

BaMoO₄:Tb³⁺ 형광체의 발광과 농도 소광 특성

조신희 · 김진대 · 황동현 · 조선욱[†]
신라대학교 신소재공학과, 녹색융합기술센터

Photoluminescence and Concentration Quenching Properties of BaMoO₄:Tb³⁺ Phosphors

Shinho Cho, Jindae Kim, Donghyun Hwang and Seon-Woog Cho[†]

Department of Materials Science and Engineering and Center for Green Fusion Technology,
Silla University, Busan 46958, Korea

(Received November 12, 2015 : Revised December 31, 2015 : Accepted December 31, 2015)

Abstract BaMoO₄:Tb³⁺ phosphor powders were synthesized with different concentrations of Tb³⁺ ions using the solid-state reaction method. XRD patterns showed that all the phosphors, irrespective of the concentration of Tb³⁺ ions, had tetragonal systems with two main (112) and (004) diffraction peaks. The excitation spectra of the Tb³⁺-doped BaMoO₄ phosphors consisted of an intense broad band centered at 290 nm in the range of 230-330 nm and two weak bands. The former broad band corresponded to the 4f⁸ → 4f⁷5d¹ transition of Tb³⁺ ions; the latter two weak bands were ascribed to the ⁷F₂ → ⁵D₃ (471 nm) and ⁷F₆ → ⁵D₄ (492 nm) transitions of Tb³⁺. The main emission band, when excited at 290 nm, showed a strong green band at 550 nm arising from the ⁵D₄ → ⁷F₅ transition of Tb³⁺ ions. As the concentration of Tb³⁺ increased from 1 to 10 mol%, the intensities of all the emission lines gradually increased, approached maxima at 10 mol% of Tb³⁺ ions, and then showed a decreasing tendency with further increase in the Tb³⁺ ions due to the concentration quenching effect. The critical distance between neighboring Tb³⁺ ions for concentration quenching was calculated and found to be 12.3 Å, which indicates that dipole-dipole interaction was the main mechanism for the concentration quenching of the ⁵D₄ → ⁷F₅ transition of Tb³⁺ in the BaMoO₄:Tb³⁺ phosphors.

Key words phosphor, luminescence, lanthanides.

1. 서 론

최근에 백열등과 형광등을 대체하기 위하여 높은 연색 지수와 색 재현성이 우수한 백색 발광 다이오드(white light emitting diodes; WLEDs) 개발에 상당한 연구가 진행되고 있다.¹⁻³⁾ 일반적으로 WLED는 세 종류의 방법으로 제작되고 있다. 청색 LED 칩 상부에 황색 형광체를 도포하거나, 청색 LED 칩 상부에 적색과 녹색 형광체를 동시에 도포하는 방법과 근자외선 LED 칩 표면에 적색, 녹색, 청색 형광체 분말을 도포하여 백색 발광을 구현하고 있다.⁴⁾ 발광 파장 영역 중에서 적색과 녹색 발

광의 세기는 백색 발광의 연색 지수(color rendering index)를 높이는 중요한 요소로 알려져 있어 이에 적합한 모체 결정과 활성제 이온으로 구성되는 고효율의 녹색 형광체 개발은 절실하다.⁵⁾

몰리브덴산염(molybdate), 알루미늄산염(aluminate), 붕산염(borate), 규산염(silicate)을 포함하는 산화 화합물(oxide compounds)은 자외선 영역에서 강한 흡수력을 나타내고, 이 가운데서 몰리브덴산염은 회중석(scheelite) 형태의 결정 구조를 보이며, 우수한 화학 및 열적 안정성을 나타내기 때문에 발광 소재의 좋은 모체 결정으로 간주되고 있다.^{6,7)} 특히, BaMoO₄는 형광체, WLED, 레이저, 광섬

[†]Corresponding author

E-Mail : swcho@silla.ac.kr (S.-W. Cho, Silla Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

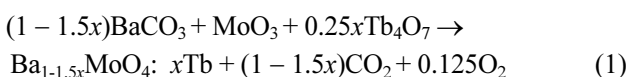
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

