

Photoluminescent and low voltage cathodoluminescent properties of $\text{LaNbO}_4 : \text{X}$ ($\text{X} = \text{Bi}, \text{Eu}$) phosphors

On Ji-Won and Youhyuk Kim[†]

Institute of Basic Science, Department of Chemistry, Dankook University, Cheonan 330-714, Korea

(Received October 5, 2005)

(Accepted December 27, 2005)

Abstract Rare-earth niobates, LnNbO_4 ($\text{Ln} = \text{Y}, \text{La}, \text{Gd}$) are well-known self-activated phosphors due to charge transfer in NbO_4^{3-} showing a broad and strong emission band in the spectral region around 410 nm. In order to find new blue and red phosphors for FED, $\text{LaNbO}_4 : \text{X}$ ($\text{X} = \text{Bi}, \text{Eu}$) phosphors are prepared through solid-state reactions at high temperature. The optimum reaction condition for these phosphors to give maximum emission intensity is obtained when it is first fired at 1250°C for 2 h followed by second firing at 1400°C for 1 h. Under irradiation at 254 nm, 1 mol% Bi^{3+} doped LaNbO_4 phosphor shows strong blue emission band with a range of 420~450 nm. Also 10 mol% Eu^{3+} doped LaNbO_4 phosphor shows the maximum emission intensity at about 610 nm. Emission peaks at 415~460 nm, 530~560 nm and 570~620 nm are observed in phosphors below 10 mol% Eu^{3+} doped LaNbO_4 . Similar results are obtained in cathodoluminescent property of these phosphors.

Key words Low voltage cathodoluminescent, Photoluminescent, Lanthanide niobates, FED, Solid state reaction, Phosphor, Excitation spectrum, Emission spectrum

$\text{LaNbO}_4 : \text{X}$ ($\text{X} = \text{Bi}, \text{Eu}$) 형광체의 발광 및 저 전압 음극선 발광 특성

온지원, 김유혁[†]

단국대학교 기초과학 연구소, 첨단과학대학 화학과, 천안, 330-714

(2005년 10월 5일 접수)

(2005년 12월 27일 심사완료)

요약 희토류계 niobates인 LnNbO_4 ($\text{Ln} = \text{Y}, \text{La}, \text{Gd}$)는 자체 발광형으로 NbO_4^{3-} 이온의 전하 이동에 의한 넓은 띠의 청색 발광 스펙트럼을 410 nm에서 나타낸다. 본 연구에서는 새로운 FED용 청색 및 적색 형광체를 개발하기 위하여 $\text{LaNbO}_4 : \text{X}$ ($\text{X} = \text{Bi}, \text{Eu}$) 형광체를 합성하였으며, 1250°C에서 2시간 소성한 후 1400°C에서 1시간 소성하였을 때 최대 발광피크를 얻을 수 있었다. 254 nm의 여기하에서 $\text{LaNbO}_4 : \text{Bi}$ 는 420~450 nm 영역에서 강한 청색 발광 스펙트럼을 나타내며 첨가된 Bi^{3+} 이온 농도가 1 mol%일 때 최대 발광세기를 얻었다. $\text{LaNbO}_4 : \text{Eu}$ 의 경우는 첨가된 Eu^{3+} 이온 농도가 10 mol%일 때 약 610 nm에서 최대 적색 발광 스펙트럼을 나타내고 있다. Eu^{3+} 이온 농도가 10 mol% 이하에서는 415~460 nm, 530~560 nm 및 570~620 nm 영역에서 피크가 관측되고 있다. 이들 형광체의 음극선 발광특성은 빛 발광 특성과 유사한 경향을 보였다.

1. 서론

현재까지 가장 많이 사용되고 있는 정보표시용 디스플레이는 음극선관(CRT)이 주종을 이루고 있지만, 큰 부피와 무게 그리고 높은 구동전압으로 인해 불리한 점이 많기 때문에 평판 디스플레이의 개발이 요구되고 있다. 특히 전계 방출 디스플레이(FED)는 진공 평판 음극선

튜브를 사용한 새로운 형태의 디스플레이로서 1 kV 이하의 저전압 구동이며 부피 및 무게를 줄일 수 있는 이점 때문에 종래의 CRT를 대체할 수 있는 차세대 평판 디스플레이의 후보 표시장치로 주목 받고 있다[1].

