

초음파분무법으로 제조한 ZnO:Er막의 UV 발광 특성

최무희 · 마대영[†]

UV emission of ZnO:Er films prepared by ultrasonic spray pyrolysis

Mu-Hee Choi and Tae-Young Ma[†]

Abstract

The films of Er-doped ZnO (ZnO:Er) were prepared onto MgO wafers by ultrasonic spray pyrolysis at 550 °C. The concentration of Er in the deposition source varied from 0.5 wt% to 3.0 wt%. The crystallographic properties and surface morphologies of the films were investigated by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM), respectively. The properties of photoluminescence (PL) for the films were investigated by dependence of PL spectra on the Er concentration in the films. The films were grown as polycrystalline with a dominant direction of [002]. The grain size of the films were reduced by Er-doping. Er-doping enhanced the ultraviolet emission of ZnO:Er films. The ZnO:Er films prepared with the deposition source of 2.0 wt% Er showed the strongest ultraviolet light emission peak among the films in this study.

Key Words : ZnO:Er films, ultrasonic spray pyrolysis, photoluminescence, ultraviolet emission.

1. 서 론

넓은 밴드 갭(3.3 eV)과 큰 엑시톤 바인딩 에너지(60 meV)를 갖는 ZnO는 자외선(ultraviolet, UV)을 방출하는 단파장 소자의 후보 물질로 각광 받고 있다^[1-4]. ZnO는 GaN(26 meV)과 ZnSe(20 meV) 등 다른 단파장 발광 재료에 비해 엑시톤 바인딩 에너지가 약 3배 정도 크다. 엑시톤 바인딩 에너지가 크다는 것은 고온에서도 단파장 발광이 가능하다는 것을 의미한다. ZnO 막은 UV(380 nm), 초록(510 nm), 및 빨강(650 nm) 빛을 방출한다^[5]. 가시광 방출은 ZnO막에 자연발생적으로 존재하는 Zn interstitial이나 산소 빈자리 같은 결함으로 인한 것이라고 알려져 있다^[6,7]. 이와 같은 결함은 UV 발광효율을 저해하는 요인이 된다. 단파장 발광소자의 개발을 위하여 가시광영역의 발광은 억제하고 UV 방출효율을 증가시킬 수 있는 양질의 ZnO막 제조 방법 개발이 요구된다.

희토류 원소인 엘븀(erbium, Er)은 ZnO의 밴드 갭

내에 위치한 Er³⁺ 이온들이 4f 궤도 내부에서 직접전이 를 일으켜 발광하는 것으로 알려져 있다. Er의 경우 주로 적외선 영역인 1.54 μm에서의 발광에 대한 연구^[8-10]가 주종을 이루고 있으며 아직까지 UV 방출에 대한 연구는 전무하다. 본 연구에서는 Er이 첨가된 ZnO막 (ZnO:Er)을 초음파분무법으로 증착한 후 ZnO:Er막의 구조적, 전기적 및 photoluminescence(PL) 특성을 관찰 하였다.

2. 실험 및 측정

ZnO:Er막을 MgO(100) 단결정웨이퍼 위에 초음파 분무열분해법으로 성장시켰다. Zn과 Er의 전구체로 zinc acetate(Aldrich, 99.999%)와 erbium acetate hydrate((CH₃CO₂)₃Er·xH₂O, Aldrich, 99.9%)를 사용하였다. 이때 용액의 농도는 0.03 mol/liter였다. 용액에 포함된 Er의 양은 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 wt%로 변화시켰다. 반응가스의 유속은 1.5 l/min였고 기판온도는 550 °C였다. ZnO:Er막의 결정구조를 살펴보기 위하여 XRD 측정을 하였다. X-선 원은 Cu-K_α(λ=0.1542 nm)를 사용하였고 주사각은 20°에서 60°까지로 하였다. 막의 두께는 α-step(Tencor Instruments 500)으로 측정하였으

