{Zn}$ ) [14-16] 등의 결함에 의한 가시 영역에서의 발광을 보면 기판 온도가 400-600 °C인 경우 기판온도가 증가함에 따라 그 세기가 감소하여 600 °C인 경우 거의 나타나지 않았다. 그러나 기판 온도가 700 °C인 경우 그 세기가 급격히 증가함을 볼 수 있고 또한 피크의 위치도 단파장 쪽으로 약간 이동함이 관찰되었다. 기판 온도가 850 °C인 경우에는 가시 영역의 발광 세기가 기판온도가 700 °C인 경우보다 약간 감소함을 관찰할 수 있으나 이 경우 UV 발광이 거의 나타나지 않았다. 이와 같은 결과를 볼 때 850 °C에서 증착된 박막에 많은 결함이 포함된 것으로 생각되며 이로 인하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 ZnO(0004) 피크의 반치폭이 크게 증가한 것으로 사료된다.

Fig. 5는 기판온도에 따른 UV 발광 피크의 반치폭 및 위치를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 UV 발광 피크의 반치폭은 온도가 증가함에 따라 서서히 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 그러나 기판온도가 850 °C인 경우 그 증가폭이 매우 급격함을 볼 수 있다. 반치폭은 기판온도가 600 °C인 경우 가장 작은 값을 나타내었으며 그 값은 약 19 nm이다. 기판 온도에 따른 UV 피크의

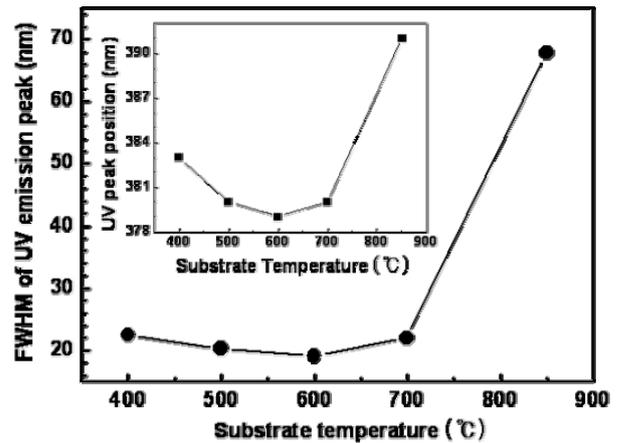


Figure 5. Variation of FWHM of the UV emission peaks of ZnO thin films according to the substrate temperature. The inset shows variation of the UV emission peak position according to the substrate temperature.

위치도 반치폭과 비슷한 경향을 보여준다. 즉, 온도가 증가함에 따라 서서히 감소하다가 다시 증가하는 경향이며 반치폭의 경우와 같이 기판 온도가 850 °C인 경우 장파장 쪽으로 크게 이동함을 볼 수 있다. 이것은 PL 스펙트럼에서 나타난 바와 같이 ZnO 박막에 많은 결함이 존재하기 때문인 것으로 사료된다.

이와 같은 ZnO 박막의 PL 특성을 앞에서 나타낸 박막의 결정 구조 및 표면 미세구조와 비교한 결과 Fig. 2에 나타난 ZnO 박막의 기판 온도에 따른 (0004) 피크의 반치폭의 변화가 UV 발광 특성과 거의 유사한 경향을 나타내었다. 즉, 기판 온도가 증가함에 따라 반치폭이 감소하다가 다시 증가하였고 특히, 850 °C에서 급격히 증가하는 현상을 나타내었다. 또한 박막의 표면 거칠기도 기판온도에 따른 증감현상이 UV 발광 특성과 유사한 경향을 나타내었다. 이러한 결과를 종합해 볼 때 ZnO 박막의 광특성이 박막의 결정 구조 및 미세 구조와 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 즉, 기판 온도 600 °C에서 증착된 ZnO 박막이 우수한 결정성을 가지면서 가장 평편하고 조밀하게 성장하였으며 또한 박막에 응력 변형이 거의 존재하지 않았다. 그 결과가 가장 우수한 PL 특성을 보여준 것으로 판단된다. 또한 이 경우 결함에 의한 가시 영역에서의 발광이 크게 저하되었는데 이로부터 박막 내에 존재하는 결함의 농도가 매우 낮은 것을 알 수 있다. ZnO 박막의 광특성을 평가하는 지표 중의 하나인 가시 영역의 발광에 대한 UV 발광 세기 비율