FED의 핵심 요소 기술 중 양극 기술의 경우 주로 형광체 개발에 초점이 맞추어지고 있는데, 크게 고전압 형광체와 저전압 형광체 개발로 분류되고 있다. 고전압 형광체의 경우, FED는 CRT와 같이 음극선을 에너지원으로 사용하기 때문에 CRT용 형광체가 우선적으로 연구되어졌다. 이러한 황화물계 형광체는 주로 3,000 V 이상의 전압에서 동작하며, 형광체 기술이 이미 확립되어 있

[†]Corresponding author
Tel: +82-41-550-3436
Fax: +82-41-551-9229
E-mail: hyukim@dankook.ac.kr

고, 효율이 높고, 수명이 길며 색 순도가 우수하다는 장점을 지니고 있다. 반면에 고전압 인가 시 아킹 및 전기적 항복(breakdown)을 방지하기 위해 음극과 양극 간에 일정 거리가 요구되는데, 이로 인해 빔의 퍼짐을 방지하는 초점 조절 전극, 상판과 하판을 지지하기 위해 큰 중량비를 갖는 내부지지 구조가 필요하다는 번거로움이 있다[2].

한편, 저전압 형광체 FED는 1,000 V 이하의 양극 전압에서 동작하며 이로 인해 음극과 양극간의 간격이 300 μm 이내에 불과하여 전자선이 크게 퍼지지 않으므로 초점 조절용 전극이 불필요하고, 스페이서 재료로서 간단한 물질들(유리구, 프리트 등)을 사용할 수 있다는 장점이 있으나, 저전압 형광체 기술이 완성되지 않은 상태로 고전압 형광체와 동일 회도를 얻기 위해서는 10배 이상의 전류가 필요하며, 따라서 성능, 효율, 수명 개선을 위한 형광체 연구가 절실히 요구되고 있다.

Lanthanide niobate, LnNbO_4 는 fergusonite(YNbO_4) 구조를 가지며 특히 lanthanum과 yttrium orthoniobates는 자체 발광형으로 $[\text{NbO}_4]^{3-}$ 이온의 전하 이동에 의한 409nm 영역에서 넓은 띠의 청색 발광 스펙트럼을 나타낸다[3]. 이들 형광체에 대한 연구는 발광특성향상을 위해 niobate에 희토류의 활성제를 첨가하고 있으나[4], 아직까지 많은 연구가 이루어지지 않아 중요한 개선이 이루어지지 않고 있다. 현재는 영국의 Vecht에 의해 연구된 $\text{YNbO}_4 : \text{Bi}$ 형광체가 상용의 청색 형광체인 P47 ($\text{Y}_2\text{SiO}_5 : \text{Ce}$)보다 우수한 특성을 나타낸다고 보고되고 있다[5, 6].

따라서 본 연구에서는 희토류 niobate 중 하나인 lanthanum niobate(LaNbO_4)를 모체로 하여 Bi^{3+} 와 Eu^{3+} 이온을 다양한 비율로 첨가하여 합성된 형광체 분말의 발광특성을 비교하였으며 FED용 저전압 형광체로서의 가능성 여부를 알기 위해 음극선 발광특성을 살펴보았다.

2. 실험 방법

$\text{LaNbO}_4 : \text{X}$ ($\text{X} = \text{Bi}, \text{Eu}$) 형광체를 제조하기 위하여 출발물질로는 La_2O_3 (Aldrich, 99.99%), Nb_2O_5 (Aldrich, 99.99%), Bi_2O_3 (Aldrich, 99.99%), Eu_2O_3 , (Aldrich, 99.99%) 시약이 사용되었다. 또한, 출발물질들의 균일한 혼합을 위해 약간의 acetone(CH_3COCH_3 , Ducksan)을 사용하였다.

