

## RF 마그네트론 스퍼터링법으로 증착한 ZnO:Er 박막형광체의 발광 특성

송현돈 · 김영진<sup>†</sup>

경기대학교 재료공학과

## Photoluminescence of ZnO:Er Thin Film Phosphors Deposited by RF Magnetron Sputtering

Hyundon Song and Young Jin Kim<sup>†</sup>

Department of Materials Science and Engineering, Kyonggi University, Suwon, 443-760, Korea

(2006년 5월 15일 접수, 2006년 6월 29일 최종수정본 접수)

**Abstract** ZnO is well-known as a promising material for optical communication systems and electronic displays. ZnO:Er thin films were deposited on c-plane sapphire substrates by rf magnetron sputtering, and the effects of sputtering parameters and the annealing conditions on the luminescence in the visible range were investigated. Luminescent properties depended on the crystallinity of films and annealing atmosphere. Highly c-axis oriented ZnO:Er films showed a strong emission band at 465 nm and a weak emission at 525 nm due to the energy transition of  $^4I_{15/2}-^4F_{5/2}$  and  $^4I_{15/2}-^2H_{11/2}$ , respectively. ZnO:Er thin films annealed at air atmosphere were superior to those annealed in  $H_2$  in photoluminescence intensity.

**Key words** ZnO, phosphors, erbium, photoluminescence, thin film, sputtering.

### 1. 서 론

ZnO 박막은 그 물리적, 화학적 안정성이 우수하여 광학 소자 및 전자 디스플레이용 재료로서 각광받고 있는 물질이다. ZnO의 재료를 GaN, ZnSe, ZnS 등과 비교하여 보면, 결정학적으로 같은 Wurtzite 구조이며, 격자상수 차이가 1.98% 정도 밖에 되지 않아 매우 유사한 결정구조를 가진다.<sup>1,2)</sup> ZnO의 상전온 상온에서 에너지 밴드갭이 3.37 eV로 3.4 eV의 GaN과 비슷하여 근자외선 영역의 광원으로 적당하고, 엑시톤 결합 에너지와 광학적 투명도의 우수성 때문에 발광소자 및 광학소자의 응용에 유리하다는 것이다.<sup>3)</sup> 또한 약 1.89 eV 정도의 결합 에너지로 GaN에 비하여 약간 낮지만 SiC, ZnSe 등에 비하여 우수한 성질을 가지고 있고, 결합 생성 에너지가 높아서 양질의 광소자에 적합하다. 이러한 유사성 이외에 상온에서의 엑시톤 결합에너지가 60 meV로 GaN (24 meV), ZnSe(19 meV)에 비하여 약 3배 정도 높아서 엑시톤을 기저로 하는 광소자의 활용에 있어서 고효율의 광이득( $ZnO$   $-300\text{ cm}^{-1}$ , GaN  $-100\text{ cm}^{-1}$ ) 현상을 기대할 수 있고, 미선형성이 강한 특성을 가지고 있다. 또한 ZnO의 경우 450~750°C에서 저층 성장이 가능하여 상대적으로 결합의 형성을 억제할 수 있는 우월성이 있다.<sup>4)</sup> 따

라서 이러한 특성을 응용한 광통신 시스템이나 전자디스플레이용 물질로서 각광받고 있다.

ZnO 박막의 증착은 현재 여러 가지 방법이 사용되고 있다. ZnO는 가상 일면적인 화학 기상 증착법(chemical vapor deposition)을 비롯하여, 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy), rf 마그네트론 스퍼터링(rf magnetron sputtering), 분무 열분해법(spray pyrolysis), 원자층 증착법(atomic layer deposition)과 펄스 레이저 증착법(pulsed laser deposition) 등 매우 다양한 방법들을 통하여 제작되고 있다.<sup>1,3)</sup>

지금까지 순수한 ZnO의 광학적 특성에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나, 가시광선 영역의 발광기구에 대한 정확한 이론은 완성되지 못하고 있다. 일반적으로 ZnO는 엑시톤에 의한 자외선 발광과 내부 결합에 의한 가시광선 영역의 발광으로 구분된다. 전자의 경우 강도가 약하고 발광시간도 매우 짧다. 한편 후자의 경우는 발광강도가 좀더 강하고 넓은 영역의 녹색 발광이 500~530 nm 사이에서 나타난다. 희토류계 도펀트(dopant)를 첨가하면 ZnO의 발광은 도펀트의 4f→5d로의 에너지 전이에 의존하게 되며, 따라서 순수한 ZnO가 갖는 높은 발광강도는 감소하지만 발광파장이 이동하는 특성을 나타낸다. 예를 들면, 도펀트로 사용된  $Er^{3+}$  이온은 ZnO의 여기 에너지에 영향을 미치게 되며, 이 결과로  $Er^{3+}$  이온의 기저상태( $^4I_{15/2}$ )에서의 에너지 전이에 의한 ZnO의 발