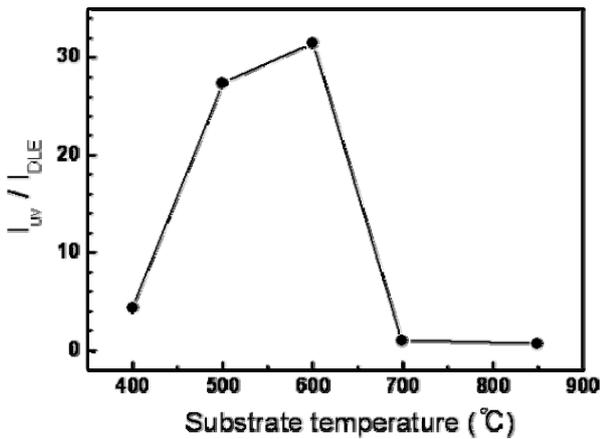


Figure 6. Intensity ratio of UV to DLE peak depending on the substrate temperature.

( $I_{UV}/I_{DLE}$ )을 조사한 결과 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 역시 기판 온도가 600°C인 경우 가장 큰 값을 나타내었다. 결론적으로 기판 온도 600°C에서 증착된 ZnO 박막이 가장 우수한 구조적 특성 및 발광 특성을 나타냄을 확인하였다. 이와 같이 박막의 결함 생성을 억제할 수 있는 박막 증착 조건의 확립은 p형 ZnO 박막 성장의 기반이 되고 이를 바탕으로 ZnO p-n 접합을 이용한 광소자의 제조가 가능할 것으로 기대된다.

#### IV. 결 론

ZnO 박막을 펄스레이저 증착법을 사용하여 사파이어(0001) 기판에 증착하였다. 기판 온도에 따른 박막 특성을 고찰하기 위하여 기판 온도를 400°C에서 850°C까지 변화시켰으며, 증착된 박막의 결정 구조, 표면 미세형상, PL 특성 등을 조사하였다. ZnO 박막은 기판 온도에 상관없이 모두 사파이어(0001) 기판에 c-축 배향성을 가지며 성장되었음을 XRD 분석을 통해 확인하였다. 그러나 박막의 결정성 및 응력 상태는 기판 온도에 영향을 받았고, 기판 온도 600°C의 경우 박막에 거의 응력이 존재하지 않으면서 결정성도 매우 우수함을 확인하였다. 박막의 표면 미세 형상을 AFM으로 살펴본 결과 600°C에서 가장 편평하고 조밀한 박막이 증착되었음을 확인하였다. PL 분석 결과 기판 온도가 높아짐에 따라 UV 발광 피크의 세기는 증가하다가 다시 감소하였고 결함에 의한 녹색 발광 피크의 세기는 감소하

다가 다시 증가하는 것으로 나타났다. UV 발광 피크의 반치폭 및 결함에 의한 녹색 발광 특성을 고려했을 때 기판 온도 600°C에서 증착된 ZnO 박막이 가장 우수한 발광 특성이 나타내었다. 기판 온도가 700°C 이상인 경우 UV 발광 특성은 크게 저하되면서 결함에 의한 녹색 발광이 두드러지게 나타났다. 특히, 850°C의 경우 UV 발광은 거의 나타나지 않았다. 이상의 결과는 ZnO 박막의 구조적 특성이 박막의 발광 특성과 밀접한 관계가 있음을 나타낸다. 결론적으로 본 연구에서는 기판 온도 600°C에서 UV용 광소자에 응용 가능한 ZnO 박막을 (0001)사파이어 기판에 성장시킬 수 있었다.

#### 감사의 글

This work was partly supported by the Korea Institute of Science and Technology under Contract No. 2E21444.