$\text{LaNbO}_4 : \text{X}$ ($\text{X} = \text{Bi}, \text{Eu}$) 형광체의 합성여부를 확인하고 입자의 결정성을 측정하기 위해 XRD(X-ray Diffraction, Shimadzu, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, Lamp 30 kV, 30 mA, $\text{Cu-K}\alpha$)를 사용하였고, 합성된 시료의 발광 및 여기 스펙트럼은 Fluorescence Spectrophotometer(Perkin Elmer, Model

LS50)로 측정하여 얻었다. 각 분말 시료를 원형 홀더에 표면이 고르게 채워 넣은 후 여기 스펙트럼을 200~400 nm에서 측정하여 최대 흡수 피크를 갖는 파장을 조사과장으로 발광 스펙트럼을 측정하였다. 저전압 음극선 발광스펙트럼은 Cathodo-Luminescence Spectrophotometer (PSI)를 사용하여 800 V, 2.5 A의 전자선 여기에 의해 발광 스펙트럼을 얻었다.

LaNbO_4 형광체의 제조는 La_2O_3 와 Nb_2O_5 을 1 : 1의 비율로 정량한 후 전체 약 3 g의 원료를 마노유발(mortar)을 사용하여 1시간 이상 혼합하여 제조하였다. 이때 보다 균일하고 효과적으로 혼합될 수 있도록 약간의 아세톤용매를 첨가하여 혼합하였다. 제조된 시료를 알루미늄 도가니(alumina crucible)에 채워 상자로(box furnace)에 장입한 후 1100°C~1400°C 영역에서 100°C 간격으로 3시간 동안 소성하였다. 또, 이러한 소성 온도조건과는 달리 1250°C에서 2시간 소성한 후, 다시 마노유발에 넣고 덩어리진 시료를 분쇄 혼합하여 1400°C에서 1시간 동안 2차 소성을 수행하였다[7].

Bi^{3+} 이온이 $\text{LaNbO}_4 : \text{Bi}$ 형광체의 발광특성에 미치는 영향을 알아보고 최적의 도핑 양을 결정하기 위하여 $\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Bi}_x$ ($x = 0.01\sim 0.7$) 형광체를 합성하였다. 또한 Eu^{3+} 이온이 $\text{LaNbO}_4 : \text{Eu}$ 형광체의 발광특성에 미치는 영향을 알아보고 최적의 활성제 양을 결정하기 위한 실험으로 $\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Eu}_x$ ($x = 0.01\sim 0.7$) 형광체를 합성하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 고상 반응법에 의한 LaNbO_4 , $\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Bi}_x$ 및 $\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Eu}_x$ 형광체의 제조 및 확인

LaNbO_4 형광체의 최적 합성 조건을 알아보기 위해 소성 온도를 달리하여 실험하였다. 첫 번째 실험에서는 La_2O_3 와 Nb_2O_5 을 1 : 1의 비율로 정확히 섞은 뒤 1100~1400°C에서 3시간 소성하였다. 두 번째 방법으로 1250°C에서 2시간 소성한 후 덩어리진 것들을 분쇄하여 1400°C에서 1시간 동안 2차 소성하는 방법을 택했다. 생성된 형광체는 백색의 분말 형태였으며, 합성된 형광체의 확인은 X-선 회절법을 이용하였다. Fig. 1에 소성온도에 따른 X-선 회절 결과를 도시하였다. 분석결과 소성온도가 증가함에 따라 출발물질들에 해당하는 피크들은 감소하고 LaNbO_4 형광체에 해당하는 피크들은 증가함을 보였으며 고온인 1400°C에서 3시간 동안 소성하는 방법보다 상대적으로 낮은 온도인 1250°C에서 2시간 소성하고, 1400°C에서 1시간 동안 2차 소성하면 불순물의 양이 감소함을 관측할 수 있었다. 그러므로 이 방법이 최적의 합성 조

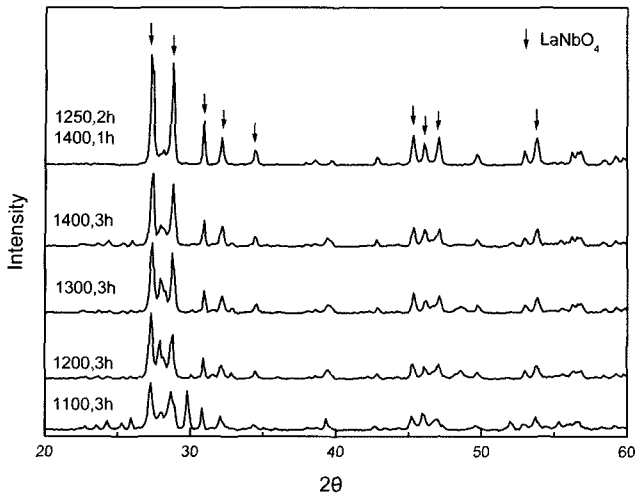


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of LaNbO₄ phosphors calcined at different temperatures.

