

Ba₂Mg(PO₄)₂:Eu 형광체의 합성과 자외선 여기하의 발광특성

태세원 · 정하균[†] · 최성호 · 허남희*

한국화학연구원 화학소재연구단

*서강대학교, 화학과

Preparation of Ba₂Mg(PO₄)₂:Eu Phosphors and Their Photoluminescence Properties Under UV Excitation

Se-Won Tae, Ha-Kyun Jung[†], Sungho Choi, Nam-Hwi Hur

Advanced Materials Division, Korea Research Institute of Chemical Technology

P.O. Box 107, Yuseong, Daejeon 305-600, Korea

*Dept. of Chemistry, Sogang University P.O. Box 1142, Mapo, Seoul 121-742, Korea

(2008년 9월 19일 접수 : 2008년 11월 4일 최종수정 : 2008년 11월 10일 채택)

ABSTRACT For possible applications as luminescent materials for white-light emission using UV-LEDs, Ba₂Mg(PO₄)₂:Eu²⁺ phosphors were prepared by a solid state reaction. The photoluminescence properties of the phosphor were investigated under ultraviolet ray (UV) excitation. The prepared phosphor powders were characterized to from a single phase of a monoclinic crystalline structure by a powder X-ray diffraction analysis. In the photoluminescence spectra, the Ba₂Mg(PO₄)₂:Eu²⁺ phosphor showed an intense emission band centered at the 584 nm wavelength due to the f-d transition of the Eu²⁺ activator. The optimum concentration of Eu²⁺ activator in the Ba₂Mg(PO₄)₂ host, indicating the maximum emission intensity under the excitation of a 395 nm wavelength, was 5 at%. In addition, it was confirmed that the Eu²⁺ ions are substituted at both Ba²⁺ sites in the Ba₂Mg(PO₄)₂ crystal. On the other hand, the critical distance of energy transfer between Eu²⁺ ions in the Ba₂Mg(PO₄)₂ host was evaluated to be approximately 19.3 Å. With increasing temperature, the emission intensity of the Ba₂Mg(PO₄)₂:Eu phosphor was considerably decreased and the central wavelength of the emission peak was shifted toward a short wavelength.

Key words LED (Light Emitting Diode), phosphors, Ba₂Mg(PO₄)₂:Eu

1. 서 론

이제까지 조명 분야의 대부분을 차지하고 있던 백열전등과 형광등을 대체할 수 있는 조명 방식으로 최근에 대두되고 있는 것이 저전력 소모, 긴 수명 그리고 무수은 친환경성과 같은 다양한 장점들을 가지고 있는 백색 LEDs(Light Emitting Diode) 기술이다. LED는 P-N 접합 반도체로 구성된 다이오드로 발광효율이 매우 우수하며, 전자의 이동속도가 높고 고온에서 동작이 가능하다.¹⁾

보통의 반도체 소자와 마찬가지로 LED 소자 그 자체는 칩(chip)이라 불리우며 그 크기가 보통 수백 마이크로미터로 매우 작다. 일반적으로 LED를 이용하여 백색을 구현하는 두 가지 방법이 알려져 있다. 기존의 방법으로는 1993년 일본의 나카무라가 발명한 450 nm 발광의 GaN 청색 칩과 YAG:Ce³⁺ 황색형광체의 조합으로 백색을 구

현하는 방식으로서 이미 소자가 상용화되어 있다.^{2,4)} 그러나 색연색지수(color rendering index)가 75 정도로 낮고 색온도가 상대적으로 높다는 문제점이 있다.⁵⁻⁶⁾ 이와 같은 단점을 극복하고 고효율의 백색 LED를 제조하기 위하여 최근에 각광받고 있는 방법이 UV-LED칩에 각각의 적색, 녹색, 청색 형광체들을 조합하여 백색을 구현하는 것이다.⁷⁾ UV-LED칩을 사용하는 백색 구현 기술은 기존의 방법과 비교하여 색연색지수, 색 온도, 색재현 범위에서 보다 우수한 발광특성을 나타내기 때문에 백색을 나타내는데 있어 보다 큰 장점을 갖게 된다.⁸⁻¹³⁾ 따라서 장파장 자외선을 여기원으로 하는 UV-LED 칩 위에 적색, 녹색, 청색 발광을 하는 형광체를 도포하는 방법으로 저비용, 고효율, 우수한 색순도의 특성을 갖는 백색 LED를 제조하는 것이 가능하다. 이러한 관점에서 UV-LED에 적합한 고효율의 발광특성을 나타내는 형광체의 개발이 매우 중요하다.

