

## Effects of Post-Annealing Treatment of ZnO Thin Films by Pulsed Laser

金載弘<sup>\*</sup> · 李天<sup>\*</sup>  
(Jae-Hong Kim · Cheon Lee)

**Abstract** - ZnO thin films on (001) sapphire substrates have been deposited by pulsed laser deposition(PLD) technique using an Nd:YAG laser with a wavelength of 266nm. Before post-annealing treatment in the oxygen ambient, the experiment of the deposition of ZnO thin films has been performed for substrate temperatures in the range of 300~450 °C and oxygen gas flow rate of 100~700 sccm. In order to investigate the effect of post-annealing treatment of ZnO thin films, films have been annealed at various temperatures after deposition. After post-annealing treatment in the oxygen ambient, the structural properties of ZnO thin films were characterized by X-ray diffraction(XRD), scanning electron microscopy(SEM) and the optical properties of the ZnO were characterized by photoluminescence(PL).

**Key Words** : Pulsed Laser Deposition(PLD), ZnO, post-annealing treatment

### 1. 서 론

ZnO는 II-VI족 n형 반도체로 GaN와 같은 육방정계 우르차이트(Wurtzite) 결정구조( $a = 3.2495 \text{ \AA}$ ,  $c = 5.2069 \text{ \AA}$ )이며 실온에서 에너지 갭이 대략 3.37 eV이다[1]. 그리고 ZnO는 광대역의 여기자 결합에너지 60 meV를 가지고, 2248 K의 높은 녹는점을 지닌다[2]. ZnO 박막은 압전 트랜스듀서, 광도파로, 가스검출 센서, 발광 다이오드, 레이저 다이오드 등 방대한 응용범위를 가지고 있으며 여러 분야에서 그 응용 가능성이 기대되는 소재이다[3]. ZnO는 sapphire와 GaAs 그리고 Si 등의 기판 위에 증착하는 경우가 일반적이다[4]. GaAs 위에 증착한 ZnO 박막의 경우에는 열팽창계수가 잘 맞지 않으므로, 에피택셜한 박막의 성장이 어렵다[5]. 실리콘은 큐빅 다이아몬드 구조이며, ZnO와 다른 격자상수( $a = 5.4301 \text{ \AA}$ )를 가져 격자결합을 나타낸다[6]. 본 논문에서는 ZnO 박막을 증착하기 위해 사파이어 기판을 사용하였다. ZnO는 육방정계의 구조를 갖고 있어 격자 상수차이에도 불구하고 같은 육방정계의 구조를 가지는 사파이어 기판위에 증착한 연구가 활발히 진행되고 있다[7]. ZnO 박막을 형성하는 방법으로는 펄스 레이저 증착, 화학 증기 증착, MBE, sol-gel 증착, RF 마그네트론 스퍼터링 등의 방법이 있다. 이중 펄스 레이저 증착법은 펄스 루비 레이저가 발명된 후 1965년에 처음으로 보고 되었다[8]. 오늘날 펄스 레이저 증

착법은 낮은 증착온도와 비교적 높은 산소분압에서 물질의 증착이 가능하며, 강한 에너지를 사용하기 때문에 높은 증착속도를 가지고 있다. 그리고 고품질의 배향성 박막형성에 유리한 박막 증착방법이며, 6족 원소의 결핍 문제도 해결될 수 있을 것으로 보고가 있다[9].

본 연구에서는 PLD 증착법을 사용하여 사파이어 기판 위에 증착시킨 ZnO 박막의 후열처리 특성에 관하여 XRD, SEM 그리고 PL을 통하여 구조적, 광학적 특성을 고찰하였다.