경상대학교 전기공학과 및 경상대학교 공학연구원(Department of Electrical Engineering and ERI, Gyeongsang National University)

[†]Corresponding author: tyma@gnu.ac.kr
(Received : April 5, 2007, Accepted : May 28, 2007)

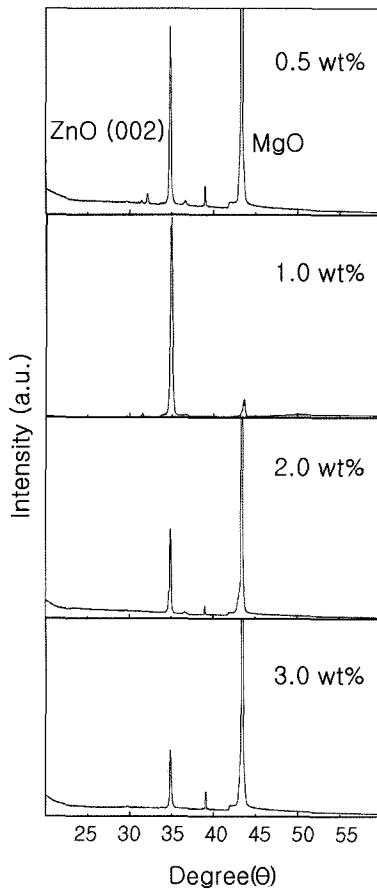


그림 1. Er 첨가량에 따른 ZnO:Er막의 XRD 패턴 변화
Fig. 1. XRD pattern variation of ZnO:Er films with the concentration of Er.

며, 본 실험에서 증착한 막의 두께는 500 ± 20 nm였다. SEM을 사용하여 막의 표면형상을 조사하였다. 4 단자 법으로 막의 저항률을 측정하였으며 EPMA로 막에 포함된 Er의 양을 분석하였다. He-Cd laser(325 nm)를 입사파로 사용하여 PL 특성을 조사하였다. He-Cd 레이저의 출력은 50 W였다. GaAs 감지기를 사용하였으며, 감지기의 노출시간은 200 ms이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. ZnO:Er막의 구조적 특성

MgO 기판위에 Er의 양을 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 wt%로 변화를 주면서 ZnO:Er 막을 증착하였다. 이때 기판의 온도는 550°C 였다. 그림 1은 Er의 첨가량 변화에 따른 XRD 패턴을 나타낸 것이다. Er의 첨가량에 상관없이 $2\theta = 34.42^\circ$ 에서 ZnO(002) 피크가 주로 관측되었다. 이

것은 증착된 ZnO막이 기판에 수직방향으로 c-축을 갖는 육각기둥의 wurtzite 구조임을 나타낸다. Er 결정의 가장 강한 세개의 XRD피크는 29.07° , 33.97° , 48.72° 인 것으로 알려져 있다. 본 측정에서 Er에 의한 XRD 피크는 확인할 수 없었다. ZnO:Er막의 XRD 패턴은 ZnO막의 그것과 유사했다. Er이 2.0 및 3.0 wt%일 때보다 0.5 및 1.0 wt%에서 ZnO(002) 피크가 더 크게 나타났다. ZnO:Er(1.0 wt%)막의 XRD 패턴을 보면, 기판인 MgO에 의한 피크가 크게 감소함을 보인다. 측정에 사용된 ZnO:Er(1.0 wt%)막의 두께가 다른 시편에 비해 크거나, XRD 측정시 시편이 기울진 결과로 볼 수 있다. 본 실험에서 제조한 시편의 두께는 증착시간으로 조절하였으며, 제조된 박막간의 두께 오차가 500 Å 미만이었다. ZnO:Er(1.0 wt%)막의 XRD 패턴에서 ZnO(002) 피크반폭치(FWHM)가 다른 시편에 비해 큰 것으로 측정되었다. 이로 볼 때, ZnO:Er(1.0 wt%)막의 기판 피크 감소는 미세하게 기울어진 시편 각도가 원인인 것으로 생각된다. 박막의 결정성만이 XRD 피크 크기에 영향을 미친다고 가정한다면, Er이 2.0 wt% 이상 첨가되면 결정성이 나빠진다고 볼 수 있다. 하지만 PL 측정결과, XRD 결과에 의해 결정성이 좋다고 판단되는 막들의 UV 발광세기가 오히려 감소하는 현상을 보였다. 열처리한 ZnO막의 경우에도 결정성은 향상되거나 UV 발광특성은 저하된다고 보고¹¹⁾된 바 있다.