Eu²⁺ 이온이 활성제로 도핑된 형광체의 발광은 Eu²⁺의 f-d 에너지 전이에 의한 것으로 4f 궤도들의 전자가 들

[†]Corresponding author

E-Mail : hakyun@kriict.re.kr (H. K. Jung)

며 5d의 전자궤도를 점유하게 되어, d 궤도의 전자는 f 궤도의 전자만큼 잘 차폐되지 못해 모체의 결정장에 의해 크게 영향 받는다. 결과적으로 낮은 준위인 t_{2g} 에서 바닥상태인 $4f_7$ 으로 내려올 때 빛이 방출된다. 따라서 활성제 Eu^{2+} 은 모체에 따라 발광파장의 위치가 크게 달라지며 넓은 밴드형의 발광스펙트럼 특성을 나타내므로 조명을 목적으로 하는 형광체의 활성제로 매우 적합하다.

예를 들어, $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$ 모체에 Eu^{2+} 이온이 도핑된 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ 형광체의 경우 진공자외선 여기조건과 자외선 여기조건 하에서 발광 중심파장 450 nm의 청색 영역에서 휘도(brightness)가 우수하기 때문에 플라즈마 디스플레이 패널(PDP) 및 LCD 백라이트의 구성요소인 냉음극 형광램프(CCFL)용 청색형광체로 널리 사용되고 있다. 그리고 모체 SrGa_2S_4 에 Eu^{2+} 이온이 도핑된 경우에는 자외선 여기조건 하에서 중심파장 535 nm의 녹색 영역에서 우수한 발광특성을 나타내기 때문에 LED용 형광체로 이용되고 있다.¹⁴⁻¹⁶⁾

한편, 포스페이트 화합물들은 그들의 우수한 화학적, 물리적 안정성에 기인하여 $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Sn}^{2+}$, $\text{Ba}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}^{2+}$, $(\text{Sr,Ca})_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}:\text{Eu}^{2+}$ 와 같이 다양한 발광물질의 유용한 모체로 많이 이용되어 왔다.¹⁷⁾ 그래서 포스페이트 화합물 중의 하나인 $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2$ 결정의 경우에도 활성제로 Eu^{2+} 이온이 도핑된다면, 상대적으로 약간 작은 이온크기를 갖는 Eu^{2+} 이온이 Ba^{2+} 이온 자리에 치환될 수 있으므로 이로부터 형성되는 $\text{Ba}_{2-x}\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:x\text{Eu}$ 형광체는 효율적인 형광체가 될 수 있다. 최근에 Z. Wu와 M. Gong 등은 $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2$ 모체에 Eu^{2+} 이온이 활성제로 도핑된 형광체를 제조하여 기본적인 광발광 특성을 측정하고 InGaN LED에의 적용 가능성에 대하여 보고하였다.¹⁸⁾ 그러나 이들의 보고에서는 활성제의 함량을 4 at%의 큰 간격으로 조사함으로써 Eu^{2+} 의 세밀한 농도 변화에 따른 발광특성이 구체적으로 조사되지 못하였다. 또한, 백색 LED에의 응용을 위해서는 형광체의 온도 변

화에 따른 발광특성이 조사되어야 하나, $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}$ 형광체에 대한 발광강도의 온도 의존성 등이 전혀 다루어지지 않았다.

본 연구에서는 포스페이트 화합물인 $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2$ 을 Eu^{2+} 활성제에 대한 모체물질로 선정하여 $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}$ 형광체들을 고상반응을 이용하여 합성한다. 제조된 형광체들에 대하여 X-선 회절분석으로 결정상을 조사하고, 자외선 여기조건 하에서 광발광 특성을 분석한다. 활성제 Eu^{2+} 의 함량을 조절하게 변화시켜 $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}$ 형광체의 광발광 특성에 미치는 영향을 알아보고 Eu^{2+} 의 농도를 최적화하고자 한다. 이에 더하여, 활성제의 함유량이 최적화된 $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}$ 형광체에서 Eu^{2+} 이온에 의한 발광보다 Eu^{2+} 이온들 간의 상호작용이 우세해지는 임계 거리를 계산해보고, 최적화된 $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}$ 형광체에 대하여는 실온으로부터 100°C까지의 영역에서 온도 변화에 따른 발광강도의 의존성을 관찰하고자 한다.