### 2. 실험

본 실험에서 사용된 ZnO 박막의 형성방법은 신소재 연구에 각광 받는 펄스 레이저 증착법을 사용하였다. 본 실험에 사용된 챔버의 초기 진공도는 확산펌프를 사용하여  $10^{-6}$  Torr까지 만들 수 있으며, 기판온도를 조절하기 위하여 저항가열히터를 사용하여 기판온도를 제어하였다. 레이저원으로는 1064 nm의 기본파를 갖는 Nd:YAG 레이저의 4고조파( $\lambda = 266\text{nm}$ ) 성분을 사용하여 타겟에 조사하였다. 박막 증착을 위한 타겟으로는 지름 1 inch 순도 99.99 %의 ZnO 타겟을 사용하였고, 기판으로는 0.5 cm × 0.5 cm 크기의 (001) 사파이어 기판을 사용하였다. 타겟과 기판과의 거리는 4 cm 이고, 증착동안에 레이저 펄스가 연속적으로 타겟의 새로운 면에 조사 되도록 하기 위하여 타겟 홀더를 회전하였다. 레이저 밀도는 0.2 J/cm<sup>2</sup> 이었다. 증착 전에 사파이어 기판은 아세톤과 메탄올 순으로 10분 동안 유기물을 제거하기 위해 초음파 세척을 한 후 질소가스로 건조 시켰다. 위와 같은 증착 시스템에서 ZnO 박막 증착시 기판온도는 400°C, 분위기 산소 가스량은 500 sccm 이었다. 본 연구에서는 펄스 레

\* 교신저자, 學生會員 : 仁荷大 電氣工學科 碩士過程

E-mail : kjhong2002@empal.com

\* 正 會 員 : 仁荷大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2004年 10月 22日

最終完了 : 2005年 1月 12日

이제 증착법에 의해 증착 조건에 따라 나타나는 ZnO 박막의 구조적, 광학적 특성을 분석한 후, 기판온도 400℃, 600℃, 800℃에서 후열처리한 박막들을 비교하여, 각각에 대하여 XRD( $\lambda = 0.154056\text{nm}$ ), SEM과 PL을 통하여 구조적, 광학적 특성을 분석하였다. 후열처리 시간은 모두 1시간이었고, 1기압의 산소 분위기압하에서 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 박막의 기판온도 변화에 따른 구조적 특성

그림 1의 XRD 스펙트럼에서 보는 바와 같이 400℃에서 (001) 사파이어 기판위에 증착시킨 ZnO 박막은 ZnO (101), Zn (100),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (004) 다양한 방향성을 갖는 hexagonal wurtzite 구조를 나타내고 있다. 특히 산소결핍과 관계가 있는 (101) ZnO 피크는 (002) ZnO 피크 근처에서 나타났으며, 이는 성장된 박막이 많은 산소결핍을 가지고 있음을 암시한다[10]. 기판온도 400℃ 이하에서 성장한 ZnO 박막에서는 가시적인  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (004) 피크를 관찰할 수 없었는데, 이는 400℃에서 성장시킨 ZnO 박막이 다른 박막들에 비해서 더욱

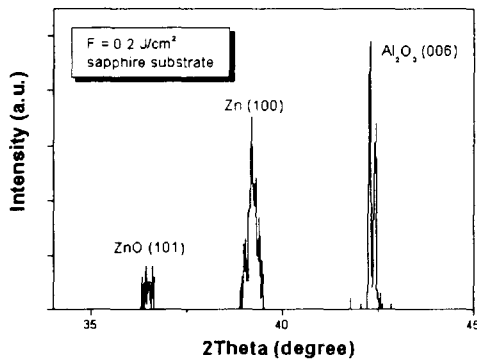


그림 1. 기판온도 400℃에서 증착한 ZnO 박막의 XRD결과.  
Fig. 1. XRD spectra obtained from ZnO films deposited at the substrate temperature of 400℃.

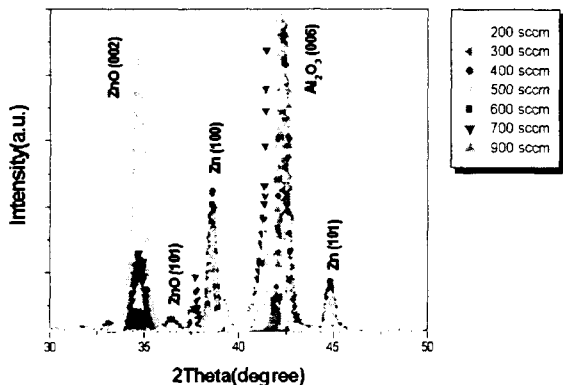


그림 2. 기판온도 400℃에서 사파이어 기판 위에 증착한 ZnO 박막의 산소 가스량에 따른 XRD 결과.  
Fig. 2. XRD spectra as a function of the oxygen gas flow of the ZnO thin films deposited on sapphire substrate at the substrate temperature of 400℃.

