

열처리 온도 변화에 따른 라디오파 마그네트론 스퍼터링으로 성장된 $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막의 특성

조신호*

신소재공학과, 신라대학교, 부산, 46958

Properties of $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ Phosphor Thin Films Grown by Radio-frequency Magnetron Sputtering Subjected to Thermal Annealing Temperature

Shinho Cho*

Department of Materials Science and Engineering, Silla University, Busan, 46958, Korea

ABSTRACT: Eu^{3+} -activated MgMoO_4 phosphor thin films were grown at 400°C on quartz substrates by radio-frequency magnetron sputter deposition from a 15 mol% Eu-doped MgMoO_4 target. After the deposition, the phosphor thin films were annealed at several temperatures for 30 min in air. The influence of thermal annealing temperature on the structural and optical properties of $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ phosphor thin films was investigated by using X-ray diffraction (XRD), photoluminescence (PL), and ultraviolet-visible spectrophotometry. The transmittance, optical band gap, and intensities of the luminescence and excitation spectra of the thin films were found to depend on the thermal annealing temperature. The XRD patterns indicated that all the thin films had a monoclinic structure with a main (220) diffraction peak. The highest average transmittance of 91.3% in the wavelength range of 320~1100 nm was obtained for the phosphor thin film annealed at 800°C . At this annealing temperature the optical band gap energy was estimated as 4.83 eV. The emission and excitation spectra exhibited that the $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ phosphor thin films could be effectively excited by near ultraviolet (281 nm) light, and emitted the dominant 614 nm red light. The results show that increasing RTA temperature can enhance Eu^{3+} emission and excitation intensity.

Key words: Thin film, Annealing, Sputtering, Phosphor

1. 서론

최근에 무기물 형광체 박막은 전계발광 소자, 평면 디스플레이, 태양전지, 고체 레이저, 전기변색 창(electrochromic window)과 같은 분야에 광범위하게 응용할 수 있기 때문에 많은 관심을 끌고 있다¹⁻³. 특히, 전계발광 소자의 특성과 발광 세기를 향상시키기 위해서는 기본 색깔인 적색, 녹색, 청색 형광체 박막 형성 기술은 필수적이다. 일반적으로 박막형 형광체는 분말형 형광체에 비해 결정 입자의 조밀한 조성으로 인하여 단위 밀도와 균일성이 높고, 물질 내부의 기공이 적어 열 및 화학적 안정성이 좋고, 기판과의 접착력이 좋아서 강도가 크고, 발광 감쇄시간(decay time)이 짧아서 잔광 효과가 작고 응답이 빠른 장점을 제

공한다⁴).

MgMoO_4 결정은 철망간중석(wolframite)형의 금속 몰리브덴산염에 속하며, 자외선 영역에서 강한 흡수 밴드와 우수한 열적 안정성 때문에 고효율의 적색 형광체를 제조하기에 적합한 모체 격자로 알려져 있다⁵. 희토류 이온 중에서, 유로퓸(europium) 3가 이온 Eu^{3+} 는 대표적인 $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_J$ ($J=1, 2, 3, 4$) 전이에 의한 밴드폭이 좁고 580~700 nm 파장 영역의 적색 빛을 방출하는 최적의 발광 물질로 보고되고 있기 때문에, $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 형광체는 높은 색 순도와 우수한 발광 세기로 인하여 디스플레이와 백색 발광 소자에 응용하기에 적합한 후보 물질로 판단된다⁶. 하지만 $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 분말 형광체 제조에 관한 논문은 다소 발표되고 있으나, 박막형 형광체에 대한 보고는 거의 없는 형편이다.