유, 촉매 등에 응용할 수 있는 폴리브텐산염 중에서 중요한 물질이다. 최근에 희토류 이온이 도핑된 폴리브텐산염 화합물은 높은 발광 효율과 화학적 안정성을 나타내어 형광체의 유망한 후보로 부상하고 있으며, 이에 대한 연구가 광범위하게 진행되고 있다. Du와 Yu⁸⁾는 고상반응법을 사용하여 정방정계 결정 구조를 갖는 Eu^{3+} 이온이 도핑된 AMoO_4 ($A = \text{Mg, Ca, Sr, Ba}$) 형광체를 합성하였으며, 이 중에서 Eu^{3+} 이온이 도핑된 CaMoO_4 형광체가 가장 강한 적색 발광 세기를 나타내며, CIE 색 좌표가 (0.647, 0.352)임을 확인하였다. Wang 등⁹⁾은 수열법(hydrothermal method)을 사용하여 3차원 호두 모양의 형상을 갖는 $\text{CaMoO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 형광체를 제작하였으며, 열처리 온도가 증가함에 따라 결정 입자의 크기가 증가하고, 파장 394 nm로 여기시켰을 때 615 nm에 피크를 갖는 적색 발광을 관측하였다. Li 등¹⁰⁾은 고상반응법을 사용하여 600-750 °C에서 3 h 동안 소결하여 Tb^{3+} 와 Na^+ 이온이 도핑된 SrMoO_4 녹색 형광체를 제조하였으며, 활성제 이온 Tb^{3+} 와 전하 보상자(charge compensator) Na^+ 이온이 결정 구조에 영향을 미치지 않으며, 파장 375 nm와 488 nm로 여기시켰을 때 형광체의 최대 발광 세기는 Tb^{3+} 이온의 $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$ 전이에 의한 548 nm에서 발생함을 보고하였다.

본 연구에서는 모체 결정 BaMoO_4 에 서로 다른 농도를 갖는 활성제 이온 Tb^{3+} 을 도핑하여 고효율의 녹색광을 발광하는 형광체를 제작하였다. 특히, WLED에 응용하기 위한 최대의 녹색 발광세기를 갖는 최적의 Tb^{3+} 이온의 농도를 결정하고, 활성제 이온의 농도 변화에 따른 결정 입자의 형상, 형광체의 발광과 여기 세기의 상호 관계, 농도 소광을 일으키는 기본 원리를 체계적으로 조사하였다.

2. 실험 방법

$\text{BaMoO}_4:\text{Tb}^{3+}$ 형광체는 고상반응법을 사용하여 합성하였다. 초기 물질 BaCO_3 (순도: 99.995%), MoO_3 (99.9%), Tb_4O_7 (99.9%)를 화학양론적으로 준비하였으며, Tb^{3+} 이온의 농도(x)를 각각 0, 1, 5, 10, 15, 20 mol%로 변화시켰으며, 화학 반응은 식 (1)과 같다:



정밀 저울로 측량한 초기 물질을 농도별로 각각 분리하여 에탄올, ZrO_2 볼과 함께 플라스틱 병에 넣고 10 시간 볼밀(ball-mill) 작업을 수행한 후에, 비커에 담아서 60 °C에서 10 시간의 건조 과정을 거쳐서 건조한 시료를

를 80 μm 의 미세한 크기로 갈아서 6개의 알루미늄 도가니에 담아 400 °C에서 3 시간의 하소 공정과 1100 °C에서 5 시간의 소결 공정을 통하여 합성하였다.

형광체의 결정 구조는 회절각 10~80° 영역에서 Cu-K α 복사선을 사용하는 Rigaku Ultima IV X-선 회절 장치를 사용하여 측정하였으며, 형광체 분말 표면의 미세 형상은 Hitachi S-4300 주사전자현미경으로 촬영하였다. 형광체의 광학 특성은 상온에서 Scinco FS-2 형광광도계를 사용하여 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 Tb^{3+} 이온의 몰 비를 0, 1, 5, 10, 15, 20 mol%씩 변화시키면서 합성한 $\text{BaMoO}_4:\text{Tb}^{3+}$ 형광체 분말 시료의 XRD 데이터를 나타낸 것이다. Tb^{3+} 이온이 도핑된 형광체 시료는 $2\theta = 26.57^\circ$ 와 27.89° 에서 강한 회절 세기를 갖는 두 피크와 상대적으로 약한 32.12° , 43.01° , 48.48° , 53.89° 에 중심을 둔 회절 피크들이 관측되었다. 전자는 (112)와 (004)면에서 발생한 회절 피크이며, 후자는 (200), (204), (116), (132)면에서 발생한 피크들이다. 합성한 형광체 분말은 JCPDS #89-4570에 제시된 회절 상과 일치하는 정방 정계(tetragonal system)의 결정 구조임을 확인하였다. Tb^{3+} 이온의 몰 비가 증가함에 따라 두 가지 주목할만한 현상이 관측되었다. 첫째는 회절각 $2\theta = 13.27^\circ$ 에서 검출된 $\text{BaO}+\text{CO}_2$ 피크이다. 이것은 반응물 BaCO_3 가 소결 과정 중에 CO_2 가스