<sup>†</sup>E-Mail : yjkim@kyonggi.ac.kr

광파장 이동이 일어난다.<sup>5,6)</sup> 근래에 연구된 대부분의 ZnO:Er 관련 논문은 1.54  $\mu\text{m}$ 의 발광파장을 갖는 적외선 영역에서의 광증폭 특성 및 PL(photoluminescence) 특성에 대한 연구로서, 이를 광통신 시스템에 적용하고자 하는 연구가 주종을 이루고 있다.<sup>3,5,6)</sup> 반면 형광체로서 near ultra violet(nUV) 여기에 의한 가시광선 영역에서의 발광특성에 대한 연구는 기존의 논문들에서 거의 다루지지 않았다. Er의 첨가에 따른 nUV 여기에 의한 가시광선 영역에서의 발광특성은 Er<sup>3+</sup>가 첨가됨에 따라 본래 ZnO가 갖는 520 nm 근처의 녹색 발광이 575 nm 근처의 적색영역으로 이동시킬 수 있음을 선행된 연구를 통하여 얻어냈다.<sup>7)</sup> 이러한 특성은 적색 영역으로 이동된 가시광선 영역에서의 발광(575 nm)을 이용하여 기존의 형광체가 갖는 발광색에 대하여 색보정의 역할로 이용될 수 있는 상전을 지니고 있으며, 이러한 상전으로 EL 소자의 보정 역할을 할 수 있다. 또한 이를 박막화 함으로써 디스플레이 소자에의 적용이 보다 용이할 것이며, 박막화에 의하여 분말과는 달리 결정학적 우수성에 따른 발광특성의 변화를 나타낼 것으로 보인다.

본 실험에서는 rf 마그네트론 스퍼터링법으로 ZnO:Er 박막을 증착하여 산소비, rf 전력, 열처리 분위기 및 스퍼터링 변수에 따른 ZnO:Er 박막을 제조하고 이에 따른 결정 성장 특성과 가시광선 영역에서의 발광 특성에 관하여 연구하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서 ZnO:Er 박막은 rf 마그네트론 스퍼터링법을 사용하여 c-면 사파이어 기판 위에 증착하였다. 스퍼터링에 사용된 ZnO:Er 세라믹 타겟은 ZnO(High Purity Chemicals, 99.999%)와 Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(United International Inc., 99.9%) 분말을 선택된 조성에 따라 섞은 후, 3인치 볼 밀에서 3분의 힘을 가하여 가압 성형법으로 제작하였다. 제작된 타겟은 칸탈로에서 1100°C, 3시간동안 열처리되었다. 도핑 농도는 1 mol%이며, 이는 선행된 분말 실험에서 얻어진 최적의 조성을 따른 것이다.<sup>7)</sup> 스퍼터링 변수에 따른 ZnO:Er 박막의 특성을 관찰하기 위해 산소비와 rf 전력, 기판 온도 등을 변화시켜 증착하였으며, 증착된 박막은 각각 대기 분위기와 수소 분위기에서 700~900°C의 온도로 3시간동안 열처리 하였다. ZnO:Er의 자세한 증착조건 및 열처리 조건은 Table 1에 나타내었다. 증착된 박막의 결정 구조 분석은 XRD(x-ray diffractometer, SIEMENS D5005)를 이용하여 관찰하였으며, X선 파장은 1.5405 Å (CuK $\alpha$ )이었으며, 주사각도는 20~70°이고, 주사 속도는 5°/sec이다. 또한 증착된 박막의 표면 특성을 관찰하기 위해 FESEM(field emission scanning electron microscope, JEOL-JSM 6500F)을 이용하여 분

Table 1. RF Magnetron sputtering parameters for ZnO:Er thin films.

Parameters	Condition
Target size	$\Phi$ 2"
Substrate	C-plane sapphire
Substrate temperature	300°C, 550°C
O <sub>2</sub> /(Ar+O <sub>2</sub> ) ratio	10~50%
Working pressure	5 mTorr
Target to substrate	5 cm
RF power	80 W, 100 W, 150 W
Annealing temperature	700~900°C
Annealing atmosphere	Air and H <sub>2</sub> atmosphere

석하였다. 도핑도에 의해 발생하는 각각의 박막 발광특성은 PL 장치(PSI Darsa 5000)를 이용하여 관찰하였다. PL의 여기용 램프로는 Xe 램프를 사용하였고, 모노크로메이터(monochromator)에 통과시켜 다양한 여기파장을 선택하여 형광체 박막의 발광 특성을 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

증착된 박막은 각각 다른 분위기에서 3시간 동안 700~900°C의 온도에서 열처리하였다. 온도에 따른 ZnO:Er 박막의 발광 특성과 결정 성장 특성을 고찰한 결과 700°C 이상의 열처리 온도에서는 발광 특성에서 큰 차이를 나타내지 않았으며, 마찬가지로 결정 성장 특성에 있어서도 큰 차이를 보이지 않았고 오히려 온도가 증가할수록 (002) 번의 피크 강도가 감소하는 경향을 보였다. 따라서 본 실험에서는 박막의 열처리 온도를 700°C의 온도에서 열처리 하였으며, 700°C 이상의 온도에서 열처리된 박막의 결과는 고려하지 않았다.

Fig. 1에 산소분압과 rf 전력에 따른 증착속도를 나타내었다. 증착된 박막은 300°C의 기판온도에서 증착되었으며, 후열처리는 700°C에서 3시간동안 대기 분위기에서 열처리 하였다. (a)에서 볼 수 있듯이 rf 전력에 따라 증착속도가 증가하고 있다. 따라서 rf 전력은 박막의 성장 거동에 크게 영향을 주게 되며, 결과적으로 발광 특성 변화에 기여하게 된다. 이는 뒷부분에서 자세히 설명한다. (b)는 산소비에 따른 박막의 증착속도를 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 산소비가 높아질수록 증착속도가 느려지는 경향을 보였다. 산소비가 10% 일 경우와 50%의 경우에는 2배 이상의 차이가 있음을 알 수 있었다. J. B. Launsbury<sup>8)</sup>가 보고한 바에 의하면 스퍼터링을 할 경우에 플라즈마에 1% 산소를 첨가 할 경우에 증착 아르곤의 원자의 수가 10% 정도 증가한다고 하였다. 또한 증착 아르곤의 밀도 증가에 따라 이차전자수가 줄게 된다. 산소가 아르곤에 비하여 스퍼터링 효율이 낮고, 산