지금까지 박막형 형광체의 발광 세기, 결정 입자의 형태, 박막의 두께와 표면 거칠기를 제어하기 위하여 서로 다른 증착 방법, 여러 종류의 모체 격자와 불순물의 결합, 기판 종류, 증착 온도,

*Corresponding author: scho@silla.ac.kr

Received January 26, 2016; Revised February 29, 2016;

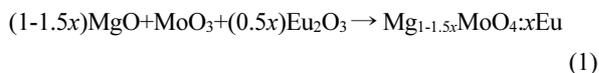
Accepted February 29, 2016

챔버 내의 가스 압력, 열처리 온도 등의 변수를 다양하게 변화시켜 왔다. Dlamini 등⁷⁾은 펄스 레이저 증착법을 사용하여 SiO₂/Si(100) 기판 위에 Y₃(Al,Ga)₅O₁₂:Ce³⁺ 형광체 박막을 서로 다른 기판 온도, 펄스의 개수, 두 종류의 가스 분위기로 증착하였으며, 최대 발광 세기는 증착 온도 300°C에서 성장된 박막에서 발생하였으며, 거친 표면을 가진 박막에서 발광 세기가 편평한 표면의 박막에서 보다 높은 발광 세기를 나타냄을 보고하였다. Ahmed 등⁸⁾은 라디오파(radio frequency) 마그네트론 스퍼터링을 사용하여 각각 사파이어와 실리콘 기판 위에 ZnO와 ZnO:Eu 박막을 성장하여 두 종류의 기판이 박막에 미치는 효과를 조사하였다. 그들은 Eu³⁺ 이온이 방출하는 적색 발광의 세기가 실리콘 기판 보다는 사파이어 기판 위에 증착한 박막에서 약 5배 증가함을 보고하였다. Kominami 등⁹⁾은 전자빔 증발법(electron beam evaporation technique)을 사용하여 석영 기판 위에 SrGa₂S₄:Eu²⁺ 박막을 성장한 후에 Nd:YAG 레이저를 조사하여 형광체 박막을 성공적으로 결정화시켰으며, 진동수 8 kHz와 에너지 밀도 14.7 mJ/cm²을 갖는 Nd:YAG 레이저를 500,000회 이상 조사할 때 형광체 박막의 발광 특성이 향상됨을 보고하였다.

본 연구에서는 급속 열처리 온도가 라디오파 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 증착 온도 400°C에서 석영 기판 위에 성장된 Eu³⁺ 이온이 도핑된 MgMoO₄ 형광체 박막의 구조, 밴드갭 에너지, 흡광과 발광 세기에 미치는 영향을 조사하였다. 열처리 기술은 박막 내의 결함(defect)과 응력(stress)을 제거하고 모체 격자 내에 도핑된 불순물 이온을 활성화시켜 형광체 박막의 광학적 특성을 향상시키는 중요한 역할을 하기 때문에 본 연구에서는 열처리 온도를 고품질의 형광체 박막 성장의 변수로 선택하였다. 열처리 온도가 증가함에 따라 광학 투과율과 밴드갭 에너지의 변화가 관측되었다. 이외에도, 발광과 흡광 파장의 세기와 열처리 온도와의 상관관계를 체계적으로 조사하였다.

2. 실험

MgMoO₄:Eu³⁺ 형광체 박막은 라디오파 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 증착 온도 400°C에서 석영 기판 위에 증착한 후에 연달아 서로 다른 온도 750, 800, 850, 900°C에서 열처리를 수행하여 제작하였다. 직경 1 인치와 두께 13 mm를 갖는 MgMoO₄:Eu³⁺ 스퍼터링 타겟은 전통적인 고체상태 반응법(solid-state reaction method)을 사용하여 초기 물질 MgO (순도: 99.9%), MoO₃ (99.9%), Eu₂O₃ (99.5%)을 화학 양론적으로 준비하였다. Eu³⁺ 이온의 몰비(x)를 15 mol%로 선택하였으며, 화학 반응식은 식(1)과 같다:



초기 물질은 1100°C에서 5 시간의 소결 공정을 거쳐 합성하였으며, 자세한 합성 방법은 참고문헌[10]에서 볼 수 있다. 합성된 형광체 분말은 프레스를 사용하여 40 MPa의 힘을 30분 동안 인가하여 직경 1 인치의 원형 소결체로 제조하였고, 세라믹 타겟의 파손을 방지하기 위하여 두께 1 mm의 무산소 고 전기전도도 동판(oxygen free high conductivity copper)을 에폭시를 사용하여 원형 소결체 뒷면에 지지판(backing plate)으로 결합하였다. 기판은 시편 고정대에 장착하기 전에 에탄올과 증류수로 각각 10분씩 초음파 세척을 실시하였다. 스퍼터링 챔버의 초기 진공도는 5×10^{-6} Torr 이하로 배기하였고, 증착시 진공도는 30 mTorr를 유지하였다. 스퍼터링 가스로 아르곤 가스를 사용하였으며, 질량 유량 제어기(mass flow controller)로 조절하여 40 sccm을 공급하였다. 기판과 타겟 사이의 거리를 5 cm로 고정하였고, 증착 온도 400°C에서 2시간 동안 40 W에서 증착하였다. 성장 후에 형광체 박막을 각각 750, 800, 850, 900°C에서 30분 동안 급속 열처리를 수행하였다.

형광체 박막의 결정 구조는 Cu-K_α 선(파장: 0.15406 nm)을 사용하는 X-선 회절 장치(Ultima IV, Rigaku)를 사용하여 회절 각 10~70°범위에서 측정하였으며, 박막의 흡광과 발광 스펙트럼은 형광 광도계(fluorescence spectrometer: FS-2, Scinco)를 사용하여 상온에서 조사하였다. 형광체 박막의 흡수율은 자외선-가시광 분광광도계(UV-vis spectrophotometer: Ultrospec-3300 Pro, Amersham)를 사용하여 200~1100 nm 영역에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 증착 온도 400°C에서 증착한 후에 750, 800, 850, 900°C에서 급속 열처리를 수행한 MgMoO₄:Eu³⁺ 형광체 박막을 XRD로 측정된 결과를 나타낸 것이다. 750°C에서 열처리한 형광체 박막의 경우에 26.40°에 중심을 갖는 (220)면에서 발생

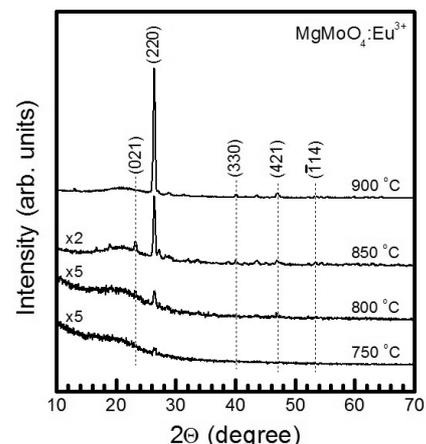


Fig. 1. XRD patterns of the MgMoO₄:Eu³⁺ phosphor thin films annealed at various thermal annealing temperatures

한 회절 피크와 함께, 회절 세기가 미약한 다수의 회절 피크로 구성되어 있다. 열처리 온도가 증가함에 따라 주 회절 피크(220)의 세기는 순차적으로 증가하였으며, 반치폭의 크기는 감소하였다. 이것은 열처리 온도가 증가함에 따라 형광체 박막의 결정성이 향상됨을 의미한다. 형광체 박막의 모든 회절 피크는 JCPDS #21-0961의 회절 상(phase)과 일치하였고, 결정 구조는 단사정계(monoclinic system) 이었다.

Fig. 2는 급속 열처리 온도를 달리하여 성장한 $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막에서 방출 파장 614 nm로 제어하였을 때 측정된 흡광 스펙트럼의 결과를 나타낸 것이다. 열처리 온도에 관계없이, 모든 형광체 박막에서 두 종류의 흡광 스펙트럼이 관측되었다. 첫째는 O^{2-} 음이온과 Eu^{3+} 양이온들 사이의 전하 전달 밴드(charge transfer band; CTB)에 의하여 발생하는 파장 영역 230~330 nm에 걸쳐서 광범위하게 존재하고 281 nm에 정점을 갖는 흡광 스펙트럼이고, 둘째는 Eu^{3+} 이온의 4f-4f 전이에 의한 흡광 신호이다. 특히, 364 nm에서 발생한 흡광 스펙트럼은 Eu^{3+} 이온의 ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_4$ 전이에 의하여 발생한 것이다¹¹⁾. 열처리 온도