조밀하다는 것을 암시한다. 기판온도의 박막성장에 대한 영향은 다음과 같이 요약할 수 있다. 기판온도의 증가는 표면에서 아연분자와 산소분자가 화학양론적 결합하기에 필요한 에너지를 열에너지의 형태로 제공하며, 따라서 형성되는 ZnO 박막의 조성은 고온에서 조성비가 잘 맞게 된다. 본 연구에서 제작된 ZnO 박막은 ZnO와 사파이어 기판과의 격자상수의 차이 때문에 박막과 기판의 계면에 상당한 스트레스를 야기하여 에피택셜 ZnO 박막을 성장시킬 수 없었으나, 적절한 기판온도를 400℃로 제한한다. 이는 기판온도 400℃ 이상 증가 시킬 경우 ZnO 박막의 결정성은 산소와 결합하는 아연의 양이 증가하더라도 녹는점이 693 K인 아연의 양이 많아지게 되므로 감소한다는 보고에 근거한다[10].

#### 3.2 박막의 산소 가스량 변화에 따른 구조적 특성

그림 2는 고정된 기판온도 400℃에서 진공 챔버내의 산소 가스량의 변화에 따른 ZnO 박막의 구조적 특징을 보여주는 XRD 스펙트럼이다. 모든 ZnO 박막은 산소 가스량이 증가함에 따라 산소결핍을 나타내는 ZnO (101) 피크가 감소하였고, Zn (100)와 Zn (101) 피크는 다소 증가하였다. 산소 가스량이 500 sccm 되었을 때, 0.7305의 반가폭의 값을 갖는 (002) ZnO 피크가 나타났고, 산소 가스량 700 sccm에서 증착된 박막의 경우 반가폭의 값은 0.774로 박막의 결정성 감소가 나타났다. 낮은 산소 가스량에서 증착된 ZnO 박막의 경우 산소 가스량이 증가함에 따라 결정성 향상은 레이저 빔에 분위기 산소가스에서 생성되는 산소원자의 양적 증가와 미립자(particulate)의 감소로 박막 내의 산소공공 감소에 기인하며, 높은 산소 가스량에서의 결정성 감소는 지나친 산소 가스량에 의한 기판에서의 아연과 산소 플라즈마의 밀도 감소에 기인한 것으로 사료된다. 위의 XRD 결과로부터 임계 산소 가스량은 500 sccm(working pressure :  $10^{-2}$  Torr) 이고 박막내에 많은 산소 공공 또는 아연 과잉이 존재함을 알 수 있다.

분위기 산소압하에서의 ZnO 박막의 성장은 매우 높은 에

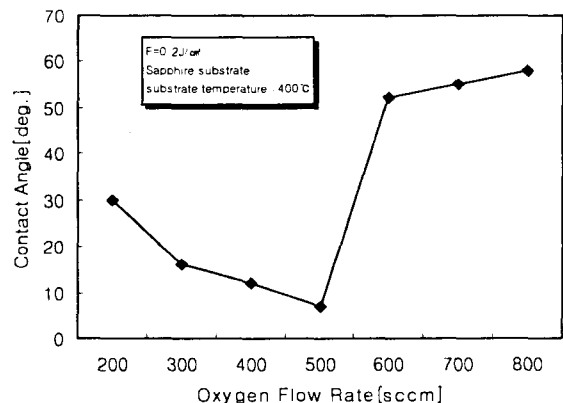


그림 3. 기판온도 400℃에서 산소 가스량 변화에 따른 접촉각(contact angle) 특성.  
Fig. 3. Contact angle as a function of the oxygen gas flow of the ZnO thin film deposited on sapphire substrate at 400℃.