Scherrer 방정식을 사용하여 XRD 피크의 반폭치로부터 ZnO:Er막의 그레인 크기를 구하였다. 표 1은 Er 첨가량에 따른 ZnO 막의 그레인 및 wurtzite 구조의 c-축 길이를 구한 결과이다. Er 첨가량과 결정크기 사이에 규칙성이 없는 것으로 보아서 Er의 양과 결정크기는 무관한 것으로 보인다. 그레인 크기는 $492 \sim 504$ Å 사이의 값을 보인다. c-축 길이는 단결정 ZnO ($c = 5.207$ Å)에 비해 약 10% 정도 작게 나타났다. 이것은 초음파분무열분해법으로 제조한 ZnO막에 나타나는 공통된 현상으로 ZnO:Er막도 ZnO 단결정에 비해 신장 내력(tensile stress)을 받고 있음을 알 수 있다.

그림 2는 ZnO:Er막의 SEM사진이다. Er의 첨가에

표 1. ZnO:Er막의 그레인 크기 및 격자상수(c)
Table 1. Grain size and lattice constant(c) of ZnO:Er films

Er (wt%)	Grain size (Å)	C (Å)
0.5	504.66	5.154
1.0	391.06	5.147
2.0	504.32	5.149
3.0	495.34	5.146

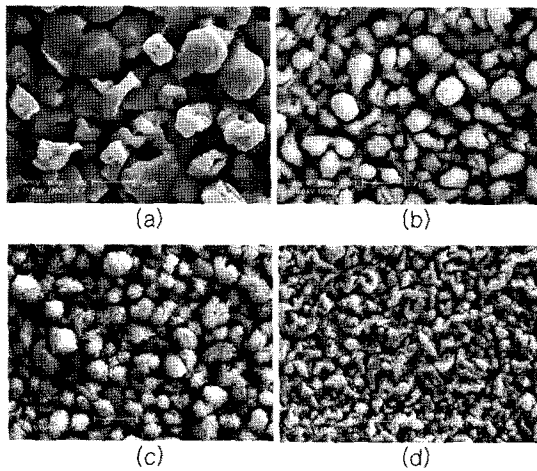


그림 2. ZnO:Er막의 SEM 사진: (a) 0.5 wt%, (b) 1.0 wt%, (c) 2.0 wt% 및 (d) 3.0 wt%
 Fig. 2. SEM micrographs of ZnO:Er films. The concentration of Er in ZnO solution is: (a) 0.5 wt%, (b) 1.0 wt%, (c) 2.0 wt% and (d) 3.0 wt%.

의해 그래인이 작아짐을 볼 수 있다. 이것은 Er의 첨가량이 증가함에 따라 XRD의 ZnO(002) 피크가 감소하는 이유 중 하나이다. ZnO:Er(1.0 wt%)막의 경우 그래인 크기의 감소에도 불구하고 ZnO(002) 피크가 오히려 증가하는 현상을 보인다. 소량의 Er원자는 박막성장을 위한 핵생성(nucleation)의 중심역할을 하여 ZnO막의 수직성장에 도움을 주는 것으로 보인다. 이 현상은 알루미늄이 첨가된 ZnO막에서도 발견^[11]된 바 있다.