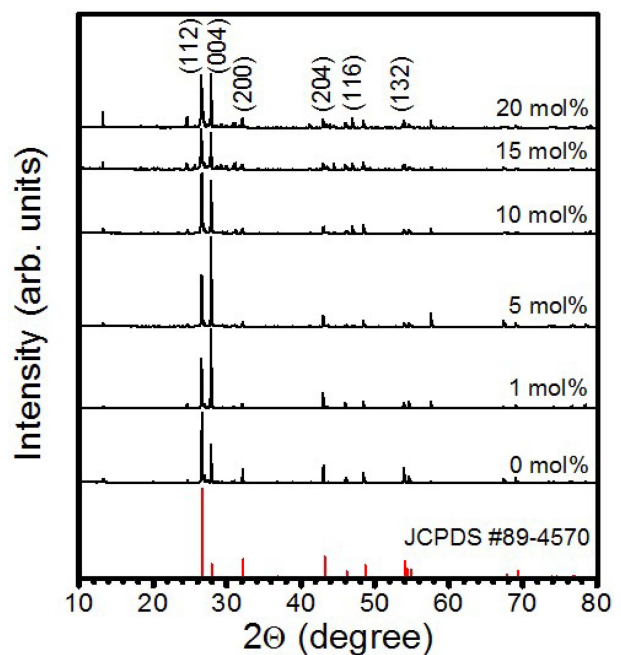


Fig. 1. XRD patterns of BaMoO_4 phosphors doped with different concentrations of Tb^{3+} .

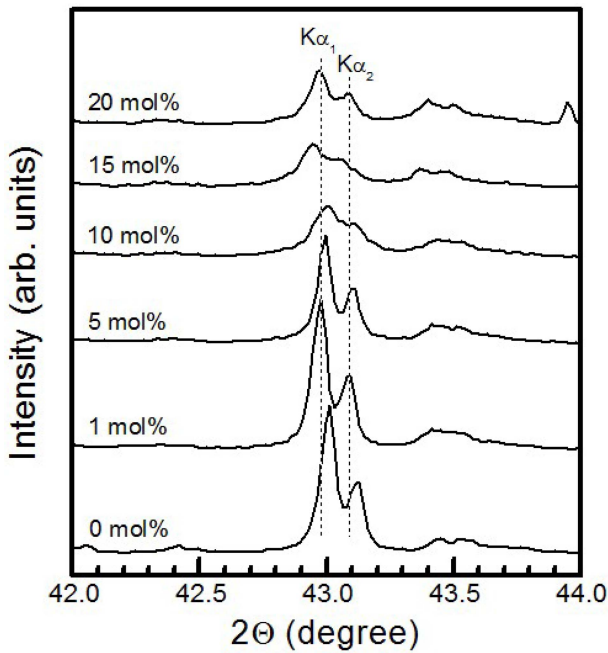


Fig. 2. Enlarged version of XRD patterns of BaMoO₄ phosphors doped with different concentrations of Tb³⁺. Main peaks correspond to Cu-K α_1 and shoulder sub-peaks with half intensity are Cu-K α_2 .

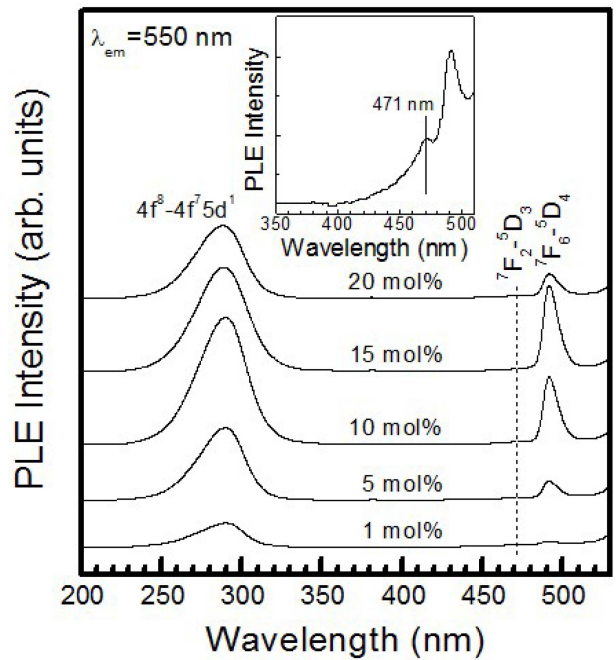


Fig. 4. Excitation spectra of BaMoO₄ phosphors doped with different concentrations of Tb³⁺.