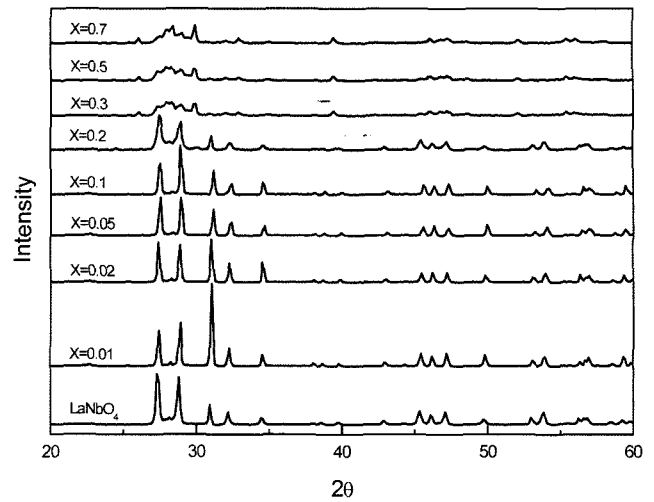


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of La_{1-x}NbO₄ : Eu_x phosphors with different Eu concentrations.

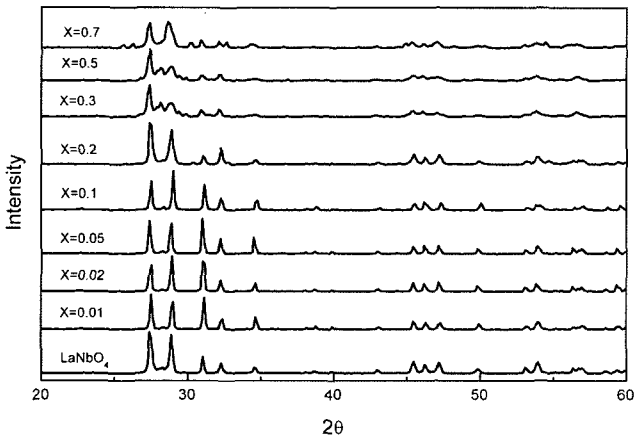


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of La_{1-x}NbO₄ : Bi_x phosphors with different Bi concentrations.

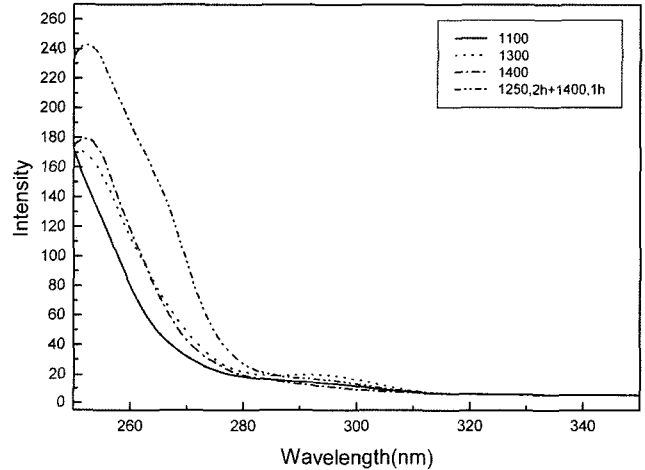


Fig. 4. Excitation spectra of LaNbO₄ phosphors calcined at different temperatures ($\lambda_{em} = 403$ nm).