2. 실험 방법

고상반응을 이용하여 $\text{Ba}_{2-x}\text{Eu}_x\text{Mg}(\text{PO}_4)_2$ 의 화학적 조성을 갖는 형광체들을 합성하였다. 출발물질로는 일본 고순도화학(사)의 BaCO_3 와 Eu_2O_3 , 시그마 알드리치사의 MgO , 머크사의 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 를 사용하여 시료가 정해진 조성을 이루도록 각각을 칭량한 다음, 마노유발(Mortar)에서 혼합하되 보다 효과적인 혼합을 위하여 아세톤을 용매로 사용하여 혼합하였다. 남아있는 수분이나 아세톤을 제거하기 위해서 80°C 오븐에서 1시간 동안 건조시켰다.

건조된 혼합물에 대하여 튜브형 로(tube furnace) 속에서 열처리하되 +3가 상태의 Eu 이온을 +2가의 상태로 완전히 환원시키기 위해서 열처리하는 동안 5% H_2 - 95% N_2 의 분위기를 유지하였다.

열처리된 시료의 결정성을 확인하고자 Rigaku사의 DMAX-33 X-선 회절 분석기로 결정상을 측정하였다. $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}^{2+}$ 형광체의 발광 스펙트럼과 여기 스펙트럼은 제논 방전 램프(Xenon Flash Lamp)를 내장한 PSI사의 PL spectrometer를 사용하여 조사하였다. 형광체의 LED 소자 적용시 열퀵칭(thermal quenching)으로 인한 광발광 휘도의 온도 의존성을 조사하기 위하여, 형광체 시료를 상온에서부터 100°C까지의 온도 범위에서 25°C 간격으로 발광강도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

고상반응으로 5% H_2 - 95% N_2 환원 분위기 중에서 1200°C에서 5시간 열처리하여 제조된 $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:0.05\text{Eu}$ 형광체에 대하여 측정된 X-선 회절패턴을 Fig. 1에 나타내었다. 활성제 Eu이 함유된 형광체 분말의 X-선 회

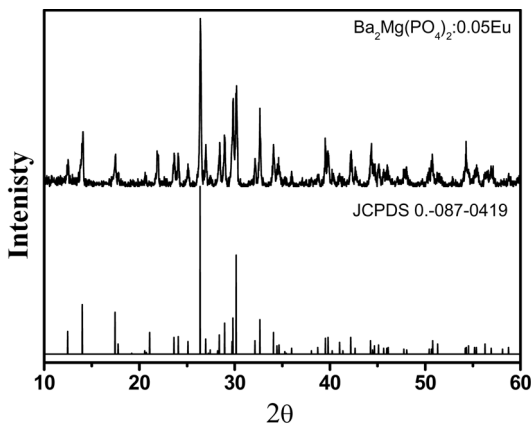


Fig. 1. XRD patterns of $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:0.05\text{Eu}$ phosphors by solid state method and JCPDS file.