그림 3은 EPMA 결과로부터 구한 ZnO:Er막에 포함

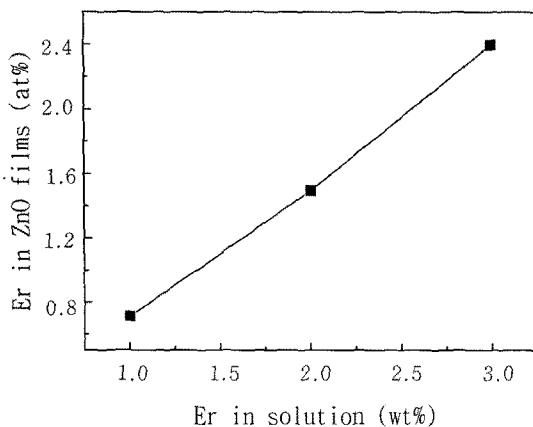


그림 3. 증착용액의 Er 농도에 따른 ZnO:Er막의 Er 농도 변화
 Fig. 3. Er concentration in ZnO:Er films as a function of Er concentration in deposition solutions

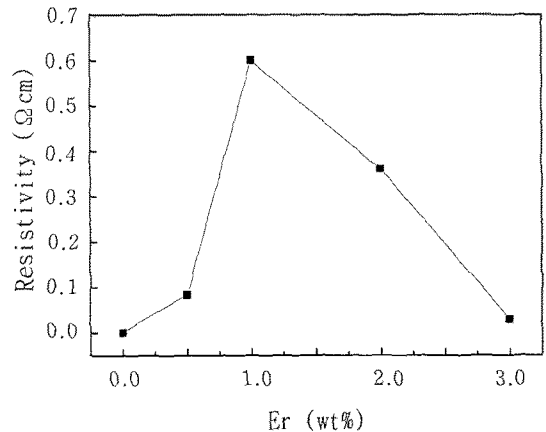


그림 4. 증착용액의 Er 농도에 따른 ZnO:Er막의 저항률 변화
 Fig. 4. Resistivity variation with Er concentration in deposition solutions.

된 Er의 원자량을 증착시 매탄올 용액에 녹아있는 Er 첨가량의 함수로 나타낸 것이다. 용액에 첨가한 Er의 양이 증가함에 따라 ZnO:Er막에 포함된 Er/ZnO의 비율 또한 증가하고 있다. 이로써 용액 속에 Er 첨가량을 증가시키면 ZnO:Er막의 Er 원자량도 비례하여 증가함을 알 수 있다.

그림 4는 ZnO:Er막의 저항률을 나타낸 것이다. Er을 0.5 wt% 및 1.0 wt% 첨가한 ZnO:Er막은 순수 ZnO막에 비해 저항률이 증가하였다. 일반적으로 ZnO막은 벌크 ZnO에 비해 저항률이 낮으며, 이것은 자연발생적으로 존재하는 산소 또는 Zn 빈자리에 의한 것으로 알려져 있다^[12]. ZnO에 Er이 첨가되면 Er이 Zn의 빈자리를 채우고 주변의 산소와 결합한다. 따라서 Er의 첨가에 의해 Zn의 빈자리가 감소하며 이에 따라 저항률이 증가하는 것으로 생각된다. Er이 2.0 wt% 및 3.0 wt% 첨가되면 저항률은 다시 감소한다. Er이 2.0 wt% 이상 첨가되면, interstitial로 존재하는 과잉 Er 원자가 활성화되어 저항률의 감소를 가져오는 것으로 추측된다.

본 연구에서 제조한 ZnO:Er막의 PL 측정에서 가시광 영역의 방출은 나타나지 않았다. ZnO의 가시광선 방출은 산소 또는 Zn 빈자리가 주원인이며, Zn interstitial은 결정성을 악화시킨다고 알려져 있다. 본 실험의 PL 결과에 의해 ZnO막에 존재하는 산소 및 Zn 빈자리가 Er의 첨가에 의해 감소함을 확인할 수 있었다.