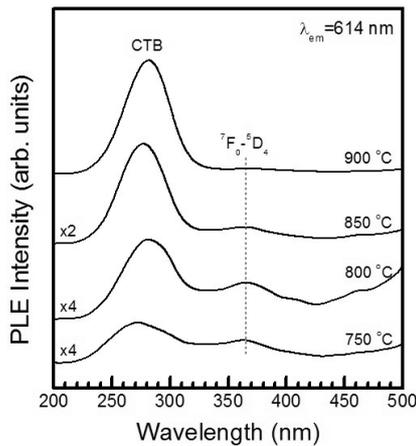


Fig. 2. Excitation spectra of the $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ phosphor thin films annealed at various thermal annealing temperatures

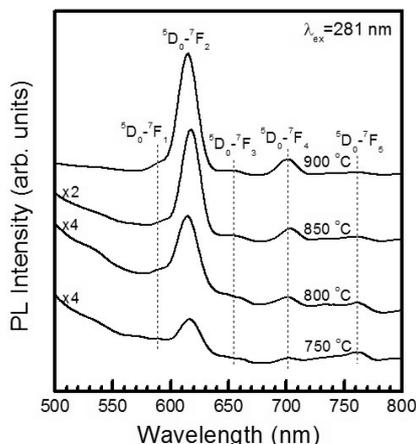


Fig. 3. Emission spectra of the $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ phosphor thin films annealed at various thermal annealing temperatures

가 증가함에 따라 두 종류의 흡광 스펙트럼의 세기는 순차적으로 증가하였다.

Fig. 3은 서로 다른 열처리 온도에서 제작한 $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막의 발광 스펙트럼을 나타낸 것이다. 파장 281 nm로 여기 시킨 형광체 박막의 발광 스펙트럼은 550~800 nm 파장 영역에서 관측되었는데, 이 발광 파장은 전형적인 Eu^{3+} 이온의 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_j$ ($J=1-5$) 전이에 의한 발광 신호이다. 발광 파장은 588, 614, 654, 701, 760 nm으로 구성되었다. 이 발광 스펙트럼은 Eu^{3+} 이온의 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$, ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$, ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_3$, ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_4$, ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_5$ 전이 신호에 의해 발생한 것이다¹²⁾. 상기의 발광 스펙트럼 중에서 614 nm에 피크를 갖는 적색 발광 스펙트럼의 세기가 제일 강하였다. 열처리 온도가 증가함에 따라 모든 발광 파장의 세기는 순차적으로 증가하여 900°C에서 열처리한 형광체 박막의 발광 세기가 제일 컸다. 여기서 588 nm의 주황색 발광 스펙트럼은 자기 쌍극자 전이(magnetic dipole transition) 신호이며, 614 nm의 적색 발광 스펙트럼은 전기 쌍극자 전이(electric dipole transition) 신호이다¹³⁾. 특히 주목할 점은 Eu^{3+} 이온의 ${}^5\text{D}_1 \rightarrow {}^7\text{F}_j$ 전이 신호에 의해서 500~570 nm에 나타나는 발광 스펙트럼은 관측되지 않았다는 것이다. Eu^{3+} 이온의 발광이 에너지 준위 ${}^5\text{D}_0$ 보다 높은 에너지 준위인 ${}^5\text{D}_1$ 과 ${}^5\text{D}_2$ 에서 발생하는지 여부는 모체 결정에 도핑된 Eu^{3+} 이온의 농도와 모체 결정에서 발생하는 격자 진동수와 연관되는 것으로 보고되고 있다¹⁴⁾. 본 연구의 경우에, 모체 격자에 도핑된 Eu^{3+} 이온의 농도(15 mol%)가 비교적 크기 때문에, 발광 센터인 두 인접한 Eu^{3+} 이온들 사이의 거리가 가까워져서 상호 이완(cross relaxation) 작용에 의하여 높은 에너지 준위 ${}^5\text{D}_1$ 와 ${}^5\text{D}_2$ 에서 발생하는 발광은 억제되고, ${}^5\text{D}_0$ 에너지 준위에서 발광이 주도적이 된다.