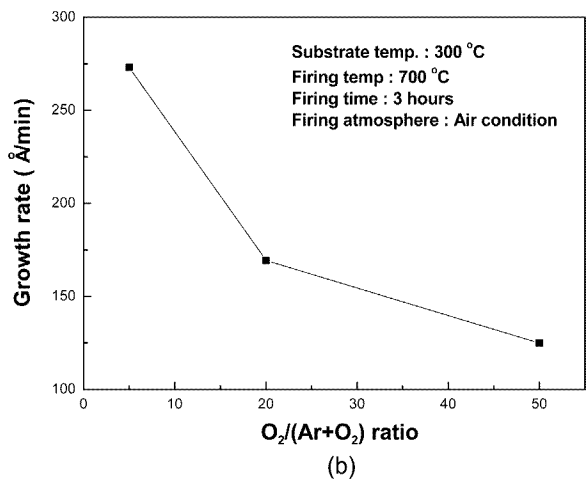
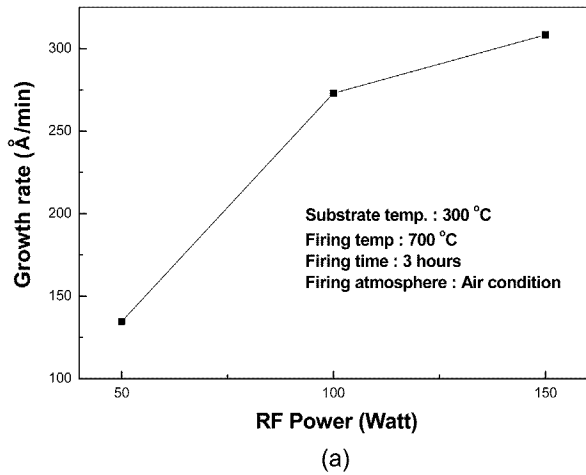


Fig. 1. Growth rate of ZnO:Er thin films as a function of (a) rf power and (b) O<sub>2</sub>/(Ar+O<sub>2</sub>) ratio.

소 이온에 의해 전자들이 포획되어 플라즈마 이온화를 감소시키기 때문에 플라즈마 내부의 산소이온양의 증가에 따라 스퍼터링율이 감소된다. 따라서 아르곤의 분압이 증가하면 플라즈마 방전 전류의 증가로 인해서 증착속도가 향상되었다는 것을 알 수 있었다. 본 실험에서는 산소 분압과 rf 전력에 따른 증착속도를 계산하여 모든 시편을 2 μm의 두께로 증착하였다.

Fig. 2는 385 nm의 여기파장 하에서 Er의 첨가량에 따른 PL 강도의 변화를 분말 실험으로부터 얻어낸 것이다. 1 mol% 이상의 Er이 첨가된 경우에는 발광강도가 오히려 감소한다. 이는 과량의 희토류계 Er<sup>3+</sup> 이온이 ZnO에 첨가되면서 도펀트 농도에 따른 소광현상(quenching effect)이 나타난 것이다. 이러한 현상은 도펀트 또는 활성제가 높은 농도로 도핑이 될 경우 에너지 전이를 저해시키기 때문에 발광 강도에 있어서 약한 강도를 갖게 되는 것이다.<sup>7)</sup> 결과적으로 1 mol%의 Er이 도핑된 경우에 상대적인 발광강도가 가장 우수함을 알 수 있다. 따라서 이러한 특성을 바탕으로 rf 스퍼터링에 사용할 세

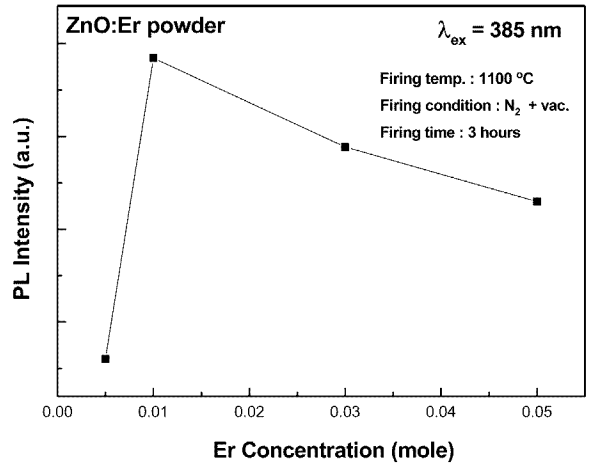


Fig. 2. PL intensity of ZnO:Er phosphor powder as a function of Er doping concentration.

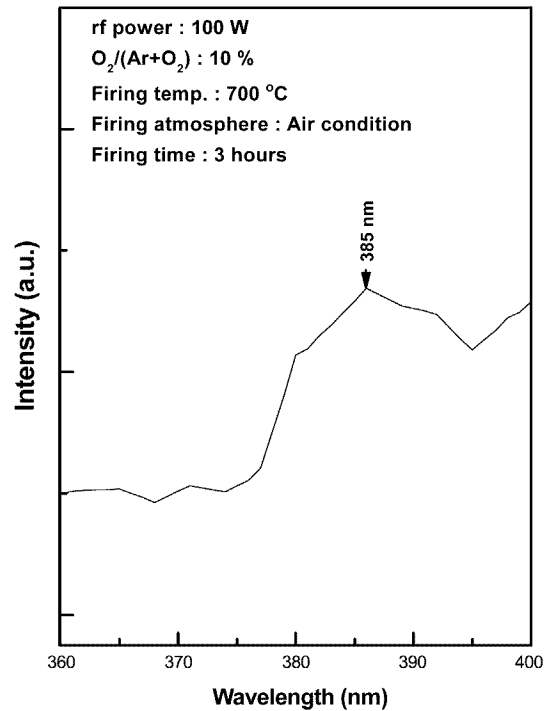


Fig. 3. PL excitation spectra of ZnO:Er thin films.