절편에서 26.4°의 d 값에서 가장 높은 회절강도를 나타내고 있으며 28-35° 사이에 위치하는 회절피크들에서 높은 강도를 나타내고 있다. 이 회절피크들을 JCPDS(01-087-0419)에 보고된 값들과 비교하였을 때, 회절패턴 상의 모든 d값들이 잘 일치하므로 제조된 형광체 분말이 단사정(monoclinic) 구조의 Ba₂Mg(PO₄)₂:Eu 형광체로 합성된 것으로 판단할 수 있다. Lucas 등에 의해 Ba₂Mg(PO₄)₂에 대한 결정학적 분석이 수행된 바 있다.¹⁷⁾ 그들의 보고에 따르면 공간군이 P2₁/n으로 단사정 구조의 Ba₂Mg(PO₄)₂는 격자상수 a, b 및 c가 각각 5.294 Å, 8.837 Å과 16.143 Å이고 β=90.60°이고 단위격자 내의 화학식 수 Z=4를 갖는다. 이 구조에서 Ba²⁺ 이온들은 MgO₆ 팔면체와 PO₄ 사면체가 연결된 3차원적 구조체들이 형성하는 터널 내에 위치하는데, 여기에는 각기 7개의 산소 원자(monocapped trigonal prism)와 8개의 산소 원자(bicapped trigonal prism)에 의해 배위되는 두 가지의 Ba²⁺ 자리가 있는 것으로 알려져 있다. Ba²⁺ 이온은 6배위 자리에 위치할 때 1.34 Å의 이온반경을 가지며, 8배위 자리를 점유할 경우에는 1.42 Å의 이온반경을 갖는 것으로 보고되어 있으므로 상대적으로 작은 이온크기를 갖는 활성제 Eu²⁺ 이온(6배위 자리에서 1.17 Å, 8배위 자리에서 1.25 Å의 이온반경)은 Ba²⁺ 자리에 치환된 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 2에 실온에서 측정된 Ba₂Mg(PO₄)₂:0.05Eu 형광체의 여기 스펙트럼과 발광 스펙트럼을 제시하였다. 여기 스펙트럼에서는 Eu²⁺의 4f⁷ 바닥상태로부터 4f⁶5d¹의 여기상태로의 전이(transition)에 의해 유도되는 250 nm로부터 460 nm까지의 파장범위에 걸쳐 넓은 밴드형의 스펙트럼을 관찰할 수 있다. 이 여기 스펙트럼은 리간드 장(ligand field)에 의한 5d 준위의 갈라짐(splitting)에서 야기되는 303 nm, 367 nm 및 395 nm 파장에 중심을 갖는 여러 개의 여기 밴드로 구성되어 있으며 395 nm의 파장에서 가장 높은 흡수강도를 나타낸다. 한편, 395 nm의 여기조건 하에 얻은 발광 스펙트럼에서는 440 nm로부터

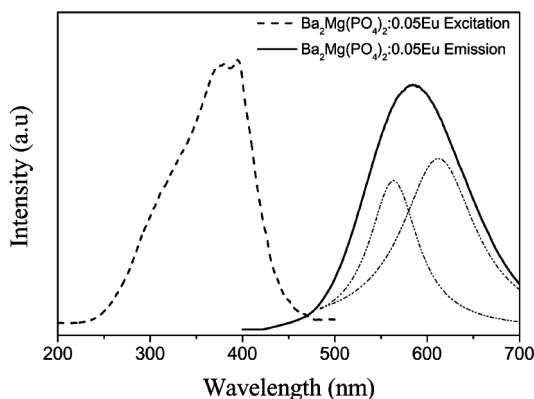


Fig. 2. Excitation and Emission spectra of Ba₂Mg(PO₄)₂:0.05Eu phosphors.

750 nm까지 비교적 넓은 범위에 걸쳐 있고 584 nm의 중심파장을 갖는 밴드형 발광 스펙트럼이 관찰된다. 이러한 형태의 발광패턴은 f-d 에너지 전이에 의한 전형적인 Eu²⁺ 활성제의 발광특성으로, Eu²⁺ 이온이 Ba₂Mg(PO₄)₂ 모체의 Ba²⁺ 자리에 치환되었다는 것을 시사한다. 따라서 이 형광체는 Eu²⁺ 활성제로 인한 250 nm ~ 460 nm 파장 영역에서의 여기 특성과 440 nm ~ 750 nm 파장 영역에 넓은 밴드형의 발광 특성을 나타내기 때문에 UV-LED를 이용한 백색 조명용 형광체로 응용이 가능하다는 것을 알 수 있다. 한편, 발광 스펙트럼에서는 600 nm 근방의 적색 파장영역에서 Eu³⁺에 의한 예리한 발광피크들이 전혀 관찰되지 않는다. 이로부터 원료로 공급되었던 Eu³⁺ 이온들이 5% H₂ - 95% N₂ 분위기의 열처리 조건에서 Eu²⁺로 완전하게 환원되었음을 확인할 수 있다. 전술한 바와 같이 Ba₂Mg(PO₄)₂에는 결정학적으로 산소 이온에 의한 7배위와 8배위의 두 가지 Ba²⁺ 자리가 존재하기 때문에 두 종류의 Ba²⁺ 자리를 점유하는 Eu²⁺에 의해 유도되는 두 가지의 발광밴드를 예측할 수 있다.