일반적으로 모체 격자 내에 위치하는 활성제 이온이 반전 대칭(inversion symmetry) 자리에 위치하면 자기 쌍극자 전이에 의한 발광 신호의 세기가 전기 쌍극자 전이에 의한 발광 신호의 세기에 비하여 크고, 활성제 이온이 비반전 대칭(non-inversion symmetry) 자리에 위치하면 자기 쌍극자 전이 신호의 세기가 전기 쌍극자 전이 신호의 세기에 비하여 작은 것으로 보고되고 있다¹⁵⁾. 본 연구의 경우에 750, 800, 850, 900°C에서 열처리를 수행한 형광체 박막의 경우에, 전기 쌍극자 전이(${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$)에 의한 614 nm의 적색 발광 스펙트럼의 세기가 자기 쌍극자 전이(${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$)에 의한 588 nm의 주황색 발광 스펙트럼의 세기에 비하여 각각 1.4, 1.8, 3.9, 6.8배 크기 때문에 모체 결정 MgMoO_4 내에 위치하는 활성제 이온 Eu^{3+} 는 비반전 대칭 자리에 위치함을 알 수 있다¹⁶⁾.

Fig. 4는 서로 다른 온도로 급속 열처리된 $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막의 광학 투과율을 자외선-가시광 분광계를 사용하여 파장 영역 200~1100 nm에서 측정된 결과를 나타낸 것이다. 750°C에서 열처리된 $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막의 평균 투과율은 파장 영역 320~1100 nm에서 90.4%이었다. 열처리 온도가 800°C로 증가함에 따라 평균 투과율은 증가하여 최대값 91.3%를 나타

내었으나, 열처리 온도가 더욱 증가함에 따라 평균 투과율의 값은 점점 감소하여 900°C에서 83.4% 이었다. 750°C와 800°C에서 열처리된 형광체 박막의 경우에 300~1100 nm 파장 영역에서 진동 파형이 관측되었는데, 이것은 입사 빛이 $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막과 석영 기판 사이의 두 경계면에서 반사되어 형성된 간섭 무늬로써, 형광체 박막과 기판 사이의 경계면이 광학적으로 미끄러운 평면으로 형성되어 있음을 의미한다¹⁷⁾. Fig. 4의 삽입 그림에서 보듯이, 750°C에서 열처리된 형광체 박막의 흡수단(absorption edge) 파장은 293 nm이었으며, 열처리 온도가 증가함에 따라 박막의 흡수단은 전반적으로 장파장 쪽으로 이동하여 900°C에서 열처리한 형광체 박막의 흡수단은 308 nm 이었다.

Fig. 5에서 보듯이, 서로 다른 온도에서 열처리된 $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막의 광학 밴드갭 에너지는 잘 알려진 T_{auc} 의 모델¹⁸⁾, $(\alpha h\nu)^2 \sim (h\nu - E_g)$ 관계식을 사용하여 결정하였다. 여기서 E_g 는 광학 밴드갭 에너지, α 는 흡수 계수, $h\nu$ 는 광자(photon) 에너지를 나타낸다. 열처리 온도 750, 800, 850, 900°C에서 제조된

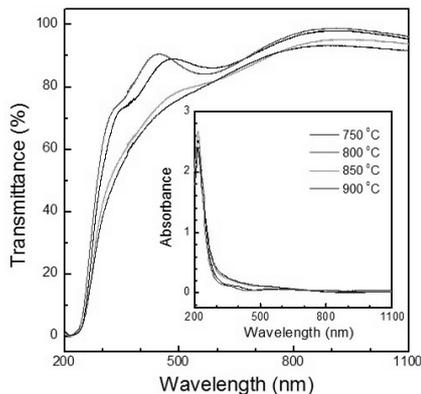


Fig. 4. Transmittance spectra of the $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ phosphor thin films annealed at different thermal annealing temperatures. The inset shows the wavelength dependence of absorbance spectra