#### 참고문헌

- [1] D. C. Look, Mater. Sci. Eng. B **80**, 383 (2001).
- [2] C. M. Wang, L. V. Saraf, T. L. Hubler, and P. Nachimuthu, J. Mater. Res. **23**, 13 (2008).
- [3] I. Repins, M. A. Contreras, B. Egaas, C. DeHart, J. Scharf, C. L. Perkins, B. To, and R. Noufi, Prog Photovolt: Res. Appl. **16**, 235 (2008).
- [4] Z. Wang, H. Zhang, L. Zhang, J. Yuan, S. Yan, and C. Wang, Nanotechnol. **14**, 11 (2003).
- [5] P. Yang, H. Yan, S. Mao, R. Russo, J. Johnson, R. Saykally, N. Morris, J. Pham, R. He, and H.-J. Choi, Adv. Funct. Mater. **12**, 323 (2002).
- [6] 손영국, 황동현, 조신희, 한국진공학회지 **16**, 267 (2007).
- [7] 김희수, 한국진공학회지 **16**, 205 (2007).
- [8] J. Y. Oh, J. H. Lim, D. K. Hwang, H. S. Kim, R. Navamathavan, K. K. Kim, and S. J. Park, J. Electrochem. Soc. **151**, G623 (2004).
- [9] X. W. Sun and H. S. Kwok, J. Appl. Phys. **86**,

- 408 (1999).
- [10] J. S. Park, S. K. Hong, I. H. Im, J. S. Ha, H. J. Lee, S. H. Park, J. H. Chang, M. W. Cho, and T. Yao, *J. Cryst. Growth* **311**, 2163 (2009).
- [11] C. R. Gorla, N. W. Emanetoglu, S. Liang, W. E. Mayo, Y. Lua, M. Wraback, and H. Shen, *J. Appl. Phys.* **85**, 2595 (1999).
- [12] JCPDS Card #34-1451.
- [13] S. Zhou, M. F. Wu, S. D. Yao, Y. M. Lu, and Y. C. Liu, *Mater. Res. Bull.* **41**, 2198 (2006).
- [14] F. K. Shan, B. C. Shin, S. C. Kim, and Y.S. Yu, *J. Eur. Ceram. Soc.* **24**, 1861 (2004).
- [15] X. H. Li, A. P. Huang, M. K. Zhu, Sh. L. Xu, J. Chen, H. Wang, B. Wang, and H. Yan, *Mater. Lett.* **57**, 4655 (2003).
- [16] B. Lin, Z. Fu, and Y. Jia, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 943 (2001).

## Effect of Substrate Temperature on the Emission Characteristics of ZnO Films Grown by Pulsed Laser Deposition

Y. H. Kim\* and S. I. Kim

*Nano-Devices Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791*

(Received July 17, 2009, Revised September 4, 2009, Accepted September 4, 2009)

We investigated the growth of ZnO thin films with prominent emission characteristics through minimizing the formation of defects by using pulsed laser deposition (PLD). To do so, the ZnO films were deposited on sapphire(0001) substrates at the substrate temperature of 400-850°C and then the variation of their structural and optical properties were analyzed by x-ray diffraction, atomic force microscope and photoluminescence. As a result, all ZnO films were grown with c-axis preferential orientation irrespective of the substrate temperature. However, the crystallinity and stress state were dependent on the substrate temperature and the ZnO film deposited at 600°C showed the best surface morphology and crystallinity with nearly no strain. And also this film exhibited outstanding emission characteristics from the viewpoint of full width half maximum of UV emission peak as well as visible emission due to defects. These results indicate that the emission characteristics of the ZnO films are strongly related to their structural characteristics influenced by substrate temperature. Consequently, ZnO films with strong UV emission and nearly no visible emission, which are applicable to UV emission devices, could be grown at the substrate temperature of 600°C by PLD.

Keywords : ZnO thin film, Pulsed laser deposition, Substrate temperature, C-axis texturing, Photoluminescence

\* [E-mail] [youngkim@kist.re.kr](mailto:youngkim@kist.re.kr)