견임을 보여주고 있다. 이후 Bi³⁺ 이온과 Eu³⁺ 이온이 첨가된 형광체의 경우 앞서 언급한 최적조건에서 제조하였다. Fig. 2는 고상 반응법으로 제조한 La_{1-x}NbO₄ : Bi_x (x = 0.01~0.7) 형광체의 합성여부를 확인하기 위해 XRD를 측정하여 X선 회절 결과를 나타낸 것이다. Bi³⁺ 이온의 농도가 1 mol%에서 20 mol%이었을 때는 LaNbO₄ : Bi 형광체가 고용체로 존재함을 확인할 수 있으나, 그 이상의 농도에서는 Bi³⁺가 과량 첨가되면서 새로운 상이 형성됨을 알 수 있었다. LaNbO₄ 모체에 Bi³⁺ 이온 대신에 Eu³⁺ 이온을 첨가한 경우에도 Fig. 3에서 보듯이 유사하게 Eu³⁺ 이온의 농도가 30 mol% 이상부터 새로운 상의 생성이 관측되고 있다.

3.2. LaNbO₄ 형광체의 발광 특성

Fig. 4는 403 nm 피크를 선택하여 250~320 nm 파장

범위에서 측정된 LaNbO₄의 여기 스펙트럼을 보여주고 있으며 [NbO₄]³⁻에 기인하는 여기 띠가 255 nm 부근에 중심을 두고 넓게 관측되고 있다. 이런 결과는 같은 형태를 갖고 있는 YNbO₄에서도 관측되고 있으며 [NbO₄]³⁻ 내의 전하 이동 띠로 설명되고 있다[8]. Fig. 5는 254 nm의 광원하에서 측정된 LaNbO₄의 발광 스펙트럼을 보여주고 있으며 400~410 nm 부근에서 최대 발광세기를 보이며 피크 반폭은 113 nm로 넓은 띠를 형성하고 있다. 이런 특징은 LnNbO₄(Ln = Y, Gd) 계열 형광체와 함께 청색 형광체로 이용될 수 있음을 보여 주고 있다. 또한 Fig. 4와 5는 형광체 합성 조건에 따른 여기 및 빛 발광 특성을 나타내며 1250°C에서 2시간 소성한 후 1400°C에서 1시간 동안 2차 소성한 형광체의 발광세기가 가장 우수함을 보여주고 있다. 이러한 결과는 Fig. 1에 도시되어 있는 X선 회절 결과와 잘 일치하고 있다. Fig. 6

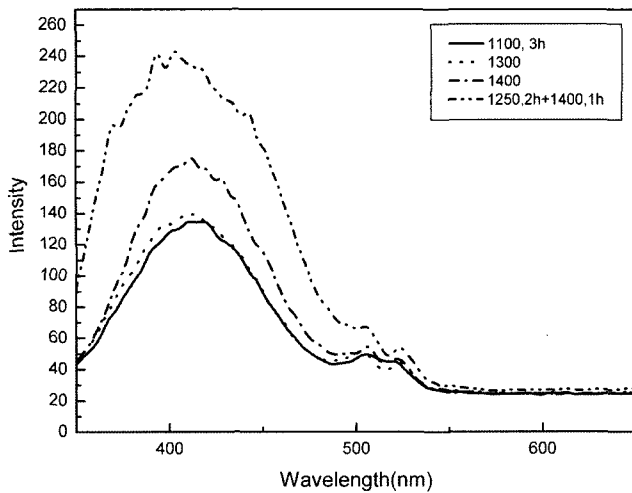


Fig. 5. Emission spectra of LaNbO_4 phosphors calcined at different temperatures ($\lambda_{\text{ex}} = 254 \text{ nm}$).

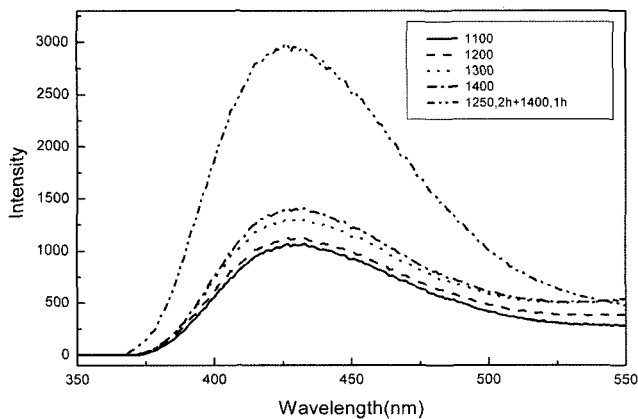


Fig. 6. Cathodoluminescence spectra of LaNbO_4 phosphors calcined at different temperatures.