라믹 타겟의 조성을 결정하였다.

ZnO:Er 박막의 여기파장을 Fig. 3에 나타내었다. 측정된 박막의 증착 조건은 100 W, 10%이며, 300°C의 기판 온도의 조건에서 증착하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 385 nm에서 최대 세기를 갖고 있다. 이러한 발광특성은 Er<sup>3+</sup> 이온의 4f → 5d 에너지 준위의 이동 때문이라고 보고되고 있으며,<sup>9,10)</sup> 이는 희토류계 도펀트의 가장 특징적인 현상이다. 다시 말해서, Er<sup>3+</sup> 이온에서의 스핀-궤도 분리 전이(spin-orbit split transition)에 의해 기저

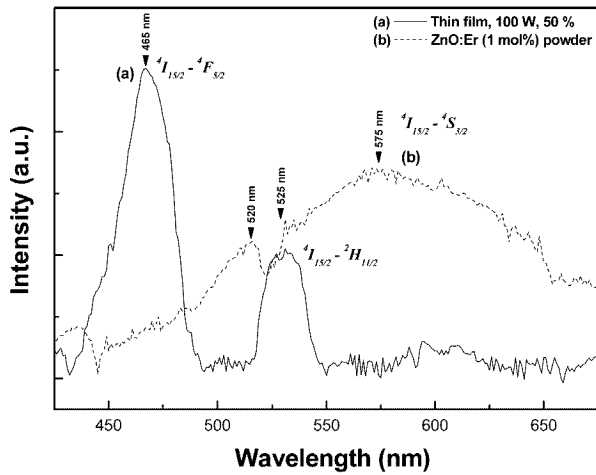


Fig. 4. PL emission spectra of ZnO:Er (a) thin film and (b) powders with 385 nm excitation.

상태 ( $^4I_{15/2}$ )에서 여기상태 ( $^4F_{9/2}$ ,  $^4S_{3/2}$ ,  $^2H_{11/2}$ ,  $^4F_{7/2}$  등)로 에너지 준위가 이동하게 된다. 따라서 에너지 전이가 일어나며, 그 결과 본래의 흡수 파장과 비교하여 다른 파장영역에서 발광특성을 나타낸다. 이러한 에너지 준위의 이동에 의하여 Fig. 4에서와 같은 발광 특성을 갖는다. (a)는 100 W, 50%의 증착 조건에서 ZnO:Er 분말의 경우 575 nm에서의 강한 발광과 520 nm 근처에서 약한 발광을 보이고 있다. 반면, 박막의 경우 465 nm에서 강한 발광을 나타내고, 순수 ZnO의 발광 특성과 유사한 525 nm에서 약한 발광을 나타낸다. 박막에서의 465 nm 발광은  $^4I_{15/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$  에너지 전이에 의한 발광이고, 525 nm에서의 발광은  $^4I_{15/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$  에너지 전이에 의한 발광이다. 분말의 575 nm에서의 발광은  $^4I_{15/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$  에너지 전이에 의한 것이다.<sup>11)</sup> 이러한  $Er^{3+}$  이온의 에너지 전이 거동을 Fig. 5에 에너지 준위도를 통하여 나타내었다. 분말 상태인 경우와 박막 상태의 경우 발광 파장이 서로 다르게 나타나는 것은 결정성을 이유로 들 수 있다. 박막의 경우 (002) 방향으로의 배향성을 갖지만, 분말의 경우는 무질서한 방향성을 갖고 있다. 또한 서로 치밀도나 결합 등의 내부 불성도 다르다. 따라서 박막과 분말의 결정장 (crystal field)이 서로 다르게 되므로 발광 특성에 있어서도 이러한 차이를 나타내는 것이다.

Fig. 6은 스퍼터링 증착변수에 따른 ZnO:Er 박막의 결정 성장 특성에 대한 XRD 결과이다. 측정에 사용된 시편은 증착 후 대기 분위기에서 3시간동안 열처리 되었으며, 열처리 온도는 700°C이었다. 열처리 전의 박막의 XRD 패턴은 열처리 후와 비교하여 XRD 강도에 있어서만 약간의 차이를 나타냈을 뿐, 열처리 전후의 경향성과 c-축 (002) 면의 성장 특성은 차이가 없었다. 즉, 박막의 열처리 전후 결정성은 XRD 피크의 강도에만 약간의 변화를 줄 뿐 박막의 결정성과 경향성, c-축 (002)

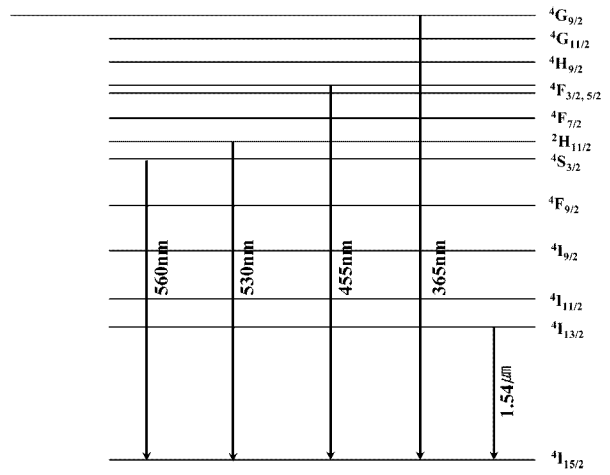


Fig. 5. The energy diagram of  $Er^{3+}$  ions.