상기 584 nm의 발광스펙트럼과 비교하여 303 nm와 367 nm 파장의 여기에 따른 발광스펙트럼의 경우에 발광 강도에서의 차이를 제외하고는 거의 동일한 패턴을 나타내었다. 이러한 현상은 두 가지 자리에 치환된 Eu²⁺의 환경이 유사하여 Ba₂Mg(PO₄)₂에서 다른 두 가지 Eu²⁺의 발광밴드들이 크게 중첩됨을 나타낸다. 이는 Fig. 2의 발광 스펙트럼에 점선으로 표기된 바와 같이 파장 스케일에 따른 Gaussian deconvolution으로 발광밴드가 각각 562 nm와 608 nm에 위치하는 두개의 Gaussian profile들로 분해됨으로써 확인된다. 결과적으로 이와 같은 스펙트럼 상의 특성으로부터 Eu²⁺ 이온들이 Ba₂Mg(PO₄)₂ 결정에 있는 모든 Ba²⁺ 자리를 치환하여 들어간다는 것을 알 수 있다. 한편, 본 연구에서의 여기 및 발광 스펙트럼 측정 결과는 Z. Wu 등이 보고¹⁸⁾한 것과는 조금 다른 패턴을 보여준다. 여기 스펙트럼에서는 흡수 피크들이 나타나는 파장은 거의 유사하지만 Z. Wu 등의 보고에서는 367 nm에서 가장 큰 흡수강도를 나타내었다. 한편, Z. Wu 등은 발광 스펙트럼의 중심파장을 576 nm로 보고하였는데 이는 본 연구에서의 584 nm와 상당한 차이를 나타낸다. 여기 및 발광 스펙트럼에서의 이러한 차이는 본 실험과 Z. Wu 등의 실험에서 원료나 열처리 조건 등의 실험조건의 차이에 의해 Ba₂Mg(PO₄)₂ 결정에 있는 각기 다른 두 가지의 Ba²⁺ 자리에 치환하여 들어가는 Eu²⁺의 비율이 달라지기 때문인 것으로 추정되지만 정확한 해석을 위해서는 더욱 체계적인 분석이 필요하다.

Ba₂Mg(PO₄)₂:Eu 형광체의 발광강도에 대한 활성제 농도 의존성을 알아보기로자 Eu²⁺ 이온의 농도를 $x = 0.01 \sim 0.15$ 의 범위까지 변화시키면서 395 nm 파장 여기 하에 측정된 발광강도의 변화를 Fig. 3에 제시하였다. 할

성제의 농도가 낮은 경우에 Eu^{2+} 이온의 함량 증가와 함께 발광강도도 증가하며 5 at%의 Eu 농도에서 가장 높은 상대 발광강도를 나타낸다. 하지만 $x = 0.06$ 의 농도로부터는 오히려 발광강도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 형광체에서 발광강도가 감소하기 시작하는 활성제의 함량으로 정의되는 농도 켄칭(concentration quenching) 현상으로, Eu의 최적 농도가 5 at%임을 시사한다. Fig. 3에 나타나는 5 at%의 활성제 농도는 Z. Wu 등이 보고¹⁸⁾하였던 6 at%의 임계농도(critical concentration)와는 약간의 차이를 나타낸다. 그들은 Eu^{2+} 의 농도를 2 ~ 18 at% 범위에서 4 at% 간격으로 대략적으로만 변화시키면서 측정하였기 때문에 활성제의 농도를 상대적으로 세밀하게 변화시키면서 발광강도를 측정본 연구의 결과가 더 정확한 것으로 여겨진다.