너지를 갖는 산소 플라즈마의 생성이 가능하며, 분위기 산소 가스량 변화에 따라 플라즈마의 밀도를 쉽게 조절할 수 있다. 고정된 기판온도 400 °C에서 진공 챔버내의 분위기 산소압 변화에 따른 각각의 접촉각(contact angle)을 그림 3에 나타내었다. 접촉각은 표면접착(surface adhesion)과 밀접한 관계가 있다. 일반적으로, 접촉각은 표면접착과 반비례 관계에 있다. 그러므로 가장 작은 접촉각을 갖는 ZnO 박막이 사파이어 기판과 가장 큰 접착을 한다. 그림 3로부터 ZnO 박막이 산소 가스량 500 sccm에서 최소의 접촉각을 볼 수 있었다.

**3.3 박막의 후열처리에 따른 구조적 특성**

기판온도 400 °C와 산소 가스량 500 sccm에서 ZnO 박막을 제작한 후 산소 분위기에서 온도 400 °C에서 800 °C 까지 다양한 온도에서 1시간 동안 ZnO 박막들은 후열처리 되었다. 후열처리한 모든 ZnO 박막들은 그림 5의 XRD 스펙트럼에서 관측되는 34.5° 부근의 (002) ZnO 피크를 우점하고 42.6° 부근의 (006) 사파이어 피크가 관찰되는 것으로 보아 모든 박막이 에피택셜 성장하였으나 높은 열에너지로 인한 산소결핍으로 (002) ZnO 피크의 세기가 감소하였다. 400 °C에서 후열처리한 ZnO 박막들은 후열처리하지 않은 ZnO 박막들에 비해 Zn (100) 피크가 감소하였다. 후열처리 온도가 400 °C에서 600 °C로 증가함에 따라 산소결핍과 관련한 ZnO (101) 피크가 나타났으며 ZnO (002) 피크의 반가폭의 값은 0.247이었다. 이는 600 °C에서 후열처리한 ZnO 박막들이 높은 열에너지에 의해 산소결핍이 더욱 증가하였다고 사료된다. 후열처리 온도가 600 °C에서 800 °C로 증가함에 따라 ZnO (002) 피크의 반가폭의 값은 0.316으로 반가폭의 값이 다소 증가하였다. 후열처리 온도가 600 °C에서 800 °C로 증가함에 따라 ZnO 박막의 결정성 감소는 아래와 같은 원인에 의한 것으로 사료된다. 첫째, 그림 6은 Ellipsometer (Model: Plas Mos SD 2302)를 사용하여 후열처리 온도에 따른 ZnO 박막의 두께를 비교하였다. 온도 800 °C에서 반가폭의 값이 상당히 증가 하였는데, 이는 그림 6에서 보는 바와 같이 박막두께의 감소에 기인한 것으로 사료된다. 왜냐하면 사파이어와 ZnO는 모두 육방정계의 구조를 갖고있어 에피택셜한 박막이 형성되지만, 두 종류의 물질은 각각 다른 격자상수를 갖고 있다. 그러므로 사파이어 위에 ZnO가 증착되면 격자상수의 차이만큼 계면에서의 ZnO의 원자 간격이 달라져야 할 것이다. 격자구조에서의 원자 간격의 차이는 결국 박막의 스트레스를 야기한다. 따라서 사파이어 위에 증착되는 ZnO 박막에서 계면부분에 해당하는 부분은 그만큼 격자상수의 차이로 인한 힘을 받게 될 것이고, 격자가 쪼개지거나 grain boundary를 형성할 가능성이 있다. 이러한 과정에 의해 박막의 결정성은 악화될 것이다. 그러므로 박막의 두께가 감소한다면 계면에서의 스트레스가 박막 전체에 미치는 영향이 증가하여 박막의 결정성 감소를 초래하였을 것이다. 둘째, (002) peak의 grain size는 Debye Scherrer 관계식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$L = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta}$$