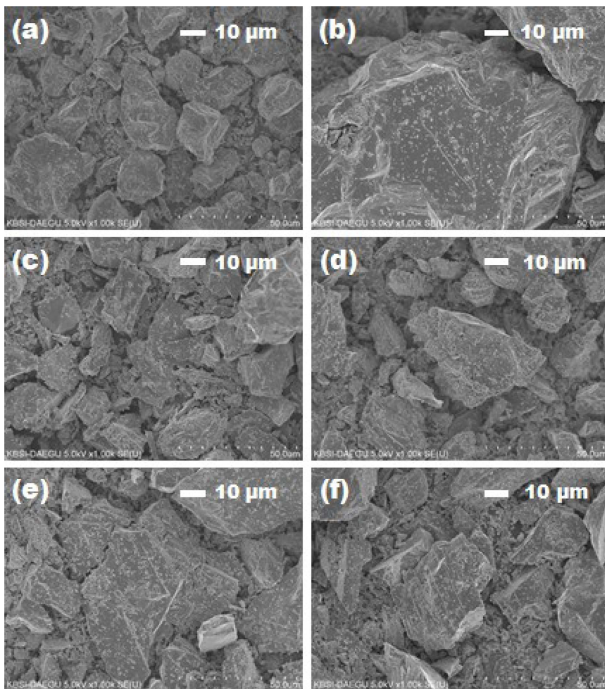


Fig. 3. SEM surface images of BaMoO₄ phosphors synthesized with Tb³⁺ ion concentrations of: (a) 0, (b) 1, (c) 5, (d) 10, (e) 15, and (f) 20 mol%.

를 배출하고 BaO로 변환되는 과정에서 CO₂ 가스가 완전히 배출되지 못하고 화학 흡착된(chemisorbed) 상태에서 BaO+CO₂를 남긴 것으로 추정된다. BaO 표면에 CO₂

가 화학 흡착된 종(species)은 매우 안정한 흡착 에너지 $E_{ads} = -0.8$ eV를 갖는다.¹¹⁾ 들재는 Tb³⁺ 이온의 농도가 증가함에 따라 결정 격자면 사이의 거리에 변화가 발생하였다. 세라믹 산화물의 경우에 이온끼리 쿨롱 인력의 상호 작용으로 용질의 농도에 따라 격자 크기가 선형적으로 변하지 않는다.¹²⁾ 이를 확인하기 위하여 회절각 $2\theta = 43.01^\circ$ 에서 발생한 (204)면에 의한 회절 피크를 확대하여 Fig. 2에 나타내었다. 이것은 배위수(coordination number) 8인 환경에서 유효 이온 반경(effective ionic radius)이 1.42 Å인 Ba²⁺ 이온 3개를 유효 이온 반경이 1.04 Å인 Tb³⁺ 이온 2개가 치환하면서 빈자리(vacancy) 1개를 만들어 내는 효과가 Tb³⁺ 이온의 농도가 증가하면서 나타난 것으로 해석된다.¹³⁾

Fig. 3은 Tb³⁺ 이온의 몰 비(x)를 (a) $x=0$, (b) 1, (c) 5, (d) 10, (e) 15, (f) 20 mol%로 합성한 BaMoO₄:Tb³⁺ 형광체 분말의 미세 표면 형상을 SEM으로 촬영한 것이다. Fig. 3(a)~(f)에서 보듯이, 각 형광체 분말은 약 10~60 μm 크기의 입자들로 구성되며 입자 형상에 변화가 있음을 볼 수 있다. Tb³⁺ 이온이 도핑되지 않은 형광체의 경우에 입자 형상은 구형에 가깝지만, Tb³⁺ 이온이 모체 결정에 치환 고용됨에 따라 입자의 모서리에 각이 생기면서 비정형의 입자 형상을 보였다. 특히, Tb³⁺ 이온이 1 mol% 도핑된 경우에 거대 결정 성장(secondary grain growth)의 형태가 관측되었다.