은 LaNbO_4 의 CL 측정 결과를 나타내고 있으며 형광체 합성 조건에 따른 발광특성은 PL특성과 유사하게 두 번째 실험 방법이 우수함을 보여주고 있다. CL 스펙트럼에서 최대 발광세기의 파장은 420 nm 부근으로 이동하였으며 이는 CL에서 색 특성이 우수함을 보여주고 있다.

3.3. $\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Bi}_x$ 형광체의 광 특성

$\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Bi}_x$ 형광체의 여기 스펙트럼과 발광스펙트럼을 Fig. 7과 8에 각각 도시하였다. Fig. 7의 여기스펙트럼 분석 결과, Bi^{3+} 이온을 첨가하면 290~310 nm 부근에서 여기 띠가 관측되며 이것은 LaNbO_4 형광체의 여기스펙트럼에서는 나타나지 않는 피크로써 Bi^{3+} 에 의해 나타나는 피크라 할 수 있다. 유사하게 $\text{YNbO}_4 : \text{Bi}$ 형광체의 경우에는 O^{2-} 이온에서 Bi^{3+} 이온의 6p 궤도함수로의 전하이동에 의한 피크가 310 nm에서 관측되고 있다[9]. Fig. 8에 도시되어 있는 발광 스펙트럼의 분석

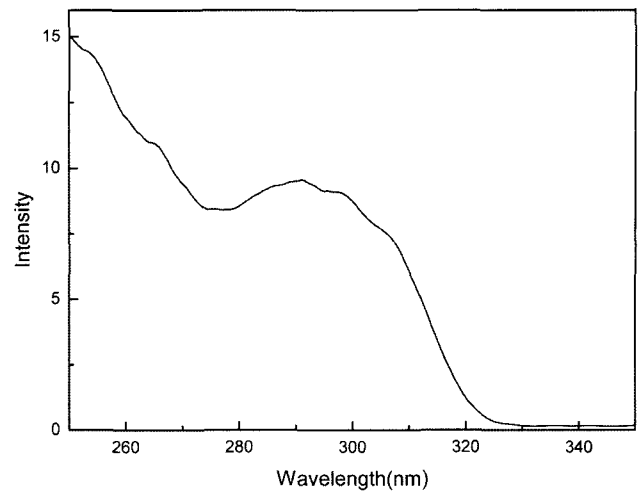


Fig. 7. Excitation spectrum of $\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Bi}_x$ ($x = 0.01$) phosphor ($\lambda_{\text{em}} = 403 \text{ nm}$).

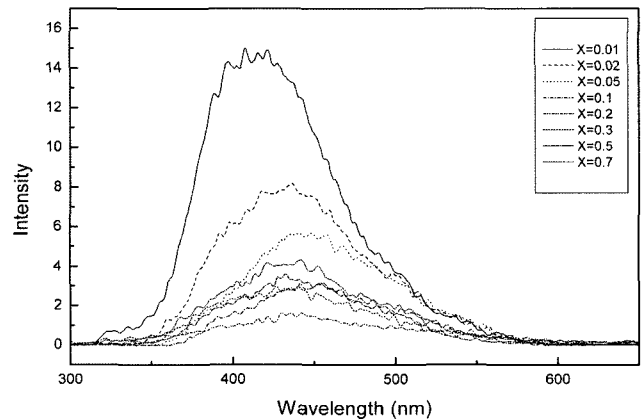


Fig. 8. Emission spectra of $\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Bi}_x$ phosphors with different Bi concentrations ($\lambda_{\text{ex}} = 254 \text{ nm}$).