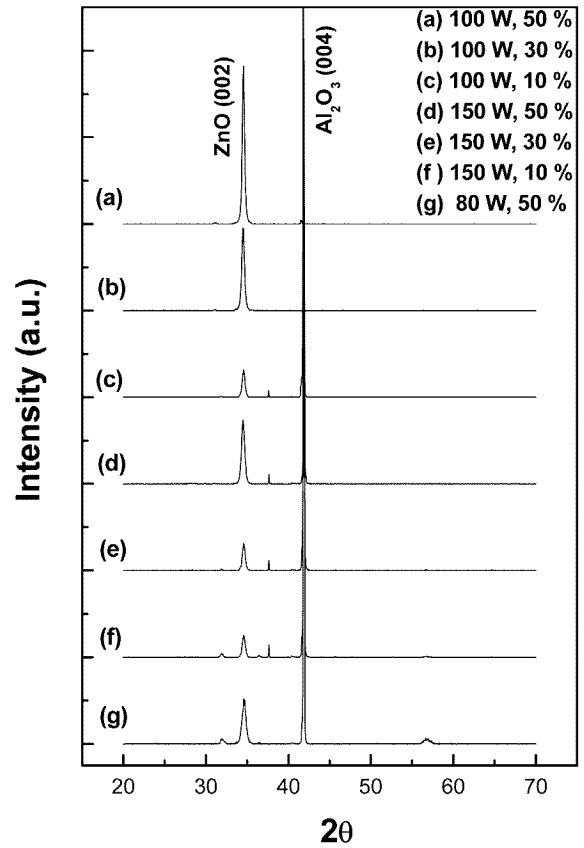


Fig. 6. XRD patterns of ZnO:Er thin films deposited at various rf power and oxygen partial pressure.

면의 성장과는 아무런 관계가 없는 것으로 나타났다. 그림에서 보여진 바와 같이, 열처리 후 모든 박막 시편에서 (002) 면의 피크만이 성장하고 있었으며, 100 W에서 증착한 경우가 ((a)~(c)), 150 W ((d)~(f))나 80 W (g)에서 증착한 것보다 결정성이 더 우수하게 나타났다. 또한

산소분압 ( $O_2/(Ar+O_2)$ )이 증가할수록 (002) 면의 피크가 최대 세기를 가지는 것으로 나타났다. 이는 50% 정도의 충분한 산소가 스퍼터링 중에 공급되어야 양질의 ZnO 박막이 얻어질 수 있기 때문이다. 결과적으로 rf 전력 100 W, 산소분압 50%인 조건에서 증착된 박막의 (002) 피크가 가장 강한 세기를 나타냈으며, 결정성이 가장 우수했다. rf 전력 100 W에서 증착한 박막에서 가장 결정성이 좋은 박막을 얻을 수 있었으며, 오히려 150 W에서는 결정성이 퇴화되고 있었다. 그 이유로는 다음과 같은 세 가지의 요인이 보고된 바 있다.<sup>12,13</sup> 첫째로, rf 전력이 선형 증가할 경우 증착속도도 증가하지만, c-축 배향성을 가진 박막을 성장시키기 위해 요구되는 안정한 자리를 차지하는데 필요한 충분한 시간을 공급받지 못하므로 빠른 증착속도는 결정 성장에 퇴화를 야기한다. 다음으로 rf 전력이 증가함에 따라서 기판 상의 ZnO 이온이 떨어져 나가 상대적으로 Zn 이온이 감소하게 된다. 높은 rf 전력에 의해 Zn 이온이 산화물 형태로 기판에서 떨어져나가기 때문에, 박막의 결정성에 있어서 표면 모폴로지에 악영향을 미치며 이에 따른 박막의 결정성 및 발광 특성의 저하가 발생하는 것이다. 셋째로 스퍼터링 시 높은 rf 전력에 의해 타겟으로부터 이차 전자의 에너지가 방출되는 것이다. 이는 박막의 성장에 스트레스를 주어 박막 내의 무질서를 발생시킨다. 이와 같은 현상 때문에 150 W 이상의 높은 rf 전력에서 증착한 경우 박막의 결정성이 퇴화된 것이다. 이러한 결과는 Fig. 7에서도 나타났다. rf 전력 100 W, 산소분압 50%의 조건에서 증착한 박막의 FWHM(full width half maximum)은 약  $0.28^\circ$ 으로 100 W, 10% 조건의  $0.45^\circ$ , 150 W, 50% 조건의  $0.38^\circ$ 와 비교하여 우월한 결정성을 나타냈다.

산소분압의 변화에 따른 PL 스펙트럼을 Fig. 8에 나타내었다.  $300^\circ\text{C}$ 의 기판온도에서 증착된 박막은  $700^\circ\text{C}$ 의 열처리 온도에서 3시간동안 대기 분위기에서 열처리하였

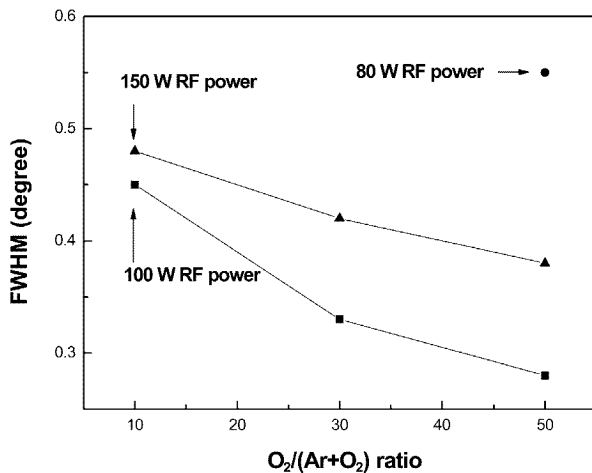


Fig. 7. FWHM of (002) plane of ZnO:Er thin films.