Fig. 4는 활성제 이온 Tb³⁺의 몰 비를 변화시키면서 제

조한 $\text{BaMoO}_4:\text{Tb}^{3+}$ 형광체 분말을 방출 파장 550 nm로 제어하여 상온에서 측정한 여기 스펙트럼을 나타낸 것이다. Tb^{3+} 이온의 몰 비가 1 mol%인 BaMoO_4 형광체의 경우에 두 종류의 여기 스펙트럼이 관측되었다. 290 nm ($34,483\text{ cm}^{-1}$)에 피크를 갖고 반치폭이 34 nm 정도로 넓은 밴드폭을 갖는 강한 여기 스펙트럼과 주 여기 피크에 비하여 상대적으로 여기 세기가 매우 작은 471와 492 nm에 정점을 갖는 여기 스펙트럼으로 구성되었다. 전자는 Tb^{3+} 이온의 $4f^8 \rightarrow 4f^75d^1$ (f-d) 전이에 의한 여기 신호이며, 여기서 주목할 점은 $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Tb}^{3+}$ 이온들 사이의 에너지 전달에 의하여 발생하는 전하 전달 밴드(charge transfer band; CTB)는 5d 에너지 준위보다 높은 에너지($\sim 60,000\text{ cm}^{-1}$)에 위치한다.¹⁴⁾ 후자의 두 약한 여기 스펙트럼은 Tb^{3+} 이온의 $^7F_2 \rightarrow ^5D_3$ (471 nm) 전이와 $^7F_6 \rightarrow ^5D_4$ (492 nm) 전이에 의하여 각각 발생한 신호이다.¹⁵⁾ Tb^{3+} 이온의 농도가 1 mol%에서 10 mol%로 증가함에 따라 f-d 전이에 의한 여기 스펙트럼의 세기는 계속 증가하여 10 mol%에서 최대값을 나타내었으나, Tb^{3+} 이온의 농도가 더욱 증가함에 따라 여기 세기는 감소하였다. 한편, Tb^{3+} 이온의 $^7F_6 \rightarrow ^5D_4$ (492 nm) 전이에 의한 여기 신호의 세기는 Tb^{3+} 이온의 농도에 비례하여 계속 증가하여 Tb^{3+} 이온의 농도가 15 mol%일 때 최대값을 나타내었으나 20 mol%에서는 급격히 감소하는 추세를 나타내었다. 이 결과는 Tb^{3+} 이온이 도핑된 SrSnO_3 형광체에서 Tb^{3+} 이온의 몰 비가 증가함에 따라 f-d 전이에 의한 여기 신호의 세기가 감소하는 결과와 일치하였다.¹⁶⁾

Fig. 5는 파장 290 nm로 여기시킨 Tb^{3+} 이온의 몰 비 변화에 따른 $\text{BaMoO}_4:\text{Tb}^{3+}$ 형광체 분말의 발광 스펙트럼을 나타낸 것이다. Tb^{3+} 이온이 도핑되지 않는 모체 결정 BaMoO_4 의 자체 발광은 발생하지 않았으며, Tb^{3+} 이온의 몰 비에 관계없이 모든 형광체 분말에서 다섯 종류의 발광 스펙트럼이 관측되었는데, 이 발광 신호들은 Tb^{3+} 이온의 전형적인 $4f \rightarrow 4f$ 전이 신호임을 확인하였다.¹⁷⁾ 발광 세기가 제일 강한 550 nm에 피크를 갖는 녹색 발광 스펙트럼, 상대적으로 발광 세기가 주 피크의 1/4 정도로 작은 493 nm에 피크를 갖는 청색 발광 신호, 주 피크에 비하여 발광 세기가 약 16배 작은 590 nm와 625 nm에 정점을 갖는 주황색과 적색 발광 스펙트럼, 제일 세기가 약한 654 nm의 적색 발광 신호로 구성되었다. 550 nm의 녹색 주 발광 스펙트럼은 Tb^{3+} 이온의 $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ 전이 신호, 493 nm의 청색 발광 스펙트럼은 $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$ 전이, 590 nm의 주황색 발광 스펙트럼은 $^5D_4 \rightarrow ^7F_4$ 전이, 625 nm와 654 nm의 적색 발광 스펙트럼은 각각 $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$ 와 $^5D_4 \rightarrow ^7F_2$ 전이 신호이다.¹⁸⁾ 상기의 형광체는 근자외선(290 nm)을 여기 광원으로 사용하는 백색 LED 제작용 녹색 형광체로 응용할 수 있다. 여기서 주

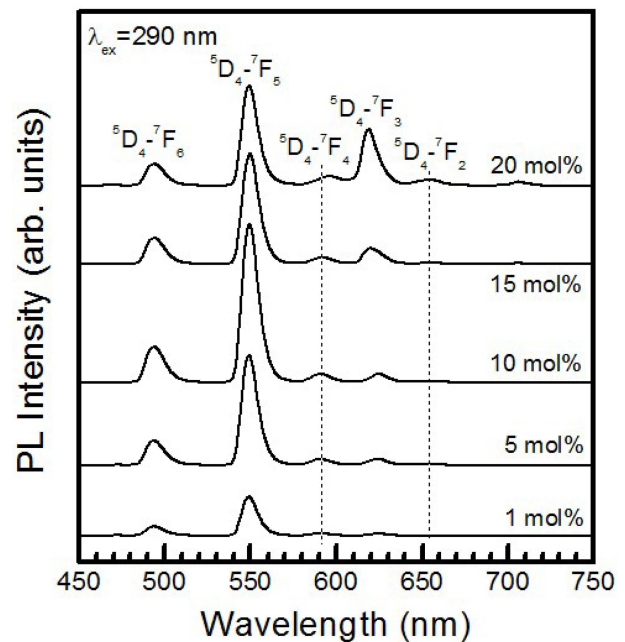


Fig. 5. Photoluminescence spectra of BaMoO_4 phosphors doped with different concentrations of Tb^{3+} .