결과, $\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Bi}_x$ 형광체는 254 nm의 파장으로 여기시킴에 따라 청색 발광 영역인 약 420~450 nm에서 비교적 높은 피크를 갖는 발광스펙트럼을 보이고 있다. 또한, Bi^{3+} 이온의 농도가 증가함에 따라 발광세기의 최대치가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이런 현상은 $\text{YNbO}_4 : \text{Bi}$ 의 경우에 Bi_2O_3 의 960~1010°C의 낮은 휘발온도에 의한 출발물질 조성비의 불일치로 원하는 상의 형성이 안 이루어져 발광특성을 저하시키는 현상으로 설명되고 있으나[10], Fig. 2를 살펴보면 Bi^{3+} 의 양이 20 mol%가 되어도 원하는 상이 형성됨을 관측할 수 있었다. 그러므로 이것은 활성제의 양이 증가함에 따라 나타나는 농도 소광(concentration quenching) 현상으로 이해할 수 있다 [11]. Fig. 8은 합성된 형광체의 발광스펙트럼을 보이고 있으며 Bi^{3+} 의 농도가 증가함에 따라 LaNbO_4 의 400~410 nm에 비하여 장파장쪽으로 발광스펙트럼의 최대치가 이동됨을 보이고 있으며 이러한 경향은 1 mol%에서 10 mol%까지에서 볼 수 있고 그 이상의 농도에서는 발

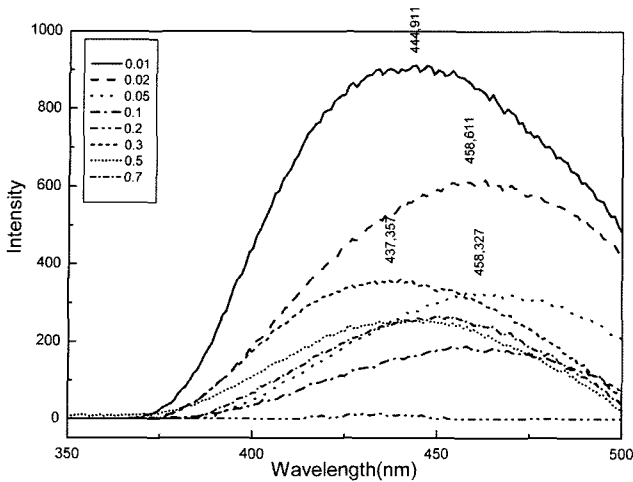


Fig. 9. Cathodoluminescence spectra of $\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Bi}_x$ phosphors with different Bi concentrations.

광 스펙트럼의 최대치가 거의 감소하지 않으며 더 이상 장파장 쪽으로의 이동도 없다. 이것은 LaNbO_4 의 띠 구조(band structure)에서 Bi^{3+} 이온의 $6s^2$ 에너지 준위가 valence band 바로 위에 위치하여 띠 간격이 감소하여 장파장 쪽으로 이동하는 것으로 생각할 수 있다[5]. 이런 현상은 Bi^{3+} 에 의한 효과로 $\text{YNbO}_4 : \text{Bi}$ 의 경우에도 관측되고 있다[9]. 한편, 위의 시료를 800 V, 2.5 A에서 측정된 저 전압의 전자선 여기에 의해 관측된 CL스펙트럼을 Fig. 9에 나타내었으며 수치는 최대발광 파장을 나타낸다. 전체적인 청색 발광은 빛 발광 스펙트럼과 매우 유사한 경향을 보여주고 있으나, Bi^{3+} 의 증가에 따라 발광 스펙트럼의 최대치가 매우 빠르게 감소하는 경향을 보여주고 있다.

3.4. $\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Eu}_x$ 형광체의 광 특성

Eu^{3+} 이온이 활성제로 LaNbO_4 에 미치는 영향을 알아보고 새로운 적색 FED 후보형광물질로서의 가능성을 보기 위하여 $\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Eu}_x$ 를 제조하였다. Fig. 10에서는 $\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Eu}_x$ 형광체를 254 nm로 여기시켜 Eu^{3+} 이온의 농도에 따른 발광 피크의 변화를 관측할 수 있었다. Eu^{3+} 이온의 농도가 1 mol% 일 때는 415~460 nm에 약한 피크, 530~560 nm 및 570~620 nm 영역에 같은 세기의 피크가 관측되고 있다. Eu^{3+} 이온의 농도가 20 mol%로 증가함에 따라 570~620 nm 영역의 피크의 세기는 증가하고 있으나 415~460 nm와 530~560 nm 영역의 피크는 감소되고 있음을 관측할 수 있다. 이런 현상은 Eu^{3+} 이온의 농도가 증가함에 따라 LaNbO_4 에 기인하는 청색의 415~460 nm의 피크는 감소하고 적색 발광 영역인 $^5\text{D}_0-^7\text{F}_2$ 전이에 해당되는 613 nm 부근에 발광 세기는 증가하여 이 형광체가 FED용 적색 형광체로 응용

