

Al 도핑된 ZnO 박막에서 방출되는 보라색 발광 스펙트럼

Violet Photoluminescence Emitted from Al-doped ZnO Thin Films

황동현¹, 손영국¹, 조신호^{2,a}
(Dong-Hyun Hwang¹, Young-Guk Son¹, and Shinho Cho^{2,a})

Abstract

We report on a strong violet luminescence emitted from the ZnO:Al films grown on glass substrate by radio-frequency magnetron sputtering. The growth of high-quality thin films and their optical properties are controlled by adjusting the mixture ratio of Ar and O₂, which is used as the sputtering gas. The crystallinity of the films is improved as the oxygen flow ratio is decreased, as evidenced in both x-ray diffractometer and atomic force microscope measurements. As for the violet luminescence measured by photoluminescence (PL) spectroscopy, the peak energy and intensity of the PL signal are decreased with increasing the oxygen flow ratio. The peak energy of the violet PL spectrum for the thin film with an oxygen flow ratio of 50 % is almost constant, regardless of the increase of laser power and temperature. These results indicate that the violet PL signal is probably due to defects related to interstitial Zn atoms.

Key Words : Al-doped ZnO thin film, Violet luminescence, RF magnetron sputtering

1. 서론

최근에 ZnO는 단파장 발광 다이오드, 광전도 검출기, 레이저 다이오드, 가스 센서, 태양 전지, 압전 소자, 표면 음향파 소자와 같은 다양한 영역에 응용할 수 있기 때문에 상당한 주목을 받고 있다 [1-4]. ZnO는 격자에 고유적 (intrinsic)으로 형성되는 산소 빈자리 (vacancy)와 Zn 격자 틈새 (insterstial) 때문에 상온에서 3.37 eV의 밴드갭 에너지를 갖는 n-형 반도체이다. 특히, ZnO는 GaN에 비해 우수한 전기 및 광학적 특성을 나타내는 장점을 갖고 있다. ZnO의 엑시톤 결합 에너지 (60 meV)는 GaN (25 meV), ZnSe (19 meV), ZnS (39 meV)의 결합 에너지 보다 훨씬 크기 때문에 상온에서 효율적으로 엑시톤을 방출할 수 있으며, 낮은

임계 전압에서 광전 소자를 동작시킬 수 있다[5]. 한편, Al, Ga, In과 같은 III족 원자가 도핑된 ZnO 박막은 전하 운반자 농도와 이동도를 증가시켜 상당히 높은 전기 전도도를 나타내는 것으로 보고되고 있다[6].

ZnO 박막에서 방출되는 발광 스펙트럼에 대한 많은 연구는 대표적으로 두 영역의 발광 스펙트럼이 존재하는 것으로 보고되고 있다: (i) 비교적 세기 (intensity)가 약하고 좁은 선폭과 368-388 nm (3.20-3.37 eV)의 피크를 갖는 자외선 스펙트럼과, (ii) 496-530 nm (2.34-2.5 eV) 근처의 녹색/노란색 파장 영역에 피크를 갖는 상당히 선폭이 넓은 발광 스펙트럼으로 구성된다. 여기서 전자는 엑시톤의 복사선 소멸에 의해 발생되며, 엑시톤의 높은 결합 에너지 때문에 상온에서도 관측된다. 이때, 엑시톤의 수명은 수십 피코초 정도로 짧다. 일반적으로, 방출 스펙트럼의 피크 (peak) 파장은 성장 조건과 증착 방법에 따라 약간씩 이동한다고 보고되고 있다. 이에 반하여, 후자는 Zn 격자 틈새 원자 혹은 산소 빈자리와 같은 고유 결합 (intrinsic defects)이 재결합 센터로 작용하여 발생한다[7,8].

1. 부산대학교 재료공학과
2. 신라대학교 전자재료공학과
(부산시 사상구 괘법동 산 1-1)
a. Corresponding Author : scho@silla.ac.kr
접수일자 : 2007. 2. 20
1차 심사 : 2007. 3. 19
심사완료 : 2007. 3. 23