목할 점은 Tb^{3+} 이온의 높은 에너지 준위인 5D_3 에서 방출되는 파장 영역 320~400 nm의 발광 파장은 검출되지 않았다는 것이다. 에너지 준위 5D_3 와 5D_4 사이의 에너지 간격이 0.72 eV ($\sim 5800\text{ cm}^{-1}$) 정도로 크기 때문에 다중 포논 이완(multiphonon relaxation)이 발생할 확률은 매우 적고, Tb^{3+} 이온의 농도가 증가함에 따라 에너지 준위 5D_3 에 위치하는 Tb^{3+} 이온과 바닥 준위에 위치하는 이온들 사이에 ($^5D_3, ^7F_6$) \rightarrow ($^5D_4, ^7F_0$) 상호 이완(cross relaxation) 작용이 발생하여 $^5D_3 \rightarrow ^7F_j$ 전이에 의한 320~400 nm 영역의 청색 발광은 억제되고, 그 대신에 $^5D_4 \rightarrow ^7F_j$ 전이를 증가시키는 것으로 설명할 수 있다.¹⁹⁾

Fig. 6은 Tb^{3+} 이온의 몰 비 변화에 따른 $\text{BaMoO}_4:\text{Tb}^{3+}$ 형광체 분말의 발광 스펙트럼의 세기를 나타낸 것이다. Tb^{3+} 이온의 몰 비가 1 mol%에서 10 mol%로 증가함에 따라 다섯 종류의 발광 신호의 세기는 모두 점차적으로 증가하여 10 mol%에서 발광 세기는 최대이었고, Tb^{3+} 이온의 몰 비가 15 mol%와 20 mol%로 증가함에 따라 $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$ (625 nm)와 $^5D_4 \rightarrow ^7F_2$ (654 nm) 전이에 의한 적색 발광 신호의 세기는 증가하였으나, 나머지 세 종류의 발광 스펙트럼의 세기는 감소하는 경향을 나타내었다. 전반적으로 발광 신호의 세기가 10~20 mol%에서 감소하는 현상은 발광 센터의 역할을 하는 활성제 Tb^{3+} 이온의 몰 비가 임계 농도인 10 mol% 이상으로 증가함에 따라 활성제 이온들 사이의 거리가 가까워져서 이온들 사이에 교환 상호 작용(exchange interaction), 복사선 재흡수(radiation reabsorption), 다중극-다중

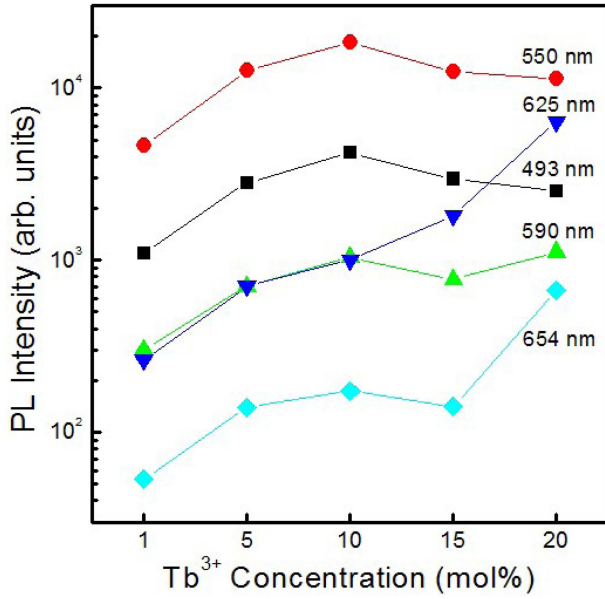


Fig. 6. Dependence of the PL intensity on the Tb³⁺ doping concentration.

극 상호 작용(multipole-multipole interaction)이 발생하여 비복사선 에너지 전달(non-radiative energy transfer) 현상에 의해 발광 세기가 감소하는 농도 소광(concentration quenching) 현상으로 해석할 수 있다.²⁰⁾ Tb³⁺ 이온의 몰비가 증가함에 따라 나타나는 이러한 농도 소광 현상은 다른 모체 격자인 SrMoO₄에서 관측된 결과와 유사하였다.²¹⁾ 그러므로 Tb³⁺ 이온이 도핑된 BaMoO₄ 형광체 분말의 경우에 최적의 농도는 10 mol% 이었다. 상기의 세 가지 상호 작용 중에서 어떤 상호 작용이 우세한 역할을 하는지는 농도 소광 현상이 일어날 때 모체 결정 내에 위치하는 활성제 이온들 사이의 임계 거리(critical distance) R_c 를 계산함으로써 규명할 수 있다. 일반적으로, 임계 거리는 Blasse의 식 (2)를 사용하여 계산할 수 있다.²²⁾