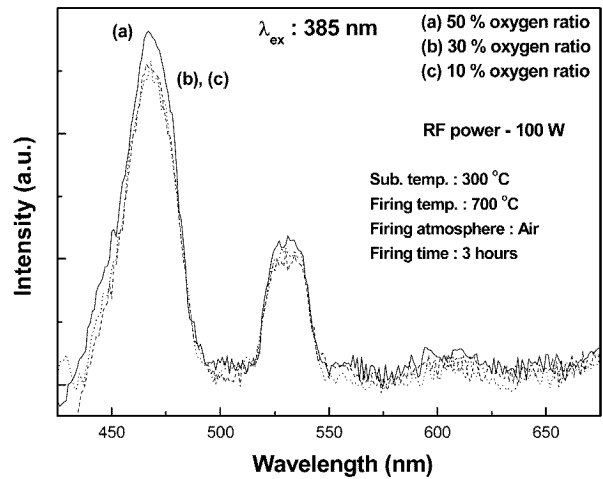


Fig. 8. PL spectra of ZnO:Er thin films as a function of various  $O_2/(Ar+O_2)$  ratio.

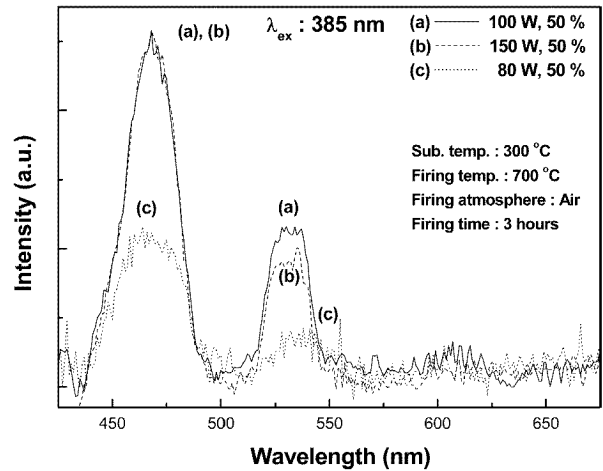


Fig. 9. PL spectra of ZnO:Er thin films as a function of various rf power.

다. 여기파장을 385 nm로 고정하고 측정하였을 때, 그림에서 보여지는 바와 같이 산소분압의 증가에 따른 발광 특성의 현저한 변화는 관찰되지 않았다. (a)의 경우, (b), (c)보다 다소 높은 발광 강도를 나타냈으나 그 차이는 매우 미약하다. rf 전력에 따른 PL 특성을 보았을 때, Fig. 9에서와 같이 100 W와 150 W에서 증착한 박막의 발광 강도가 80 W에서 증착한 것 보다 높은 발광 강도를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 PL 발광 특성은 산소분압에 대해서는 큰 영향을 받지 않았고, rf 전력에 대해서는 발광 강도의 차이가 나타났다. 산소 분압의 증가에 따라서 FWHM 값은 100 W와 150 W 모두에서 작아지고 있었으며, 150 W보다는 100 W에서 더 작은 FWHM 값을 보이고 있었다.