최근 몇몇 연구자들은 자외선과 녹색/노란색 발광 스펙트럼과는 다른 파장 영역인 400-430 nm의 피크를 갖는 보라색 발광 스펙트럼을 관측하였다. 특히, Zeng 등[9]은 액체 매질에서 레이저 용제(laser ablation) 방법으로 제작한 Zn/ZnO 중심-겹질로 구성된 나노 입자들에서 방출되는 파장 425 nm (2.92 eV)를 갖는 강한 보라색 발광 스펙트럼을 검출하였으며, 발광 스펙트럼의 세기는 겹질의 두께와 열처리 온도의 증가에 따라 감소함을 보고하였다. Jin 등[10]은 사파이어 기판 위에 펄스 레이저 증착법으로 증착한 ZnO 박막 중에서, 1 mTorr의 산소 압력으로 증착한 시편에서만 파장 420 nm (2.95 eV)의 피크를 갖는 보라색 발광 스펙트럼을 관측하였고, 이것은 산소가 부족한 ZnO_x 박막의 결정 낱알 (grain) 경계면에서 방출되는 것으로 제시하였다. Xue 등[11]은 라디오파 (radio frequency: rf) 마그네트론 스퍼터링 방법으로 유리 기판 위에 증착된 ZnO 박막에서 반치폭 40 meV를 갖고, 파장 446 nm (2.78 eV)에 피크 중심을 둔 강한 청색 발광 스펙트럼을 보고하였다.

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링으로 박막 증착시 스퍼터링 가스로 사용되는 아르곤 (Ar)과 산소 (O₂)의 유량비를 변화시키면서 유리 기판의 상부에 알루미늄 (Al)이 도핑된 ZnO (ZnO:Al) 박막을 성장시켰으며, 박막의 구조와 광학적 특성이 산소 공급비를 증가시키에 따라 어떻게 변하는지를 조사하였다. 특히, 종래에 발표된 전형적인 두 발광 스펙트럼과는 달리, 본 실험에서는 파장 419-439 nm에 피크 중심을 두고, 비교적 넓은 밴드폭을 갖는 세기가 강한 보라색 스펙트럼의 방출을 관측하였다. 보라색 스펙트럼은 스퍼터링 가스로 Ar 가스만 주입하였을 때, 388 nm에 중심을 둔 세기가 매우 약한 자외선 스펙트럼과 함께 출현하였으나, Ar에 산소 유량비를 증가시키에 따라 점점 약하여지다가 결국에는 자외선 스펙트럼은 사라져 버렸고, 보라색 스펙트럼만 관측되었다. 이 방출 스펙트럼의 피크 파장은 산소의 유량비를 조절함으로써 제어할 수 있었다. 보라색/청색 영역의 방출 스펙트럼은 ZnO를 기반으로 하는 단파장 광전소자 개발 영역을 확장시키는데 응용할 수 있다.

2. 실험

본 연구에 사용된 ZnO:Al 박막은 RF 마그네트론 스퍼터링 장치를 사용하여 유리 기판 (Corning 7059) 위에 증착되었다. 유리 기판은 시편 고정대

의 크기에 맞게 두께 0.5 mm와 넓이 10 mm x 10 mm의 크기로 절단하여 준비하였고, 그 후 아세톤, 메탄올, 증류수의 순서대로 각각 10분 동안 초음파 세척을 한 다음에, 질소 가스를 분비시켜 습기를 제거하고 챔버에 장입하였다. 스퍼터링 타겟으로는 상업적으로 이용 가능한 직경 2", 두께 0.25"를 갖는 Al₂O₃ (2 wt.%)가 도핑된 ZnO (순도: 99.99 %)를 사용하였으며, 타겟과 기판 사이의 간격은 4 cm로 고정하였다. 증착하기 전, 챔버의 초기 진공도는 터보 펌프를 사용하여 4x10⁻⁶ Torr 이하로 배기하였으며, 공급하는 스퍼터링 가스로는 Ar과 O₂의 혼합 가스를 적절한 비율로 사용하였다. 특히, 혼합 가스 중에서 산소의 유량비, O₂/(Ar+O₂)가 ZnO:Al 박막의 결정성과 PL 신호에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 총 압력을 3.5x10⁻² Torr로 고정한 상태에서 산소의 유량비를 0 %, 10 %, 30 %, 50 %로 변화시켜 ZnO:Al 박막을 각각 성장시켰다. 증착시 기판의 온도는 할로겐 램프를 사용하여 400 °C로 고정하였고, 균일한 박막을 얻기 위하여 모터를 사용하여 시편 고정대를 일정한 속도로 회전시켰다. 타겟 표면의 이물질들을 제거하기 위하여 30분 동안 예비 스퍼터링을 수행한 다음에 본 스퍼터링을 수행하였다.