$$R_c = 2(3V/4\pi\chi_c N)^{1/3} \quad (2)$$

여기서 χ_c 는 Tb³⁺ 이온의 임계 농도, V 는 단위 셀의 체적, N 은 단위 셀당 모체 양이온의 수이다. 본 연구의 경우에, BaMoO₄ 모체 결정의 체적과 단위 셀당 양이온의 수는 $V = 392.233 \text{ \AA}^3$, $N = 4$ 이며, 농도 소광 현상이 발생하는 임계 농도 χ_c 는 10 mol% 이므로, 상기의 값을 식(2)에 대입하면 임계 거리 R_c 의 값을 구할 수 있다: 즉, $R_c = 12.3 \text{ \AA}$. 활성제 Tb³⁺-Tb³⁺ 이온 사이의 임계 거리가 5 Å 보다 크기 때문에 이 경우에 농도 소광의 주요 원인은 다중극-다중극 상호작용으로 판단된다.²³⁾ 일반적으로, 다중극 상호 작용에는 세 종류, 즉 쌍극자-쌍극

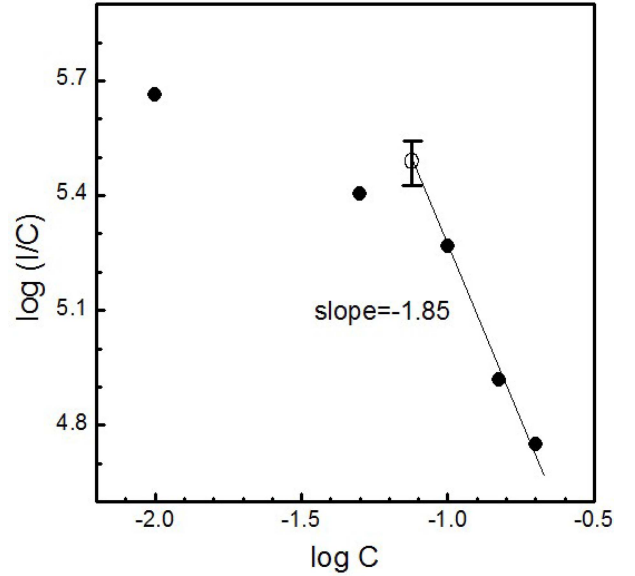


Fig. 7. The curve of $\log(I/C)$ vs. $\log C$ in Tb³⁺-doped BaMoO₄ phosphors.

자(dipole-dipole), 쌍극자-사중극자(dipole-quadrupole), 사중극자-사중극자(quadrupole-quadrupole) 상호 작용이 있으므로, Dexter가 제안한 활성제 이온의 농도와 발광 세기 사이의 관계 식 (3)을 사용하여 어떤 상호 작용이 주된 역할을 하는지를 결정할 수 있다.²⁴⁾

$$\log(I/C) = (-s/3)\log C + \log(k/\beta) \quad (3)$$

여기서 C 는 활성제 이온의 농도, k 와 β 는 특정한 상호 작용과 관련된 상수, s 는 전기 다중극 상호 작용을 나타내는 인수으로써, 숫자 6은 쌍극자-쌍극자, 8은 쌍극자-사중극자, 10은 사중극자-사중극자 상호 작용을 나타낸다.²⁵⁾ Fig. 7은 x축을 $\log C$, y축을 $\log(I/C)$ 로 취하여 데이터를 나타낸 것이다. 농도 소광 현상에 근접한 Tb³⁺ 이온의 농도가 1-20 mol%인 영역의 데이터를 가장 잘 맞춘 직선의 기울기 값은 -1.85 ± 0.13 이므로 s 의 값은 5.55 ± 0.39 이다. 이 값은 쌍극자-쌍극자 상호 작용의 이론값 6에 근접하므로, 본 연구에서 Tb³⁺ 이온의 $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ (550 nm) 전이에서 관측된 농도 소광의 주된 메카니즘은 쌍극자-쌍극자 상호 작용에 기인함을 확인할 수 있다. 실험 결과를 종합하면, 본 연구에서 합성한 녹색 형광체의 경우에 Tb³⁺의 몰비가 10 mol%일 때 최대 발광 세기를 갖는 최적의 조건임을 알 수 있다.