λ는 X-ray의 파장, β는 FWHM의 값 그리고 θ는 Bragg angle이다. 600 °C와 800 °C에서 후열처리한 ZnO 박막의

grain size의 값은 각각 0.69 nm에서 0.92 nm로 증가하였다. 이는 ZnO 박막 안에서 작은 결정들이 연합하여 더 큰 결정들을 이룬 것으로 사료된다. 본 연구에서 제작된 박막들은 후열처리 온도가 증가함에 따라 grain size가 증가하였으며 원추형의 형태로 성장하였다. 일반적으로 grain size가 증가하면 박막의 결정성은 향상된다. 그러나 앞서 말한바와 같이 박막의 결정성은 박막의 두께가 감소한다면 계면에서의 스트레스가 박막 전체에 미치는 영향이 증가하여 감소하게 된다. 결론적으로, 후열처리 온도 600 °C에서 800 °C로 증가한 경우에 ZnO 박막은 grain size의 증가에 의한 결정성 증가 보다는 박막의 두께 감소에 의한 결정성 감소 영향이 보다 커서 ZnO 박막의 결정성이 다소 감소한 것으로 사료된다. 그림 7은 400 °C에서 (001) 사파이어 기판위에 증착시킨 후 400 °C에서 후열처리한 ZnO 박막이며, 34.6° 근방에 (002) ZnO 피크만을 확대한 그림이다. (002) ZnO 피크를 중심으로 비대칭이며 높은 각 쪽이 더 넓은 면을 가지고 있음을 확인할 수 있는데 이는 c축을 따라 상대적으로 작은 inter-plane spacing이 많이 존재하기 때문이며 이 결과는 ZnO 박막이 tensile strain하에 있음을 나타낸다[11]. 이는 ZnO 박막이 사파이어 기판과의 18%의 격자 부정합 때문에 compressive strain을 받으며 성장한다는 연구결과[12]와는 다른 것이며 Kawasaki와 Ohtomo 등에 의해 제안한 11개의 ZnO 격자와 13개의 사파이어 격자가 매칭되는 tensile strain 모델에 의해 설명될 수 있다[13]. 위의 XRD 결과로부터 400 °C 이상에서 후열처리한 모든 ZnO 박막은 에피택셜하게 성장하였고 tensile strain하에 있음을 알 수 있다. 그림 8은 각각의 온도 변화에 따른 ZnO 박막의 표면을 나타내는 사진이다. Fujimura는 낮은 표면 에너지를 가진 입

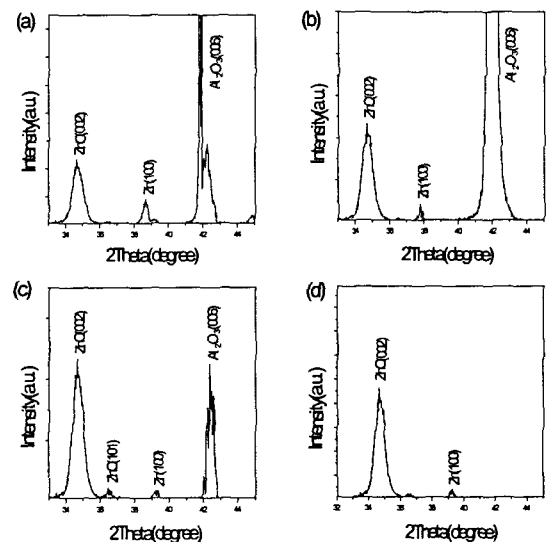


그림 5. 1시간 동안 산소분위기에서 후열처리 온도에 따른 ZnO 박막의 XRD 결과 (a) as-grown (b) 400 °C (c) 600 °C (d) 800 °C

Fig. 5. The XRD pattern of ZnO thin films annealed at different post-annealing temperature in oxygen atmosphere for 1 hour (a) as-grown (b) 400 °C (c) 600 °C (d) 800 °C

자는 박막이 성장함에 따라 더 크게 될 것이며, 박막의 방향은 가장 낮은 표면 에너지를 가진 하나의 결정학적인 방향으로 발전할 것이라고 했다[14]. 특히, 800 °C에서 후열처리한 ZnO 박막의 SEM 사진에서 보여지는 둥근 형태의 섬(island)들은 60 nm에서 80 nm의 폭을 갖고 나노결정 구조임을 알 수 있다.