Fig. 10은 기판 온도에 따른 ZnO:Er 박막의 결정성과

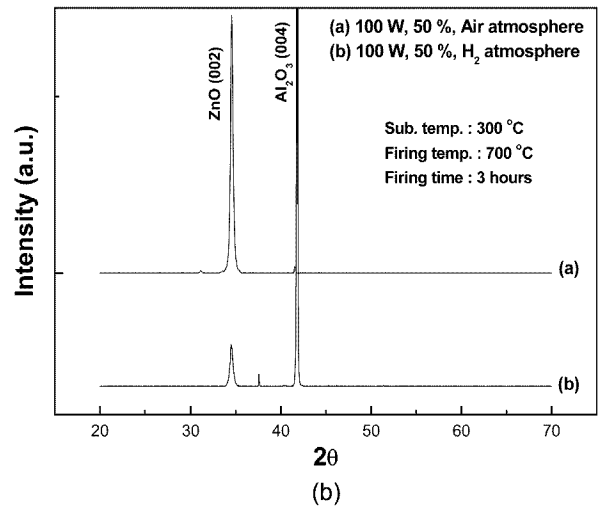
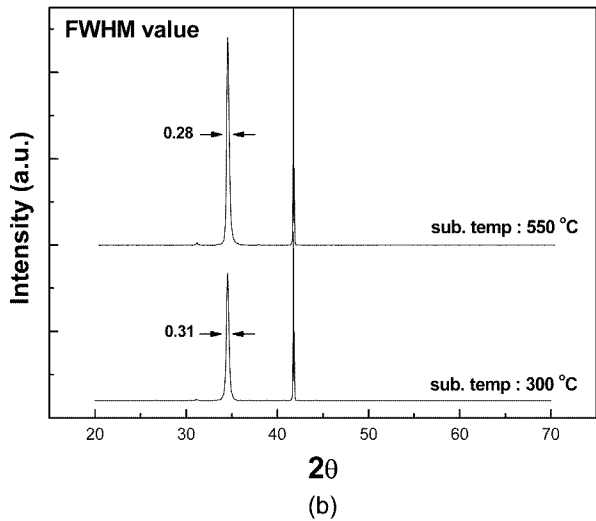
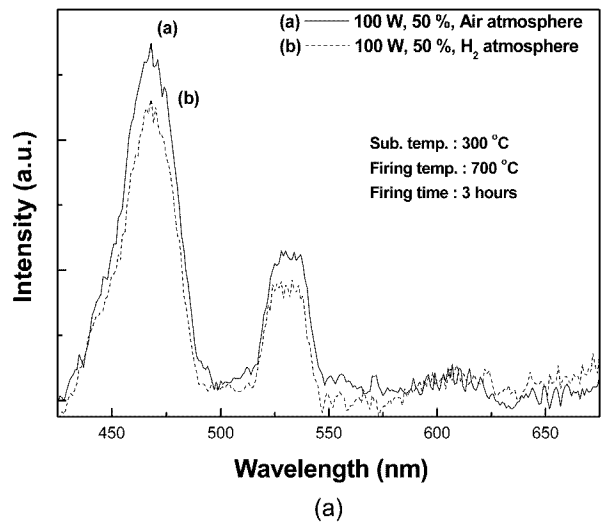
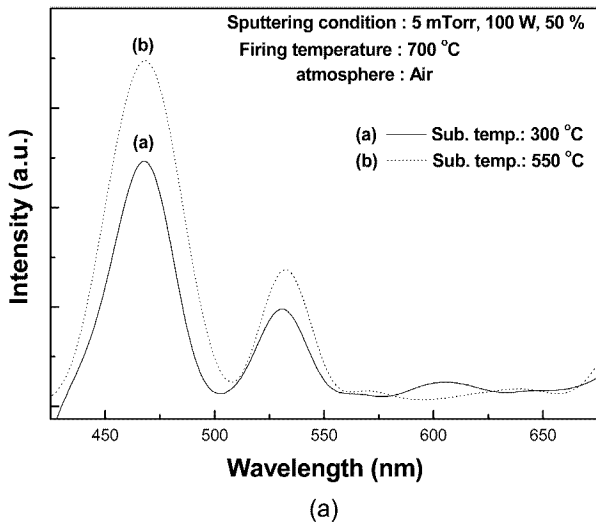


Fig. 10. (a) PL spectra and (b) XRD patterns of ZnO:Er thin films as a function of substrate temperature.

Fig. 11. (a) PL spectra and (b) XRD patterns of ZnO:Er thin films as a function of different annealing atmosphere air and H<sub>2</sub>.

발광 특성에 대해 XRD 데이터와 PL 스펙트럼을 나타냈다. 300°C의 기판 온도에서 증착한 박막의 발광 강도가 550°C의 기판온도에서 증착한 박막보다 강한 발광 강도를 갖는 것을 알 수 있다. 또한 (b)에서와 같이 기판 온도가 높을수록 (002) 피크의 강도가 더 세게 나타났다. 이는 기판의 온도가 증가함에 따라서 박막이 성장할 수 있는 충분한 열에너지가 공급되었기 때문이다. 높은 기판 온도로 인하여 박막이 증착되는 동시에 ZnO의 성장이 일어나기 때문에 낮은 기판 온도에서 증착한 박막보다 결정성이 우수한 것이다. Fig. 11의 (a)에 열처리 분위기에 따른 PL 발광 특성을 나타내었다. 대기 분위기에 열처리 했을 경우 수소 분위기에서 열처리 한 것보다 강한 발광 강도를 나타냈다. 이는 열처리 분위기에 따른 박막의 결정 성장 특성으로부터 알 수 있는데, (b)에 나타난 바와 같이 대기 분위기에 열처리할 경우 수

소 분위기에서 열처리한 것 보다 매우 강한 (002) 피크를 갖는다. 이는 열처리 분위기가 박막의 결정 성장에 크게 기인하는 것으로 볼 수 있다. 대기 분위기와 수소 분위기에 열처리한 경우 각각 다른 결합 농도와 종류를 만들게 되며, 이로 인하여 PL 강도와 결정성의 차이가 발생하게 된다. 또한 열처리 온도에 따른 ZnO:Er 박막의 발광 특성과 결정 성장 특성을 고찰한 결과 700°C 이상의 열처리 온도에서는 발광 특성에서 큰 차이를 나타내지 않았으며, 마찬가지로 결정 성장 특성에 있어서도 큰 차이를 드러내지 않았다. 이러한 결과로 볼 때, PL 특성 및 결정 성장 특성에 있어서 열처리 온도는 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나 열처리 분위기는 결정 성장 특성 및 PL 특성에 크게 기여하는 것으로 나타났다. 결과적으로 강한 환원 분위기가 발광 중심(luminescent center)으로 작용하는 산소 공공의 재회발(re-evaporation)을 과