3.2. ZnO:Er막의 PL특성

Er을 2.0 wt%로 첨가한 ZnO:Er(2.0 wt%)막은 상온에서 ZnO막에 비해 30배나 증가된 UV 빛을 방출하였

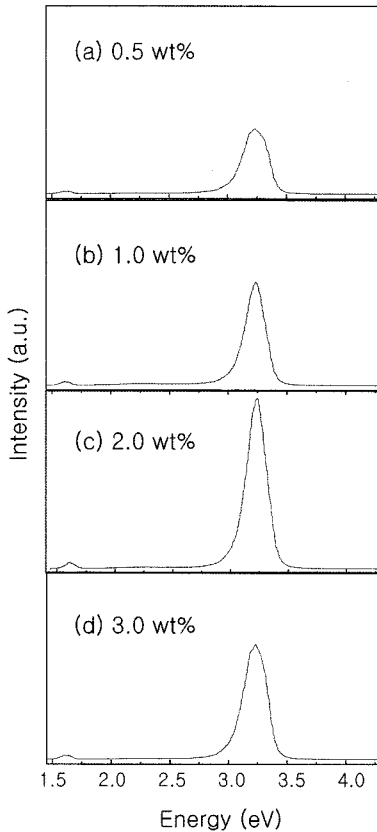


그림 5. Er 농도변화에 따른 ZnO:Er막의 PL 스펙트럼: (a) 0.5 wt%, (b) 1.0 wt%, (c) 2.0 wt%, (d) 3.0 wt%
 Fig. 5. PL spectra of ZnO:Er films doped with: (a) 0.5 wt%, (b) 1.0 wt%, (c) 2.0 wt%, (d) 3.0 wt%

다. 여기원으로 He-Cd laser를 사용하여 상온에서 PL 측정을 한 결과, deep-level에 의한 가시광영역의 발광은 거의 보이지 않고 385 nm 부근의 UV 빛만 확인되었다. ZnO격자 안에서 호스트와 Er³⁺ 이온 사이의 상호작용으로 말미암아 격자의 구조가 더욱 안정적으로 변했기 때문인 것으로 생각된다.

Er이 도핑된 혼합반도체 안에서 일어나는 발광원리가 아직까지 명확히 규명된 적은 없으나 Er 원자의 4f 내부 에너지준위에서 새로 분열되거나 혼성된 에너지 준위들이 형성되어 있을 것으로 추측할 수 있다. 따라서 이들 에너지준위에서 발생한 Er³⁺ 이온들의 천이가 ZnO격자 안에서 가세되어 더욱 증가된 UV 발광을 가져온 것으로 판단된다.

그림 5는 Er의 첨가량에 따른 상온 PL 특성의 변화이다. Er의 첨가량이 증가함에 따라 UV 발광세기가 증가하였다. 일반적으로 열작용 때문에 저온에 비해 상온

표 2. ZnO:Er막의 실온 UV 피크 데이터
 Table 2. UV peak data of ZnO:Er films at 300 K

Er (wt%)	Wavelength (nm)	Intensity (a.u.)	Energy (eV)	FWHM (meV)
0	376.87	8237	3.291	118
0.5	384.63	85,466	3.231	205
1.0	385.00	131,220	3.227	175
2.0	385.66	226,490	3.221	178
3.0	385.31	151,280	3.225	196

의 발광세기가 더 낮게 나타나는것으로 알려져 있다^[4]. ZnO:Er(0.5 wt%) 및 ZnO:Er(1.0 wt%)막에 비해 ZnO:Er(2.0 wt%) 및 ZnO:Er(3.0 wt%)막의 UV 발광강도가 높은 것은 Er 원자에 의한 UV 발광이 더해지기 때문이다.