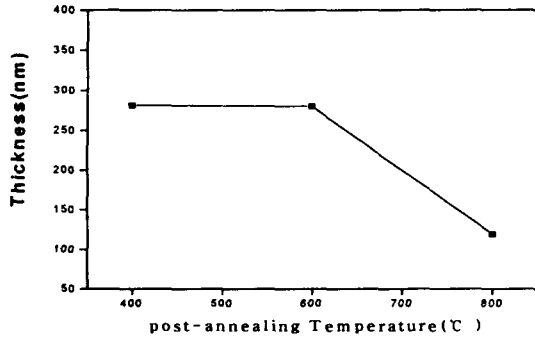


그림 6. 400 °C, 600 °C 그리고 800 °C 에서 후열처리한 ZnO 박막의 두께 비교.

Fig. 6. Thickness of ZnO thin films annealed 400 °C, 600 °C and 800 °C.

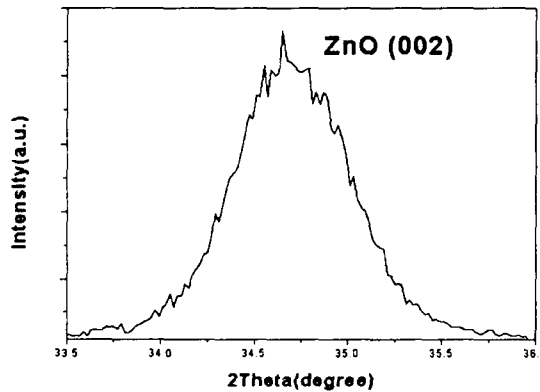
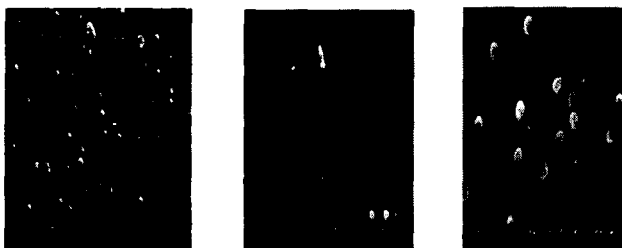


그림 7. 400 °C에서 후열처리한 ZnO 박막의 (002) 방향의 XRD 결과

Fig. 7. (002)  $\omega$ -rocking curves of ZnO thin film annealed 400 °C



(a) (b) (c)

그림 8. (a) 400 °C, (b) 600 °C, (c) 800 °C에서 후열처리한 ZnO 박막의 SEM 사진

그림 8. SEM images of ZnO thin films annealed at (a) 400 °C, (b) 600 °C, (c) 800 °C