증착된 박막의 두께는 표면 측정기 (Dektak 3030 Surface Profiler)를 사용하여 측정하였는데, 두께는 약 400 nm이었다. 박막의 결정 구조는 파장 0.154 nm를 갖는 Cu-K_α 복사선을 사용하여 x-선 회절 (x-ray diffraction: XRD) 방법으로 조사하였으며, 박막의 미세 표면 상태는 원자 주사 현미경 (atomic force microscope: AFM)을 사용하여 관찰하였다. 이때, 스캔 면적은 10 μm x 10 μm 이었고, 스캔율은 0.75 Hz로 고정하였다. 증착된 박막의 PL 실험은 파장 325 nm를 갖는 He-Ne 레이저를 사용하여 시편을 여기시켰고, ZnO:Al 시편에서 방출되는 빛은 볼록 렌즈로 집속하고 분광기로 분산시킨 후에, 광전자 증폭관 (Photomultiplier Tube: PMT)으로 검출하였다. 이때, 측정 온도 범위는 폐쇄 순환 헬륨 저온 장치 (closed-cycle helium refrigerator)를 사용하여 시편의 주변 온도를 13 K까지 낮출 수 있었으며, 시편 고정대에 부착된 히터를 사용하여 290 K의 온도까지 제어할 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 산소 유량비 0 %, 10 %, 30 %, 50 %로 성장된 ZnO:Al 박막을 XRD로 측정한 결과를

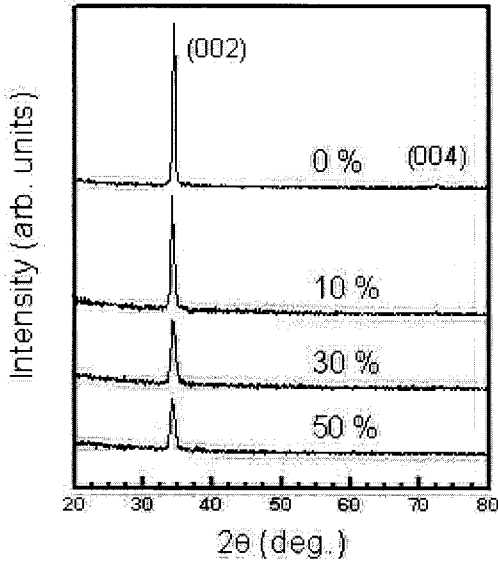


그림 1. 서로 다른 산소 유량비로 증착된 ZnO:Al 박막의 XRD 패턴.

Fig. 1. XRD patterns of ZnO:Al films deposited at different $O_2/(Ar+O_2)$ flow ratios.

나타낸 것이다. 산소 유량비가 0 %, 즉, Ar 가스만을 스퍼터링 가스로 공급하여 성장시킨 시편의 경우에, 34.4°와 72.6°에서 관측된 피크는 각각 ZnO (002)와 (004)면에서 발생된 회절 패턴을 나타낸다. 이것은 ZnO:Al 박막이 기판에 수직인 c-축을 따라 우선적으로 성장되었음을 보여주며, 불순물이 도핑되지 않은 ZnO 박막의 회절 피크와 동일하여 육방 우르짜이트 (hexagonal wurtzite) 구조를 가짐을 알 수 있다. 산소 유량비가 0 %에서 50 %로 증가함에 따라 (002)면 회절 피크의 상대적인 세기는 점차적으로 감소하였다. 이것은 c-축 방향으로 결정 알갱이의 성장이 감소함을 나타내며, AFM과 PL 측정에서 입증되었다. 이 결과는 펄스 레이저 증착법으로 증착할 때, 기판 온도가 증가함에 따라 (002)면 회절 피크의 세기가 감소하는 결과와 유사하였다[12]. 산소 유량비가 50 %일 때, 회절 피크의 세기는 산소 유량비가 0 %인 경우에 비하여 약 5배 작았다. 산소 유량비 0 %인 시편의 경우 회절 피크의 반치폭 크기는 0.33° 이었다.