4. 결 론

고상반응법을 사용하여 활성제 이온 Tb³⁺의 몰비를 변

화시키면서 $\text{BaMoO}_4:\text{Tb}^{3+}$ 형광체 분말을 제조하였으며, Tb^{3+} 이온의 몰 비가 형광체 분말의 결정 구조, 미세 표면의 형상, 여기와 발광, 농도 소광 현상에 미치는 영향을 조사하였다. 형광체 분말의 결정 구조는 Tb^{3+} 이온의 몰 비에 관계없이 정방정계이었으며, 결정 입자의 형상은 Tb^{3+} 이온의 몰 비에 따라 서로 다른 형태를 나타내었다. Tb^{3+} 가 도핑된 BaMoO_4 형광체 분말의 여기 스펙트럼은 290 nm에 피크를 갖는 반치폭이 넓은 여기 스펙트럼과 Tb^{3+} 이온의 4f-4f 전이 신호로 구성되었다. 파장 290 nm로 여기시켰을 때 형광체는 550 nm에 피크를 갖는 강한 녹색 발광 신호를 방출하였다. Tb^{3+} 이온의 농도가 증가함에 따라 녹색 발광의 세기는 점차 증가하여 10 mol%에서 최대를 나타내었고, Tb^{3+} 이온의 농도가 계속 증가하자 발광 세기는 점차적으로 감소하였다. 이러한 농도 소광 현상은 쌍극자-쌍극자 상호 작용에 의한 비복사선 에너지 전달로 발생함을 입증하였다. 본 연구의 결과로부터 최대 발광 세기를 갖는 녹색 형광체 제조를 위한 최적의 Tb^{3+} 이온의 농도는 10 mol%이며, 백색 발광 다이오드 제작을 위한 녹색 형광체로 응용 가능성을 제시한다.

References

1. S. Shivakumara, R. Saraf, S. Behera, N. Dhananjaya and H. Nagabhushana, *Spectrochim. Acta A*, **151**, 141 (2015).
2. Y. Kojima, M. Numazawa, S. Kamei and N. Nishimiya, *Int. J. Opt.*, **2012**, 1 (2005).
3. G. Zhu, Z. Ci, Y. Shi and Y. Wang, *Mater. Res. Bull.*, **55**, 146 (2014).
4. Y. Li and X. Liu, *Opt. Mater.*, **42**, 303 (2015).
5. X. Lin, X. Qiao and X. Fan, *Solid State Sci.*, **13**, 579 (2011).
6. C. Shivakumara and R. Saraf, *Opt. Mater.*, **42**, 178 (2015).
7. P. Yang, C. Li, W. Wang, Z. Quan, S. Gai and J. Lin, *J. Solid State Chem.*, **182**, 2510 (2009).
8. P. Du and J. S. Yu, *Mater. Res. Bull.*, **70**, 553 (2015).
9. X. F. Wang, G. H. Peng, N. Li, Z. H. Liang, X. Wang and J. L. Wu, *J. Alloy. Comp.*, **599**, 102 (2014).
10. X. Li, Z. Yang, L. Guan and Q. Guo, *Mater. Lett.*, **63**, 1096 (2009).
11. M. Tutuianu, O. R. Inderwildi, W. G. Bessler and J. Warnatz, *J. Phys. Chem. B*, **110**, 17484 (2006).
12. W. D. Kingery, H. K. Bowen and D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd Ed., p. 131, John-Wiley and Sons, USA (1975).
13. R. D. Shannon and C. T. Prewitt, *Acta Crystallogr. B*, **25**, 925 (1969).
14. Z. Hao, J. Zhang, X. Zhang, S. Lu and X. Wang, *J. Electrochem. Soc.*, **156**, H193 (2009).
15. X. Mi, J. Sun, P. Zhou, H. Zhou, D. Song, K. Li, M. Shang and J. Lin, *J. Mater. Chem. C*, **3**, 4471 (2015).
16. J. D. Kim and S. Cho, *Korean J. Mater. Res.*, **24**, 469 (2014).
17. J. Zhang, Y. Wang, Z. Zhang, Z. Wang and B. Liu, *Mater. Lett.*, **62**, 202 (2008).
18. H. L. Li, Z. L. Wang, S. J. Xu and J. H. Hao, *J. Electrochem. Soc.*, **156**, J112 (2009).
19. L. R. P. Kassab, R. de Almeida, D. M. da Silva and C. B. de Araujo, *J. App. Phys.*, **104**, 093531 (2008).
20. L. Jiang, C. Chang, D. Mao and C. Feng, *Mater. Sci. Eng. B.*, **103**, 271 (2003).
21. S. Cho, *J. Korean Phys. Soc.*, **64**, 1529 (2014).
22. J. S. Kumar, K. Pavani, A. M. Babu, N. K. Giri, S. B. Rai and L. R. Moorthy, *J. Lumin.*, **130**, 1916 (2010).
23. R. Naik, S. C. Prashantha, H. Nagabhushana, H. P. Nagaswarupa, K. S. Anantharaju, S. C. Sharma, B. M. Nagabhushana, H. B. Premkumar and K. M. Girish, *J. Alloy. Comp.*, **617**, 69 (2014).
24. D. L. Dexter, *J. Chem. Phys.*, **21**, 836 (1953).
25. S. Dutta, S. Som and S. K. Sharma, *Dal. Trans.*, **42**, 9654 (2013).