### 3.4 박막의 후열처리에 따른 광학적 특성

그림 9 에서의 PL 결과를 보면 후열처리한 모든 ZnO 박막들은 가시적인 자외선 세기가 감소하였고 청색광 발광을 중심으로 400 nm에서 500 nm의 넓은 범위의 발광특성이 관찰되었다. 후열처리 온도가 400 °C 에서 600 °C로 증가할 때, 자외선 발광 세기가 크게 감소하고 녹색과 황색 발광의 세기는 다소 증가하였다. 자외선 발광 세기의 감소와 녹색과 황색 발광 세기의 증가의 이유는 후열처리 온도가 증가함에 따라 큰 격자상수 차이에 의해 고립된 엑시톤(excitons)과 많은 산소공공의 형성으로 인한 비화학양론성(non-stoichiometric) 때문에 자외선 발광 세기가 감소한 것으로 사료된다[15]. 그리고 녹색과 황색의 발광은 산소공공이나 아연 과잉 등의 점 결함 등으로 인해 생기는 것으로 여겨지고 있다. ZnO 박막이 산소분위기에서 열처리가 되면, 산소공공이 형성되기 시작하여 화학양론적인 박막을 형성할 수가 없다. 이는 앞의 XRD 결과와도 일치하는 것이다. 결과적으로 산소공공 밀도의 증가는 자외선 발광 세기를 감소하는 동시에 청색과 황색 발광의 세기를 다소 증가시킨 것으로 사료된다. 후열처리 온도가 600 °C 에서 800 °C로 증가할 때, 430 nm를 중심으로 강한 청색 발광이 나타났다. 현재까지 신뢰할 수 있는 청색 발광에 대한 메커니즘은 없는 상태이다. Sun[16]은 도핑하지 않은 ZnO 박막에 있어서 LMTO(full-potential linear muffin-tin orbital) 방법을 사용하여 산소공공( $V_o$ ), 아연공공( $V_{zn}$ ) 과잉아연( $Zn_i$ ) 그리고 과잉산소( $O_i$ )같은 진성결함(intrinsic defects)의 에너지 준위를 계산하였다. 이 결과모델을 그림 10에 나타내었다. 과잉아연 준위에서 가전자대까지의 에너지는 본 연구에서 나타난 청색발광의 에너지(2.9 eV)와 정확하게 일치한다. 그러나 산소공공( $V_o$ )의 에너지는 1.62 eV로 청색발광과는 관계가 없다. 그러므로 Sun이 제시한 ZnO 박막에서의 결핍 에너지의 계산값과 연구에서 얻은 청색발광의 결과를 근거로 본 연구에서는 430 nm를 중심으로 한 청색발광은 과잉아연의 에너지 준위로부터 가전자대로의 전자이동에 의한 것이라고 사료된다.

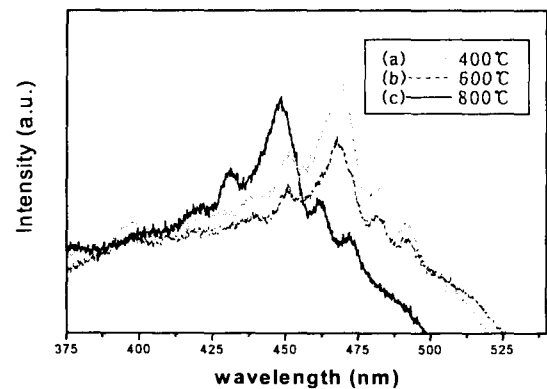


그림 9. (a) 400 °C, (b) 600 °C, (c) 800 °C에서 후열처리한 ZnO 박막의 PL 특성

Fig. 9. PL spectra of ZnO thin films annealed at (a) 400 °C, (b) 600 °C, (c) 800 °C

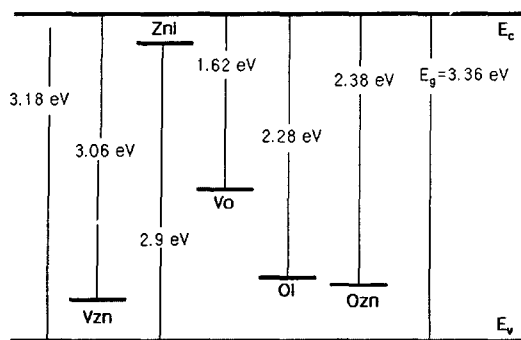


그림 10. ZnO 박막내의 계산된 결함준위에 대한 계약도  
 Fig. 10. The draft of the calculated defect's levels in ZnO films

4. 결 론

PLD 방법으로 사파이어 기판 위에 기판온도 400 ℃와 산소 가스량 500 sccm에서 증착된 ZnO 박막을 후열처리 한 결과 모든 ZnO 박막들은 tensile strain하에 있고 에피택셜 성장하였다. 후열처리 온도가 400 ℃에서 600 ℃로 증가할 때, 자외선 발광 세기가 크게 감소하고 녹색과 황색 발광의 세기는 다소 증가하였다. 이는 산소공공 밀도의 증가가 자외선 발광 세기를 감소하고 청색과 황색 발광의 세기를 증가시켰다고 사료된다. 후열처리 온도가 600 ℃에서 800 ℃로 증가할 때, 430 nm를 중심으로 강한 청색 발광이 나타났는데 이는 Sun모델을 근거로 하여 과잉아연 준위에서 가전자대까지의 에너지가 연구에서 얻어진 청색발광의 에너지 (2.9 eV)와 정확하게 일치하므로 430 nm를 중심으로 한 청색발광은 과잉아연의 에너지 준위로부터 가전자대로의 전자 이동에 의한 것이라고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2003학년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음(INHA-30231-01)