그림 2는 서로 다른 산소 유량비로 성장된 ZnO:Al 박막을 AFM으로 촬영한 결과를 나타낸 것이다. 순수한 Ar 가스만을 스퍼터링 가스로 사용하여 증착된 ZnO:Al 박막의 경우에, 비교적 균

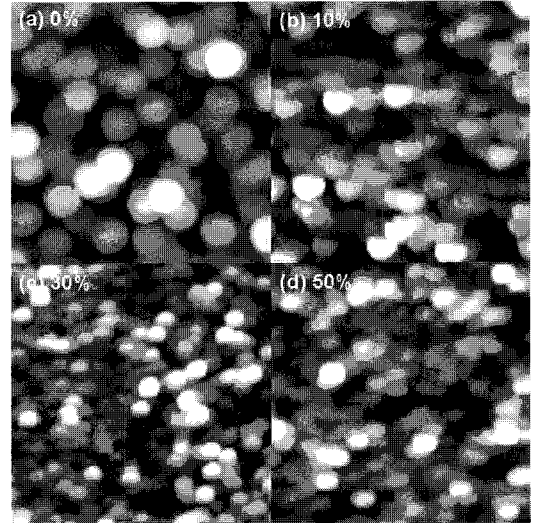


그림 2. 서로 다른 산소 유량비로 증착된 ZnO:Al 박막의 XRD 패턴.

Fig. 2. Surface AFM images of ZnO:Al films with different oxygen flow ratios of (a) 0 %, (b) 10 %, (c) 30 %, and (d) 50 %.

일한 나노 크기의 분포를 갖는 육각형 형태의 결정 nan알들이 유리 기판 위에 성장되어 있음을 관측할 수 있다[그림 2(a) 참조]. 약 40 nm의 직경과 30 nm의 높이를 갖는 결정 nan알들이 균일하게 형성되었다. 그림 2(b)-(d)에서 보듯이, 산소 유량비가 점점 증가함에 따라 형성되는 결정 nan알의 크기와 제곱 평균값 (root mean square: RMS)은 전반적으로 감소하였으며, 결정 nan알의 경계면들이 중복되어 합쳐지는 경향을 보였다. RMS는 박막의 표면 거칠기 정도를 나타내는 척도인데, 산소 유량비가 0 %에서 10 nm이었으며, 산소 유량비가 10 %로 증가함에 따라 RMS 값은 1.9 nm로 상당히 감소하였다. 계속하여 산소 유량비가 증가함에 따라 RMS 값은 조금씩 증가하였는데, 유량비가 50 %에서 2.2 nm이었다. 또한, 산소 유량비가 증가할수록 결정 nan알의 형태는 육각형에서 구형으로 바뀌었다. 서로 다른 산소 유량비로 성장된 ZnO:Al 박막에서 결정 nan알의 크기는 XRD와 AFM의 측정 데이터로부터 구할 수 있다. XRD 측정 데이터를 이용하여 결정 nan알의 크기 d 를 계산하기 위하여 Scherrer의 식[13],

$$d [nm] = c \frac{\lambda}{B \cos \theta} \quad (1)$$

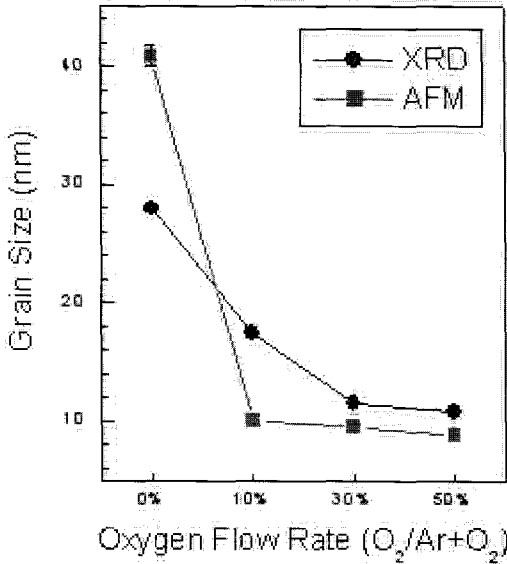


그림 3. XRD와 AFM을 사용하여 계산한 결정 낱알의 크기.

Fig. 3. Grain size of ZnO:Al films from XRD and AFM.

을 사용하였다. 여기서 B 는 XRD 신호의 반치폭 (단위: 라디안), λ 는 x-선의 파장 (0.154 nm), θ 는 Bragg 회절각, c 는 상수 ($c = 1$)를 나타낸다. 식 (1)을 사용하여 계산한 낱알의 크기와 직접 AFM 촬영을 통해 측정된 값을 그림 3에 표시하였다. XRD로 계산한 결정 낱알의 크기는 산소 유량비 0%로 성장된 시편의 경우에, 가장 큰 값인 28 nm (AFM 측정의 경우 41 nm)이었고, 산소 유량비가 증가할수록 낱알의 크기는 점점 작아졌다. 이 결과는 AFM 측정의 경우에도 동일한 경향을 보였다. AFM으로 관측되는 박막 표면의 낱알들은 실제적으로 작은 낱알들이 서로 합쳐져 있는 것이기 때문에 XRD 측정 결과로 얻은 낱알의 크기와 상대적으로 약간 다르게 보이는 것으로 사료된다.