일반적으로 형광체 모체에 활성제 이온의 수가 증가하면 발광강도도 증가하지만 전술한 바와 같이 활성제 이온의 농도가 일정 수준 이상이 되면 활성제 이온들 사이의 거리가 가까워지면서 이들 사이의 상호작용이 증가하여 발광강도가 감소하게 된다.¹⁹⁾ $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}$ 형광체에서도 Eu^{2+} 활성제의 농도가 증가함에 따라 Eu^{2+} 이온들 사이의 에너지 전달(energy transfer) 가능성이 높아진다. $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}$ 형광체의 여기 스펙트럼과 발광 스펙트럼을 비교해 보면, 스펙트럼 상의 일부 겹침(overlap)이 관찰되는데, 이는 Eu^{2+} 이온들 사이에 효과적인 에너지 전달이 일어날 수 있음을 시사하는 결과이다. Eu 5 at%의 임계 농도로부터 Blasse¹⁹⁾에 의해 주어진 식, $R_c \approx 2(3V/4\pi x_c Z)^{1/3}$ 을 사용하여 $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}$ 형광체에서 Eu^{2+} 이온들 사이에 에너지 전달이 가능한 대략적인 임계 거리(R_c)가 계산될 수 있다. 여기서, V는 모체 단위격자의 부피이고 x_c 는 활성제의 임계 농도이며 Z는 단위 격자당 분자 수이다. $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}$ 형광체에서는 Z, x_c 및 V가 각각 4, 0.05 및 755.2 \AA^3 이므로, Eu^{2+} 이온들 사이의 임계 거리는 19.3 \AA 정도인 것으로 평가된다. 즉, 5 at%의 임계농도보다 적은 경우에는 Eu^{2+} 이온들 사이의 거리가 19.3 \AA 보다 멀어서 Eu^{2+} 이온들 사이의 상호작용보다는 Eu^{2+} 의 발광이 우세하고, 5 at%보다 임계농도가 높은 경우에는 Eu^{2+} 이온들 사이의 거리가 19.3 \AA 보다 가까워서 Eu^{2+} 의 발광보다 Eu^{2+} 이온들 간의 상호작용이 우세해져서 발광강도를 저하시키게 된다.

활성제의 함량이 최적화된 $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}$ 형광체에 대하여 실온으로부터 100°C 까지의 온도 변화에 따른 발광강도 변화를 조사하여 Fig. 4에 제시하였다.

$\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:0.05\text{Eu}^{2+}$ 의 상대 발광강도는 실온으로부터 온도 증가와 함께 급격히 감소하는 현상을 보여 준다. 100°C 에서는 실온의 약 56%의 상대 발광강도를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 이와 함께 25°C 로부터 100°C 로의 온도 증가와 함께 584 nm 로부터 575 nm 로 발광 중

심파장이 단파장 쪽으로 이동됨을 관찰할 수 있다. 이에 따라 실온으로부터 100°C 로의 온도 변화와 함께 형광체의 색좌표가 (0.498, 0.473)로부터 (0.479, 0.484)으로 이동됨으로써 색순도의 저하를 초래한다. 이는 온도 증가에 따라 유도되는 모체격자의 약간의 변형에 따라 발광 스펙트럼을 구성하는 두 개의 Gaussian profile들 중에서 608 nm 보다 562 nm 에 위치하는 피크의 강도가 상대적으로 증가하기 때문인 것으로 추정할 수 있으나, 이에 대한 정확한 해석을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

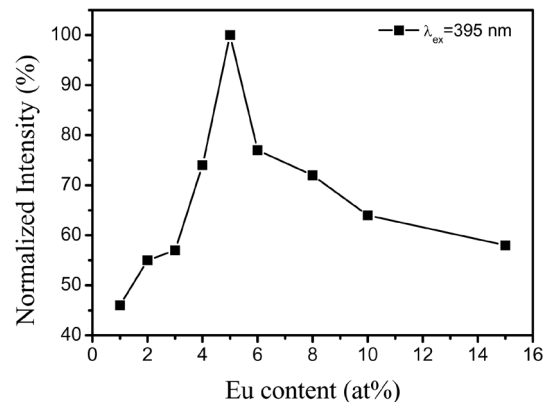


Fig. 3. The dependence of emission intensity at 584 nm upon concentration of Eu^{2+} in host matrix

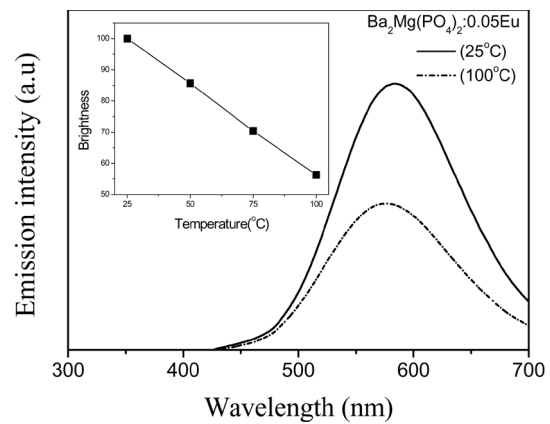


Fig. 4. Temperature dependence of the emission intensity of $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:0.05\text{Eu}$ phosphor.