참 고 문 헌

[1] Simon L. King, J.G.E. Gardeniers, "Pulsed-laser deposited ZnO for device applications." Applied surface science, pp. 811-818, 1996.  
 [2] Y.L. Liu, Y.C. Liu, "Structural and optical properties of nanocrystalline ZnO films grown by cathodic electrodeposition on Si substrates." Applied physics B, 2000.

[3] Maria Dinescu, P. Verardi, "ZnO thin film deposition by laser ablation of Zn target in oxygen reactive atmosphere," Applied surface science, pp. 149-153, 1996.  
 [4] Y.R. Ryu, S. Zhu, "Synthesis of p-type ZnO films," Journal of crystal growth, pp. 330-334, 2000.  
 [5] S. Muthukumar, C.R. Gorla, "Control of morphology and orientation of ZnO thin films grown on SiO<sub>2</sub>/ Si substrates," Journal of crystal growth, pp. 197-201, 2001.  
 [6] K. Ogata, S.-W. Kim, "ZnO growth on Si substrates by metalorganic vapor phase epitaxy," Journal of crystal growth, pp. 112-116, 2002.  
 [7] V. Srikant, J. S. Speck, and D. R. Clarke. Mosaic "structure in epitaxial thin films having large lattice mismatch." Journal of Applies Physics. Vol 82, N09, pp. 4286-4295.  
 [8] Zhai. Jiwei, Zhang Liangying, "The dielectric properties and optical propagation loss of c-axis oriented ZnO thin films deposited by sol gel process," Ceramics international, pp. 883-885, 2000.  
 [9] Y.R. Ryu, S. Zhu, "ZnSe and ZnO film growth by pulsed laser deposition," Applied surface science, pp. 127-129, 1998  
 [10] C. Kittel, "Introduction to solid state physics", John Wiley and Son, New York, 7th ed. p. 58, 1996.  
 [11] J. M. Myoung, W. H. Yoon, and D. H. Lee, "Effect of thickness variation on properties of ZnO thin films grown by pulsed laser deposition", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 41, p. 28, 2002.  
 [12] M. Kawasaki, A. Ohtomo, I. Ohkubo, H. Koinuma, Z. K. Tang, P. Yu, G. K. L. Wong, B. P. Ahang, Y. Segawa, "Excitonic ultraviolet laser emission at room temperature from naturally made cavity in ZnO nanocrystal thin film", Materials Science and Engineering B, Vol. 56, p. 239, 1998.  
 [13] Y. M. Sun, Ph. D, thesis, University of Science and Technology of China, July, 2000.  
 [14] N. Fujimura, T. Nishihara, S. Goto, et al., Crystal Growth 130, p. 269, 1993.  
 [15] D.M. Bagnall, Y.F. Chen, Z. Zhu, et al., Appl. Phys. Lett. 73, p. 1038. 1998.  
 [16] J. Arokiaraj, H. S. Djie, T. Mei, "Investigation on the blue-shift phenomena in argon plasma intermixed InGaAs/InGaAsP quantum well structure", Applied surface science, 237, p. 256-260, 2004.

저 자 소 개



**김재홍(金載弘)**

1977년 2월 5일생  
2002년 인하대 전기공학과 졸업  
관심분야: 전자재료및디스플레이  
현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정  
Tel : 032-860-7400  
Fax : 032-863-5822  
E-mail : kjhong2002@empal.com



**이천(李天)**

1960년 6월 11일  
1982년 한양대 전기공학과 졸업  
1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)  
1992년 일본 오사카대 전기공학과 (박사)  
관심분야 : 전자기소자응용 및 MEMS  
Tel : 032-860-7400  
Fax : 032-863-5822  
E-mail : chnlee@inha.ac.kr