이 실험 결과로부터, 저자는 적당한 산소 유량비를 ZnO:Al 박막의 결정성을 향상시키기 위한 도구로 사용할 수 있음을 제시한다. 이것은 종래에 발표된 Al을 도핑시키는 농도의 함수와 열처리를 행하는 온도의 함수 이외에 또 하나의 새로운 증착 변수를 소개하는 것이다. 한편, Yoo 등[14]은 성장시 기판 온도가 상온에서 400 °C로 증가함에 따라 결정 낱알의 크기가 증가하면서 결정성이 향상됨을 보고하였으며, Ko 등[15]은 펄스 DC 마그

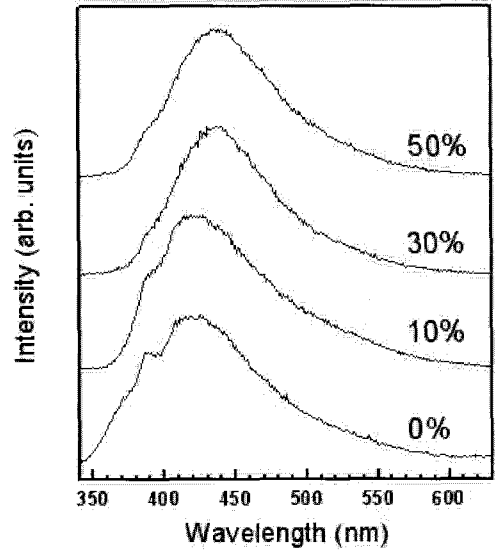


그림 4. 유리 기판 위에 서로 다른 산소 유량비로 성장된 ZnO:Al 박막의 상온 PL 스펙트럼.

Fig. 4. Room-temperature PL spectra of ZnO:Al films deposited on glass substrates at different oxygen flow ratios.

네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 ZnO:Al 박막을 증착하였고, 이때 펄스 진동수를 30 kHz로 증가시켰을 때에 결정 낱알의 크기가 28.4 nm로 증가하면서 결정성이 증가함을 관측하였다.

그림 4는 유리 기판 위에 서로 다른 산소 유량비로 성장된 ZnO:Al 박막의 PL 스펙트럼을 상온에서 측정된 결과를 나타낸 것이다. 각 시편의 경우에, 두 개의 발광 신호들이 관측되었다: 특히, 산소 유량비가 0%인 시료의 경우에, 하나의 신호는 세기가 약한 388 nm (3.20 eV)의 피크 파장을 나타내었고, 다른 하나의 신호는 매우 강한 세기를 나타내면서 419 nm (2.96 eV)에 중심을 둔 피크 파장을 발생시켰다. 여기서, 전자의 PL 신호는 잘 알려진 엑시톤의 복사선 소멸에 의해 발생하는 자외선 영역의 발광 신호이며, 후자의 PL 신호는 최근 몇몇의 연구자들에 의해 발표되고 있는 보라색 발광 신호이다[16,17].

다수의 연구자에 의해 산소 빈자리 혹은 Zn 격자 틈새 원자와 같은 불순물 결합에 의해 발생하는 것으로 논의되고 있는 녹색/노란색 영역에서 방출되는 PL 신호는 모든 시편의 경우에 관측되지 않았다. 산소 유량비가 점점 증가함에 따라 두 가지

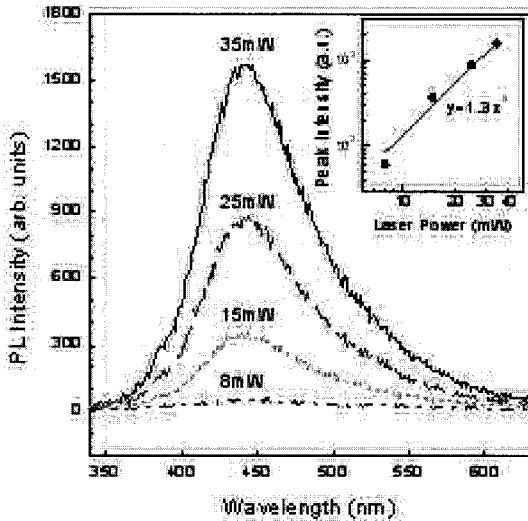


그림 5. 산소 유량비 50 %로 성장된 ZnO:Al 박막의 경우에 외부에서 조사하는 레이저 파워의 함수로 측정된 PL 스펙트럼. 삽입 그림은 로그-로그 축상에서 PL 피크의 세기를 레이저 파워의 함수로 나타낸 것이다. 직선은 모든 데이터를 잘 맞추는 식, $y = 1.3x^2$ 을 나타낸다.