Table 2는 Er 첨가량에 따른 UV 피크의 파장 등을 나타낸 것이다. Er의 첨가량에 상관없이 ZnO:Er막의 UV 피크는 ZnO막보다 10~30배 더 증가하였다. Er이 2.0 wt%일 때 가장 높은 UV 피크가 측정되었다. 대체로 ZnO:Er막의 UV 피크 중심파장은 약 385 nm로 ZnO에 비해 약 9 nm 증가하였으며 반폭치는 ZnO막보다 1.5배 정도 증가하였다. 아마도 ZnO와 Er로 인한 UV 피크 성분이 합쳐져서 하나의 UV 피크를 보이기 때문에 중심파장이 증가하며 반폭치가 더 넓어진 것으로 추측된다.

위의 측정 결과로부터 ZnO막에 Er를 도핑하면 증가된 UV 발광을 얻을 수 있으며 Er의 첨가량은 2.0 wt%가 가장 적합한 것으로 결론을 내릴 수 있다. ZnO:Er막에서 가시광 방출 없이 UV 피크가 발생한 것은 ZnO 막내에 존재하는 여러 가지 결함을 Er 첨가로 인해 줄일 수 있기 때문이라고 여겨진다. UV 피크의 증가는 ZnO의 엑시톤에 의한 발광에 상대적으로 약한

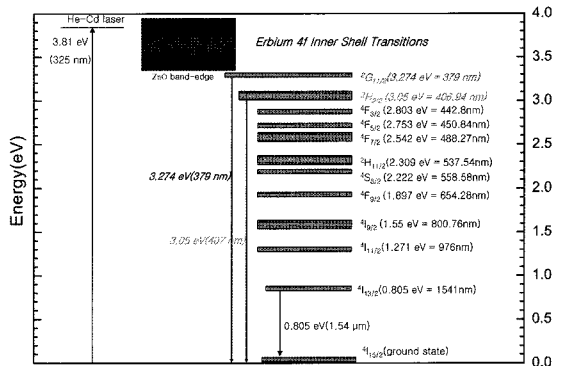


그림 6. Er 원자의 4f 내부 셸 에너지밴드 다이어그램
 Fig. 6. Energy-band-diagram of 4f inner shell transitions of Er atom.

결합에너지를 가진 Er^{3+} 이온의 발광이 가세되어 나타난 결과로 사료된다.

그림 6은 Er^{3+} 이온들이 활성화되었을 때 ZnO 밴드 갭 (3.3 eV) 내에서 전이가 발생하는 Er 원자의 4f 에너지준위를 보여주고 있다^[13]. 본 그림에서 Er^{3+} 이온의 방출 스펙트럼을 볼 수 있다. 예를 들면 IR 방출 라인은 $^4I_{13/2}$ 준위에서 기저 준위인 $^4I_{15/2}$ 까지 전이될 때 일어나며, UV 발광은 $^2G_{11/2}$ 준위에서 기저 준위인 $^4I_{15/2}$ 로 전이될 때 일어난다. 본 연구에서 여기원으로 사용한 He-Cd 레이저는 3.8 eV 광에너지를 가지고 있어서 ZnO의 밴드 갭 이상으로 전자를 여기시킬 수 있다.