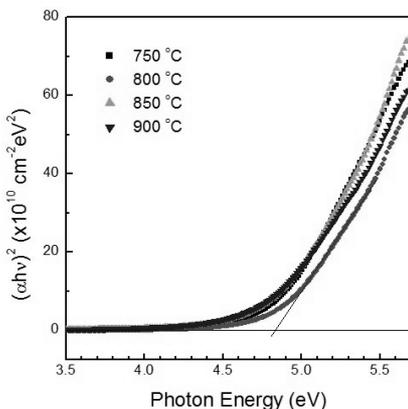


Fig. 5. Optical band gap energy of the $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ phosphor thin films annealed at different thermal annealing temperatures

형광체 박막의 밴드갭 에너지는 각각 4.82, 4.83, 4.78, 4.73 eV로 측정되었다. 열처리 온도의 변화에 따른 형광체 박막의 밴드갭 에너지의 변화는 박막의 흡수율, 결정성, 기판과 박막 사이의 결합력, 불순물의 밀도 변화와 같은 여러 요인 중에서 본 연구의 경우에는 형광체 박막과 석영 기판 사이의 결합력이 중요한 역할을 한 것으로 판단된다¹⁹⁾.

4. 결론

$\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막을 라디오파 마그네트론 스퍼터링 방법으로 400°C에서 증착한 후에 온도 750~900°C에서 급속 열처리를 수행하여 제조한 형광체 박막의 결정 구조와 광학 특성을 조사하였다. 열처리 온도에 무관하게 모든 형광체 박막의 결정 구조는 JCPDS #21-0961와 일치하는 단사정계이었다. 형광체 박막의 흡광 스펙트럼은 281 nm에 피크를 갖는 전하 전달 밴드와 Eu^{3+} 이온의 ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_4$ 전이(364 nm) 신호로 구성되었다. 파장 281 nm로 여기 시켰을 때 형광체 박막의 발광 파장은 전형적인 Eu^{3+} 이온의 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$ ($J=1-5$) 전이 신호를 나타내었고, 이 중에서 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ (614 nm) 전기 쌍극자 전이 신호의 세기가 최대이었다. 이것은 모체 결정 내에 위치하는 Eu^{3+} 이온은 비반전 대칭 자리에 위치함을 나타낸다. 모든 형광체 박막의 평균 광학 투과율은 320~1100 nm 영역에서 83% 이상 이었다. 위의 결과는 $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 형광체 박막이 백색 발광 소자로 응용할 수 있는 적색 발광 소재임을 입증한다.

References

1. X. Liu, Y. Fan, S. Chen, M. Gu, C. Ni, B. Liu, S. Huang, "Luminescence properties of Li-codoped $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ thin-film phosphors prepared by sol-gel processing", *Mater. Res. Bull.* Vol. 48, No. 6, pp. 2370-2374, 2013.
2. H. Fukada, K. Ueda, J. Ishino, T. Miyata, T. Minami, "Blue PL and EL emissions from Bi-activated binary oxide thin-film phosphors", *Thin Solid Film*, Vol. 518, No. 11, pp. 3067-3070, 2010.
3. S. L. Jones, D. Kumar, R. K. Singh, P. H. Holloway, "Luminescence of pulsed laser deposited Eu doped yttrium oxide films", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 71, No. 3, pp. 404-406, 1997.
4. S. W. Park, B. K. Moon, B. C. Choi, J. H. Jeong, J. S. Bae, K. H. Kim, "Red photoluminescence of pulsed laser deposited $\text{Eu}:\text{NaY}(\text{MoO}_4)_2$ thin film phosphors on sapphire substrates", *Curr. Appl. Phys.* Vol. 12, No. 2, pp. S150-S155, 2012.
5. L. Y. Zhou, J. S. Wei, L. H. Yi, F. Z. Gong, J. L. Huang, W. Wang, "A promising red phosphor $\text{MgMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ for white light emitting diodes", *Mater. Res. Bull.* Vol. 44, No. 6, pp. 1411-1414, 2009.
6. S. Gao, H. Zhang, R. Deng, X. Wang, D. Sun, G. Zheng,