Fig. 5. Laser power dependence of PL spectra for the ZnO:Al film with an oxygen flow ratio of 50 %. The inset shows the PL spectra as a function of laser power in log-log scale. The solid line shows the best fit, $y = 1.3x^2$ to the experimental data.

현저한 현상이 관측되었다: (i) 자외선 발광 신호의 세기는 보라색 발광 신호의 세기에 비하여 상대적으로 크게 감소하였고, 마침내 산소 유량비가 50 %인 시편의 경우에는 PL 신호의 세기가 매우 약하여 구별할 수 없었다. (ii) 산소 유량비가 0 %인 시편의 경우에 관측된 파장 419 nm에 중심을 둔 보라색 발광 신호의 피크 파장은 산소 유량비가 10 %, 30 %, 50 %로 증가함에 따라서 각각 422, 436, 439 nm의 장파장 (redshift) 쪽으로 이동하였고, PL 신호의 세기는 약간씩 증가하는 경향을 보였다.

그림 5는 산소 유량비가 50 %로 성장된 ZnO:Al 박막의 PL 세기를 외부에서 조사하는 레이저 파워의 함수로 측정된 결과를 나타낸 것이다. 레이저

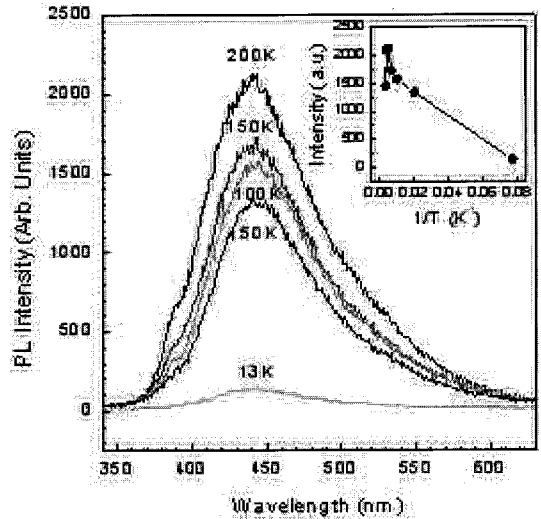


그림 6. 산소 유량비 50 %로 성장된 ZnO:Al 박막의 경우에 온도의 함수로 측정된 PL 신호. 삽입 그림은 온도의 역함수로 표시한 PL 세기의 변화를 나타낸다.

Fig. 6. The temperature dependence of PL spectra for the ZnO:Al film grown at an oxygen flow ratio of 50 %. The inset indicates the variation of PL intensity as a function of inverse temperature.

파워 8-35 mW의 영역에서 PL 피크 파장의 위치는 이동하지 않았다. 발광 신호의 파워 의존성은 식[18],

$$I = A I_L^k \tag{2}$$

으로 표현할 수 있다. 여기서 I 는 PL 신호의 세기, A 는 비례 상수, I_L 은 조사하는 레이저의 파워, k 는 복사선 재결합 과정의 본질을 결정하는 지수를 나타낸다. 자유 엑시톤과 구속 엑시톤에 의한 발광의 경우에 k 의 값은 $1 < k < 2$, 불순물과 관련된 방출인 경우에는 $k < 1$ 혹은 비선형 함수를 갖는다. 그림 5의 삽입 그림에서 보듯이, 본 실험에서 산소 유량비 50 %로 증착된 ZnO:Al 박막에서 방출되는 보라색 PL 신호의 세기는 레이저 파워의 함수에 비선형적 ($k = 2$, $A = 1.3$)으로 증가하는 경향을 나타냄으로써, 보라색 발광 스펙트럼의 원천은 388 nm의 피크를 갖는 자외선 발광스펙트럼의 원천과는 근본적으로 다름을 의미한다. 이 사실로부터,