에너지가 높은 레이저 빛을 받은 전자들은 ZnO 전도대로 강하게 여기되어 올라간다. 여기된 전자의 일부는 ZnO 전도대의 가장자리에서 엑시톤을 형성하여 ZnO 밴드 갭 근처에서 직접 재결합을 한다. 이것은 일반적으로 발생하는 ZnO의 UV 발광 현상이다. 그러나 여기된 일부 다른 전자들은 Er의 4f 내부 에너지준위로 떨어지면서 Er^{3+} 이온에게 에너지를 전달한다. Er이 도핑된 반도체 내부에서는 호스트와 Er의 상호작용 때문에 Er의 4f 에너지준위들의 Stark 분열현상^[15]이 일어나 에너지준위가 복잡하게 새로 형성된다. 이렇게 분열된 Er 4f 에너지준위들 사이에서 한번 이상의 전이가 잇달아 발생하기도 하는데 마지막으로 기저준위로 전이되기 전까지는 빛이 없는 포논전이 (nonradiative phonon transition)가 일어난다^[16-17]. 원칙적으로 독립된 Er 원자에서 4f 준위 내부(f-f)간의 전이는 금지되어 있지만 리간드로 구성된 결정계에서는 전이가 허용되어^[18-19] 기저준위로 전이되면서 발광하게 된다^[12,15]. 이러한 Er로 인한 발광은 처음에 ZnO에서 발생한 전자가 여기되어 Er^{3+} 이온으로 에너지를 전달하면서 발생한 것으로 보기 때문에 간접여기라고 한다. 또 하나의 다른 형태 즉 직접여기로 인해서도 발광이 일어난다. 직접여기란 기저준위에 있는 Er^{3+} 이온이 레이저 빛을 직접 흡수하여 세분화된 Er 원자의 4f 에너지준위 내부로 직접적으로 여기가 되는 것을 말한다. 역시 기저준위로 재결합될 때 발광하게 된다. 본 연구에서 관측된 ZnO:Er막의 UV 피크 증가는 위에서 설명한 Er 원자의 발광 메커니즘에 의한 것으로 추측된다.

4. 결 론

초음파분무법을 사용하여 ZnO:Er막을 증착하였다. ZnO:Er막의 XRD 측정결과 ZnO[002]방향이 주 피크로 관측되었다. SEM사진에 의해 Er의 첨가량이 늘어날수록 그래인의 크기가 줄어드는 것을 확인하였다.

ZnO에 Er을 첨가하여 상온에서의 UV 발광효율을 향상시킬 수 있었다. Er의 첨가량이 2.0 wt%일 때 가장 높은 UV 발광이 관측되었다. ZnO:Er막에서 가시광 방출 없이 UV 피크가 발생한 것은 ZnO막내에 존재하는 여러 가지 결함을 Er 첨가로 인해 줄일 수 있기 때문이라고 여겨진다. ZnO:Er막이 ZnO막보다 더 강한 UV 발광을 보인 것은 ZnO의 엑시톤에 의한 발광에 Er^{3+} 이온의 발광이 가세되어 나타난 결과로 사료된다.

본 연구의 PL 및 SEM 측정결과로 볼 때, ZnO막의 UV 발광특성과 그래인 크기사이에는 상관관계가 없는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 한국학술진흥재단(과제번호 D00463) 연구비의 지원 하에 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 최무희, 마대영, “초음파분무법으로 제조한 ZnO/MgO막의 특성”, 센서학회지, 제14권, 제5호, pp. 362-367, 2006.
- [2] 홍광준, “펄스 레이저 증착(PLD)법에 의한 ZnO 박막 성장과 가전자대 갈라짐에 대한 광전류 연구”, 센서학회지, 제14권, 제3호, pp. 160-168, 2005.
- [3] I. S. Jeong, J. H. Kim, and S. Im, “Ultraviolet-enhanced photodiode employing n-ZnO/p-Si structure”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, no. 14, pp. 2946-2948, 2003.
- [4] X. Zhang, X. M. Li, T. L. Chen, J. M. Bian, and C. Y. Zhang, “Structural and optical properties of $Zn_{1-x}Mg_xO$ thin films deposited by ultrasonic spray pyrolysis”, *Thin Solid Films*, vol. 492, pp. 248-252, 2005.
- [5] S. L. Cho, Jing Ma, Y. K. Kim, Yi Sun, George K. L. Wong, and John B. Ketterson, “Photoluminescence and ultraviolet lasing of polycrystalline ZnO thin films prepared by the oxidation of the metallic Zn”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, no. 18, pp. 2761-2763, 1999.
- [6] H. S. Kang, J. S. Kang, S. S. Pang, E. S. Shim, and S. Y. Lee, “Variation of light emitting properties of ZnO thin films depending on post-annealing temperature”, *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 102, pp. 313-316, 2003.
- [7] K. Vanheusden, C. H. Seager, W. L. Warren, D. R. Tallant, and J. A. Voigt, “Correlation between pho-