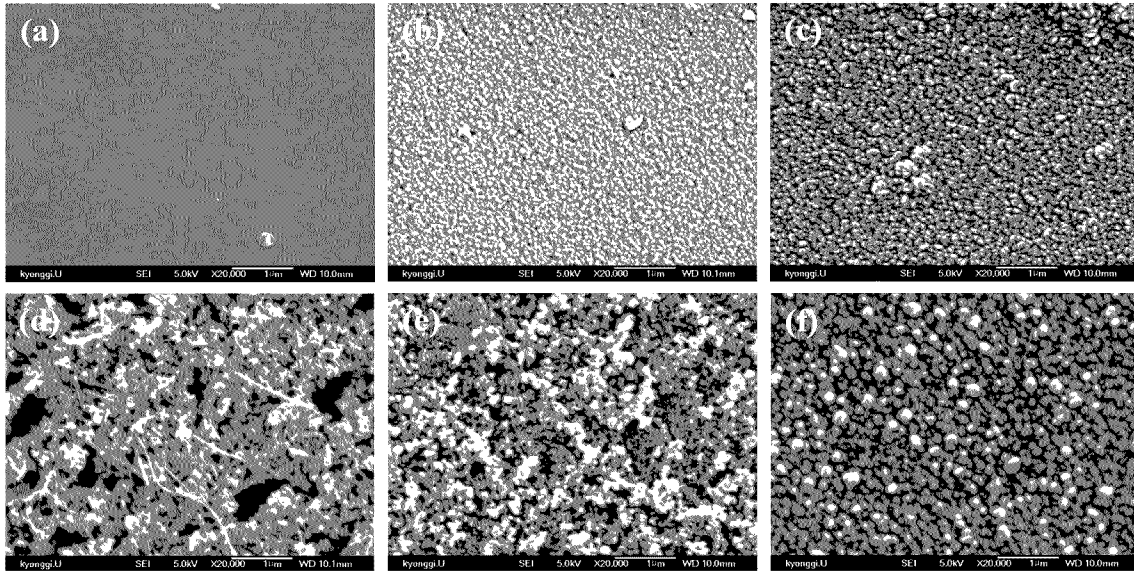


Fig. 12. SEM micrograph of ZnO:Er thin films deposited at various  $O_2/(Ar+O_2)$  ratio and annealing atmospheres at 100 W rf power. At air atmosphere: (a) 10%, (b) 30% and (c) 50%. At 5%  $H_2$  atmosphere: (d) 10%, (e) 30% and (f) 50%.

도하게 발생시키고, 이에 따라 과잉 산소 공공이 발생되며 이것이 발광 저해 요소(luminescent killer)로 작용하게 됨에 따라 발광 강도에서 현저히 저하된 결과를 나타냈다.<sup>7)</sup> 이는 Fig. 12의 SEM 이미지로부터 증명될 수 있다. 대기 분위기에서 열처리된 박막의 경우 표면이 균일하지만, 수소 분위기에서 열처리할 경우 (d)와 (e)에서 처럼 박막의 표면에서 원자가 재회발된 것을 확인할 수 있다. 결국 강한 환원 분위기에서는 기판에 증착된 박막의 결합이 파괴되며 재회발되고, 이에 따른 발광 특성, 결정성의 저해 요소로 작용하게 된다.

#### 4. 결 론

ZnO:Er 박막을 rf 마그네트론 스퍼터링 법으로 c-plane 사파이어 기판에 c축 배향성 박막을 증착하였다. 결정 성장 특성과 PL 특성은 열처리 온도 및 분위기와 스퍼터링 증착 변수(산소분압, 기판온도, rf 전력)에 크게 의존하고 있었다. PL 특성에 있어서 465 nm의 강한 청색 발광과 525 nm의 약한 녹색 발광을 나타냈다. 465 nm의 청색 발광은  ${}^4F_{5/2}-{}^4I_{15/2}$  에너지 전이에 의한 발광이며, 525 nm의 녹색 발광은  ${}^2H_{11/2}-{}^4I_{15/2}$  에너지 전이에 의한 발광이다. 실험적으로 나타난 최적의 증착 조건은 rf 전력 100 W, 산소분압 50%의 조건이었다. 산소 분압과 열처리 온도는 발광 특성에 크게 기여하지 않았으나, 열처리 분위기와 rf 전력은 결정성과 발광 특성에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 강한 환원 분위기는 발광 중심으로 작용하는 산소 공공을 과량으로 발생시키게 되며, 이것은 오히려 발광 저해 요소(luminescent killer)로

작용하여 PL 특성을 저하시킴을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단(2005년도 특정기초연구 R01-2005-000-10530)의 지원에 의하여 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

1. S. Ohnishi, Y. Hirogawa, T. Shiosaki and A. Kawabata, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **17**(5), 773 (1978).
2. C. Klingshirin, *Phys. Stat. ol.*, **B71**, 547 (1975).
3. D. C. Reynold, D. C. Look, B. Jogai and H. Morko, *Solid State Commun.*, **101**, 643 (1997).
4. X. T. Zhang, Y. C. Liu, J. G. Ma, Y. M. Lu, D. Z. Shen, W. Xu, G. Z. Zhong and X. W. Fan, *Thin Solid Films*, **413**, 257 (2002).
5. J. E. Nause, *Cermet Inc., III-Vs Rev.*, **12**, 4 (1999).
6. K. Vanheusden, C. H. Seager, W. L. Warren, D. R. Tallant and J. A. Voigt, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 403 (1996).
7. H. Song and Y. J. Kim, *Kor. J. Matrl. Res.*, **16**, 58 (2006).
8. J. B. Lounsbury, *J. Vac. Sci. Technol.*, **6**, 838 (1969).
9. D. C. Reynold, D. C. Look, B. Jogai and H. Morko, *Solid State Commun.*, **101**, 643 (1997).
10. S. Bachir, K. Azuma, J. Kossanyi, P. Valat and J. C. Ronfard-Haret, *J. Lumin.*, **75**, 35 (1997).
11. T. Fukudome, A. Kaminaka, H. Ishiki, R. Saito. S. Yugo and T. Kimura, *Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res.*, **B 206**, 287 (2003).
12. Y. J. Kim, Y. T. Kim, H. K. Yang, J. C. Park, J. I. Han, Y. E. Lee and H. J. Kim, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A15**, 1103 (1997).
13. C. R. Aita and R. J. Lad, *J. Appl. Phys.*, **51**, 6405 (1980).