보라색 PL 신호는 엑시톤의 재결합에 의해 발생하는 발광 스펙트럼이 아니라, 산소 빈자리의 낮은 도너 (donor) 준위에 위치하는 전자가 가전대 (valence band)로 전이하는 과정에서 발생한다는 사실을 지지한다[16]. 본 연구에서 성장된 모든 시료의 PL 스펙트럼은 산소 유량비에 따라서 조금씩 이동한 419-439 nm에 중심을 둔 밴드폭이 비교적 넓은 단일의 보라색 발광 피크를 나타내었다. 일반적으로, ZnO 박막에서 형성되는 결합은 산소 빈자리 (V_O), Zn 빈자리 (V_{Zn}), Zn 격자 틈새 (Zn_i), 산소 격자 틈새 (O_i), 반대 위치 산소 (O_{Zn})로 구성된다. Xu 등[19]은 ZnO 박막에서 결합의 에너지 준위를 총 퍼텐셜 선형 머핀 주석그릇 궤도 방법 (full-potential linear muffin-tin orbit method)으로 계산하였다. 그들의 계산에 의하면, 전도대에 위치한 전자가 ZnO 결정 난알들 사이의 경계면에서 포획되는 Zn 빈자리의 에너지 준위로 전이할 때 발생하는 에너지는 3.06 eV이고, Zn 격자 틈새 원자가 위치하는 에너지 준위에서 가전대로 전이할 때 방출하는 에너지는 2.90 eV로 주어진다. 이 계산 값 (2.90 eV)은 본 연구에서 검출된 에너지 2.96-2.82 eV (419-439 nm)를 갖는 보라색 발광 스펙트럼과 거의 일치된 값을 보여주기 때문에, 보라색 PL 신호는 Zn 격자 틈새 원자와 관련된 결합에 의해 발생하는 것으로 판단할 수 있다.

그림 6은 산소 유량비가 50 %로 성장된 ZnO:Al 박막의 PL 신호를 온도의 함수로 측정한 결과를 나타낸 것이다. 13 K에서 발광 신호는 520 meV의 넓은 반치폭을 갖고 파장 439 nm (2.82 eV)의 피크를 갖는 강한 보라색 스펙트럼을 방출하였다. 주변 온도를 50, 100, 150, 200, 290 K로 증가함에 따라, 보라색 PL 피크의 에너지는 실험 오차 범위 내에서 거의 일정하였으며, PL 세기는 증가하다가 200 K 이후에는 점차적으로 감소함을 보였다[그림 6의 삽입 그림 참조]. 일반적으로, 온도가 증가함에 따라 PL 세기가 감소하고, PL 피크의 에너지는 Varshi 식[20]을 만족하면서 감소하는 데 반하여, 본 연구에서 성장된 ZnO:Al 박막에서 관측된 보라색 PL 신호는 이와는 다른 경향을 나타내었다.

4. 결론

RF 마그네트론 스퍼터링 방법으로 유리 기판 위에 성장된 ZnO:Al 박막의 보라색 PL 신호의 피크 에너지(파장)를 스퍼터링 가스로 사용하는 아르곤과 산소의 유량비를 제어함으로써 조절하였다. 산소 유량비를 감소시킴에 따라 결정 난알의 형태

는 구형에서 육각형으로 변하였고, 표면 거칠기와 결정 난알의 크기는 대체적으로 증가하면서 결정성은 향상되었다. 이 결과는 AFM 상과 PL 신호의 측정을 통하여 확인되었다. 보라색 PL 신호의 원인은 엑시톤 재결합에 의한 전이 결과로 발생하는 것이 아니고, 전도대 하부에 위치하는 Zn 격자 틈새의 낮은 도너 준위에 있는 전자가 가전대로 전이하는 과정에 발생하는 것으로 판단된다. 또한, 스퍼터링 증착법으로 박막을 성장할 때 아르곤과 산소 유량비의 적절한 선택이 양질의 박막 형성과 PL 피크 에너지의 이동에 중요한 변수가 됨을 제시한다.

참고 문헌

- [1] W. Z. Xu, Z. Z. Ye, Y. J. Zeng, L. P. Zhu, B. H. Zhao, L. Jiang, J. G. Lu, H. P. He, and S. B. Zhang, "ZnO light-emitting diode grown by plasma-assisted metal organic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, p. 173506, 2006.
- [2] M. Tomar, V. Gupta, and A. Mansingh, "Temperature stability of ZnO thin film SAW device on fused quartz", *IEEE Trans. Device and Materials Reliability*, Vol. 5, p. 494, 2005.
- [3] 나영일, 이재형, 임동건, 양계준, "태양전지 응용을 위한 PC 기판상의 ZnO:Al 박막 특성에 관한 연구", *전기전자재료학회논문지*, 18권, 2호, p. 116, 2005.
- [4] P. F. Carcia, R. S. McLean, M. H. Reilly, and G. Nunes, Jr., "Transparent ZnO thin-film transistor fabricated by rf magnetron sputtering", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 82, p. 1117, 2003.
- [5] A. Yamamoto, K. Miyajima, T. Goto, H. J. Ko, and T. Yao, "Biexciton luminescence in high-quality ZnO epitaxial thin films", *J. Appl. Phys.*, Vol. 90, p. 4973, 2001.
- [6] M. K. Jayaraj, A. Antony, and M. Ramachandran, "Transport conducting zinc oxide thin film prepared by off-axis rf magnetron sputtering", *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 25, p. 22, 2002.
- [7] D. Wang, H. W. Seo, C. C. Tin, M. J. Bozack, J. R. Williams, M. Park, N.