- “Engineering white light-emitting Eu-doped ZnO urchins by biopolymer-assisted hydrothermal method”, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 89, No. 12, pp. 123125-1-123125-3, 2006.
7. S. T. S. Dlamini, H. C. Swart, O. M. Ntwaeaborwa, “Photoluminescence properties of $Y_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce^{3+}$ thin phosphor films grown by pulsed laser deposition”, *Physica B*, Vol. 439, pp. 88-92, 2014.
 8. S. M. Ahmed, P. Szymanski, M. A. El-Sayed, Y. Badr, L. M. El-Nadi, “The photoluminescence properties of undoped & Eu-doped ZnO thin films grown by RF sputtering on sapphire and silicon substrates”, *Appl. Surf. Sci.* Vol. 359, pp. 356-363, 2015.
 9. H. Kominami, T. Yamasaki, Y. Nakanishi, K. Hara, “Study of crystallization process of Eu doped $SrGa_2S_4$ thin film phosphors by two electron beams evaporation and 355 nm Nd:YAG laser-annealing”, *J. Lumin.* Vol. 132, No. 12, pp. 3100-3102, 2012.
 10. S. Cho, “Synthesis and luminescent properties of Eu^{3+} -doped ZnO phosphors”, *J. Korean Phys. Soc.* Vol. 66, No. 10, pp. 1559-1563, 2015.
 11. G. H. Lee, S. Kang, “Studies in crystal structure and luminescence properties of Eu^{3+} -doped metal tungstate phosphors for white LEDs”, *J. Lumin.* Vol. 131, No. 12, pp. 2606-2611, 2011.
 12. Y. Dwivedi, S. C. Zilio, “Infrared cascade and cooperative multicolor upconversion emissions in $Y_8V_2O_{17}:Eu:Yb$ nano-phosphors”, *Opt. Express*, Vol. 21, No. 4, pp. 4717-4727, 2013.
 13. Z. Li, Y. Zhong, S. Gao, “Luminescent properties of red phosphors $K_2Ba(MoO_4)_2:Eu^{3+}$ for white light emitting diodes”, *J. Rare Earth.* Vol. 30, No. 10, pp. 990-994, 2012.
 14. X. Liu, C. Lin, J. Lin, “White light emission from Eu^{3+} in $CaIn_2O_4$ host lattices”, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 90, No. 8, pp. 081904-2-081904-3, 2007.
 15. S. Shi, J. Gao, J. Zhou, “Effects of charge compensation on the luminescence behavior of Eu^{3+} activated $CaWO_4$ phosphor”, *Opt. Mater.* Vol. 30, No. 10, pp. 1616-1620, 2008.
 16. K. G. Lee, B. Y. Yu, C. H. Pyun, S. I. Mho, “Vacuum ultraviolet excitation and photoluminescence characteristics of $(Y,Gd)Al_3(BO_3)_4/Eu^{3+}$ ”, *Solid State Commun.* Vol. 122, No. 9, pp. 485-488, 2002.
 17. S. Cho, “Structural, optical, and electrical properties of RF-sputtered indium oxide thin films”, *J. Korean Phys. Soc.* Vol. 60, No. 12, pp. 2058-2062, 2012.
 18. C. H. Kim, J. H. Lee, H. S. Kim, W. J. Lee, J. H. Kim, “Effect of buffer layers on the structural properties of PLD-grown $Mg_{0.5}Zn_{0.5}$ films on c-sapphire”, *J. Korean Phys. Soc.* Vol. 60, No. 10, pp. 1656-1661, 2012.
 19. X. K. Mahmood, S. Bashir, M. K. U. Rahman, N. Farid, M. Akram, A. Hayat, F. U. Haq, “Effects of substrate temperature on structural, optical and surface morphological properties of pulsed laser deposited ZnO thin films”, *Surf. Rev. Lett.* Vol. 20, Nos. 3&4, pp. 1350032-1-1350032-7, 2013.