4. 결 론

Eu 활성제의 농도를 조밀하게 변화시키면서 자외선 여기하에 $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}$ 형광체의 광발광 특성을 조사하였다. $5\% \text{H}_2 - 95\% \text{N}_2$ 의 환원분위기 하에서 1200°C 에서 5시간 열처리하는 고상반응을 이용하여 $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_2:\text{Eu}$ 형광체를 합성하였다. X-선 회절분석 결과 제조된 형광체가 단일상으로 합성된 것을 확인할 수 있었다. 광발광 특성에서는 $250 \text{ nm} \sim 460 \text{ nm}$ 의 흡수 스펙트럼 및 584 nm 의 중심파장을 갖는 넓은 밴드형의 발광 스펙트럼을

나타내는 것으로 조사되었다. 자외선 여기조건 하에서 활성제 Eu의 최적농도는 5 at%이었으며, 이에 따른 Eu²⁺ 이온들 사이의 임계 거리는 19.3 Å으로 계산되었다. 또한, 이 형광체의 발광강도는 실온으로부터 100°C까지의 영역에서 비교적 큰 온도의존성을 갖는 것으로 조사되었다. 실온에서의 Ba₂Mg(PO₄)₂:Eu 형광체의 여기 및 발광 특성으로부터는 UV-LED용 형광체로 사용 가능성이 있으나 온도 증가에 따른 발광 강도의 감소와 중심파장의 이동은 그러한 응용가능성을 제한한다.

감사의 글

이 연구는 지식경제부의 21세기 프론티어기술개발사업인 차세대정보디스플레이기술개발사업단의 기술개발비(#F0004073-2008-31)지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. S. Neeraj, N. Kijima and A.K. Cheetham, Chem. Phys. Lett., **387**, 2 (2004).
2. S. Nakamura, M. Senoh and T. Mukai, Appl. Phys. Lett., **62(19)**, 2390 (1993).
3. P. Schlotter, R. Schmidt and J. Schneider, Appl. Phys., **A64**, 417 (1997).
4. P. Schlotter, J. Baur, C. Hielscher, M. Kunzer, H. Obloh, R. Schmidt and J. Schneider, Mater. Sci. Eng., **B59**, 390 (1999).
5. Y. Pan, M. Wu and Q. Su, J. Phys. Chem. Solids, **65**, 845 (2004).
6. R. M. Mach, G. Mueller, M. R. Krames, H. A. Hoppe, F. Standler, W. Schnick, T. Juestel and P. Schmidt, Phys. Stat. Sol., **202(9)**, 1727 (2005).
7. T. Nishida, T. Ban and N. Kobayashi, Appl. Phys. Lett., **82(22)**, 3817 (2003).
8. V. Bachmann, T. Justel, A. Meijerink, C. Ronda and P. J. Schmidt, J. Lumin., **121**, 441 (2006).
9. M. Zhang, J. Wang, Q. Zhang, W. Ding and Q. Su, Mater. Res. Bull., **42**, 33 (2007).
10. M. Zhang, J. Wang, W. Ding, Q. Zhang and Q. Su, Appl. Phys., **B86**, 647(2007).
11. S. Yan, J. Zhang, X. Zhang, S. Lu, X. Ren, Z. Nie and X. Wang, J. Phys. Chem., **C 111**, 13256 (2007).
12. X. Zhang, H. Zeng and Q. Su, J. Alloys & Compd., **441**, 259 (2007).
13. H. He, R. Fu, X. Song, D. Wang and J. Chen, J. Lumin., **128**, 489 (2008).
14. Y. Hu, W. Zhuang, H. Ye, S. Zhang, Y. Fang and X. Huang, J. Lumin., **111**, 139 (2005).
15. C. Chartier, C. Barthou, P. Benalloul and J. M. Frigerio, J. Lumin., **111**, 147 (2005).
16. H.K. Jung, D.W. Lee, K.Y. Jung and J.H. Boo, J. Alloys & Compd., **390**, 189 (2005).
17. F. Lucas, G. Wallez, S. Jaulmes, A. Elfakir and M. Quarton, Acta Cryst., **C53**, 1741 (1997).
18. Z. Wu, M. Gong, J. Shi, G. Wang and Q. Su, Chem. Lett., **36(3)**, 410 (2007).
19. G. Blasse, Philips Res. Rep., 24 (1969) 131.