- Sathitsuksanoh, A. Cheng, and Y. H. Tzeng, "Effects of postgrowth annealing treatment on the photoluminescence of zinc oxide nanorods", *J. Appl. Phys.*, Vol. 99, p. 113509, 2006.
- [8] A. Manouni, F. J. Manjon, M. Mollar, B. Mari, R. Gomez, M. C. Lopez, and J. R. Ramos-Barrado, "Effect of aluminium doping on zinc oxide thin films grown by spray pyrolysis", *Superlattices and Microstructures*, Vol. 39, p. 185, 2006.
- [9] H. Zeng, W. Cai, J. Hu, G. Duan, P. Liu, and Y. Li, "Violet photoluminescence from shell layer of Zn/ZnO core-shell nanoparticles induced by laser ablation", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, p. 171910, 2006.
- [10] B. J. Jin, S. Im, and S. Y. Lee, "Violet and UV luminescence emitted from ZnO thin films grown on sapphire by pulsed laser deposition", *Thin Solid Films*, Vol. 366, p. 107, 2000.
- [11] Z. Y. Xue, D. H. Zhang, Q. P. Wang, and J. H. Wang, "The blue photoluminescence emitted from ZnO films deposited on glass substrate by rf magnetron sputtering", *Appl. Surface Sci.*, Vol. 195, p. 126, 2002.
- [12] S. Cho, "Structural and optical properties of ZnO films grown on sapphire substrates subjected to substrate temperature", *J. Korean Phys. Soc.*, Vol. 49, p. 985, 2006.
- [13] M. L. Tu, Y. K. Su, and C. Y. Ma, "Nitrogen-doped p-type ZnO films prepared from nitrogen gas radio-frequency magnetron sputtering", *J. Appl. Phys.*, Vol. 100, p. 053705, 2006.
- [14] J. Yoo, S. K. Dhungel, M. Gowtham, J. Yi, J. Lee, S. Kim, K. Yoon, I. J. Park, and J. Song, "Properties of textured ZnO: Al films prepared by rf magnetron sputtering for thin film solar cells", *J. Korean Phys. Soc.*, Vol. 47, p. S576, 2005.
- [15] H. Ko, W. P. Tai, K. C. Kim, S. H. Kim, S. J. Suh, and Y. S. Kim, "Growth of Al-doped ZnO thin films by pulsed DC magnetron sputtering", *J. Cryst. Growth*, Vol. 277, p. 352, 2005.
- [16] S. Zhao, Y. Zhou, K. Zhao, Z. Liu, P. Han, S. Wang, W. Xiang, Z. Chen, H. Lu, B. Cheng, and G. Yang, "Violet luminescence emitted from Ag-nanocluster doped ZnO thin films grown on fused quartz substrates by pulsed laser deposition", *Physica B*, Vol. 373, p. 154, 2006.
- [17] X. M. Fan, J. S. Lian, Z. X. Guo, L. Zhao, and Q. Jiang, "Influence of the annealing temperature on violet emission of ZnO films obtained by oxidation of Zn film on quartz glass", *J. Mater. Sci.*, Vol. 41, p. 2237, 2006.
- [18] T. Schmidt, K. Lischka, and W. Zulehner, "Excitation-power dependence of the near-band-edge photoluminescence of semiconductors", *Phys. Rev. B*, Vol. 45, p. 8989, 1992.
- [19] P. S. Xu, Y. M. Sun, C. S. Shi, F. Q. Xu, and H. B. Pan, "The electronic structure and spectral properties of ZnO and its defects", *Nucl. Instrum. Methods B*, Vol. 199, p. 286, 2003.
- [20] Y. P. Varshi, "Temperature dependence of the energy gap in semiconductors", *Physica*, Vol. 34, p. 149, 1967.