- toluminescence and oxygen vacancies in ZnO phosphors”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, pp. 403-405, 1996.
- [8] M. A. Lim, S. I. Seok, and S. I. Hong, “Near infrared luminescence of Er ions in sol-gel ZnO/zirconium-oxo-alkylsiloxane nanocomposite films”, *Thin Solid Films*, vol. 515, no. 4, pp. 2423-2427, 2006.
- [9] S. Komuro, T. Katsumata, T. Morikawa *et al.*, “Time response of 1.54 m emission from highly Er-doped nanocrystalline Si thin films prepared by laser ablation”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, no. 3, pp. 377-379, 1999.
- [10] D. L. Adler, D. C. Jacobson, D. J. Eaglesham, M. A. Marcus, J. L. Benton, J. M. Poate, and P. H. Citrin, “Local structure 1.54 m luminescence Er³⁺ implanted in Si”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, pp. 2182-2183, 1992.
- [11] T. Y. Ma and S. C. Lee, “Effects of aluminum content and substrate temperature on the structural and electrical properties of aluminum-doped ZnO films prepared by ultrasonic spray pyrolysis”, *J. Mater. Sci.:Materials in Electronics*, vol. 11, pp. 305-309, 2000.
- [12] 마대영, 박기철, “초음파분무법으로 제조한 ZnO:Pt 막의 전기적 및 구조적특성”, *센서학회지*, 제13권, 제1호, pp. 66-71, 2005.
- [13] S. Bethke, H. Pan, and B. W. Wessels, “Luminescence of heteroepitaxial zinc oxide”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 52, no. 2, pp. 138-140, 1987.
- [14] T. Yokokawa, H. Inokuma, and Y. Ohki, “Nature of photoluminescence involving transitions from the ground to 4fⁿ⁻¹5d¹ state in rare-earth-doped glasses”, *J. Appl. Phys.*, vol. 77, pp. 4013-4017, 1995.
- [15] M. Sekita, Y. Miyazawa, and M. Ishii, “Stark splitting scheme and an induced emission cross section of TbAlO₃”, *J. Appl. Phys.*, vol. 83, no. 12, pp. 7940-7947, 1998.
- [16] A. J. Steckl and R. Birkhahn, “Visible emission from Er-doped GaN grown by solid source molecular beam epitaxy”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 12, pp. 1700-1702, 1998.
- [17] F. Pelle and F. Auzel, “Phonon bottleneck effect in multiphonon non-radiative transitions of rare-earth ions”, *J. Luminescence*, vol. 76&77, pp. 623-627, 1998.
- [18] A. Polman, “Erbium implanted thin film photonic materials”, *Appl. Phys. Rev.*, vol. 82, pp. 1-39, 1997.
- [19] Z. Zhou, T. Komori, M. Yoshino, and M. Morinaga, “Enhanced 1.54 m photoluminescence from Er-containing ZnO through nitrogen doping”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 4, pp. 041107-041109, 2005.



최 무 희

- 1983년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업
- 2007년 2월 경상대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)
- 2007년 3월~현재 경상대학교 공학연구원 연구원



마 대 영

- 1980년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업
- 1985년 8월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 1985년 9월~1987년 3월 ETRI 반도체 설계부 선임연구원
- 1989년 9월~1990년 9월 Carnegie-Mellon University, Post Doc.
- 1997년 8월~1992년 2월 University of Minnesota, Associate Researcher
- 1987년 4월~현재 경상대학교 전기공학과 교수
- 2005년 3월~2007년 2월 경상대학교 공과대학 학장