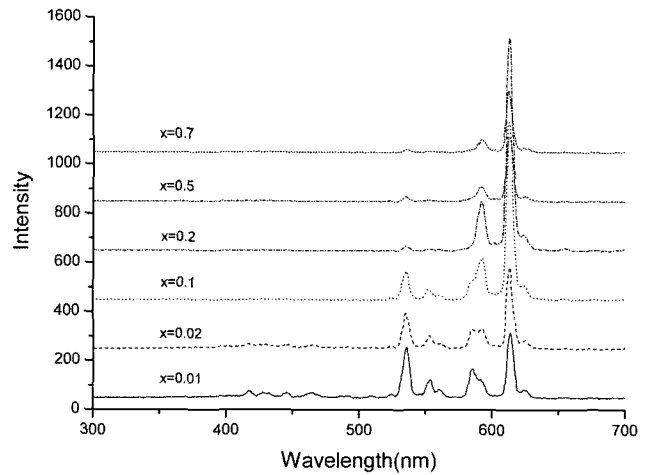


Fig. 10. Emission spectra of $\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Eu}_x$ phosphors with different Eu concentrations ($\lambda_{\text{ex}} = 254 \text{ nm}$).

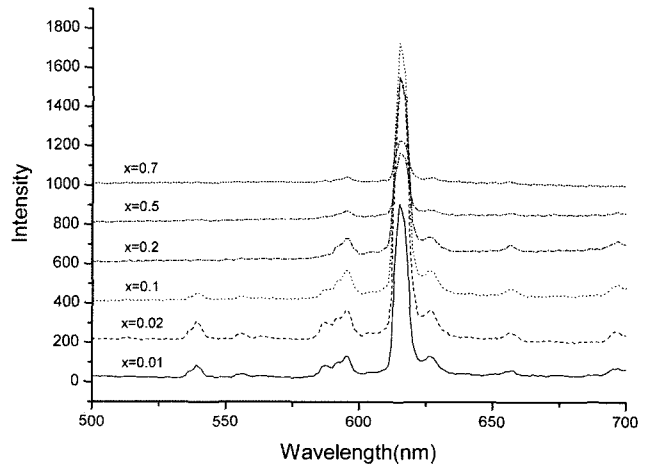


Fig. 11. Cathodoluminescence spectra of $\text{La}_{1-x}\text{NbO}_4 : \text{Eu}_x$ phosphors with different Eu concentrations.

될 수 있음을 보여주고 있다. 530~560 nm 영역의 피크는 Eu^{3+} 이온의 $^5\text{D}_1-^7\text{D}_2$ 에 의한 발광피크일 수 있으며 cross-relaxation 과정에 의한 농도 소광 현상에 의해 감소하는 것으로 해석할 수 있다.

이러한 특성은 Fig. 11에 도시되어 있는 800 V, 2.5 A의 저전압 음극선 여기하에서 관측된 발광 스펙트럼에서도 유사하게 볼 수 있으며, 분석 결과를 살펴보면, Eu^{3+} 이온의 농도가 10~20 mol%일 때 최대 발광피크를 나타낼 수 있었다.

4. 결 론

FED용 저 전압 형광체 제조를 위해 자체발광형인 niobate를 모체로 LaNbO_4 청색 형광체를 고상반응법으로 합성하였다. 소성조건을 달리하여 발광특성을 살펴보

았는데, 1250°C 에서 2시간 소성과 1400°C 에서 1시간 소성을 수행하는 조건에서 최대 발광피크를 얻었다. 또한, 활성제의 영향을 알기 위하여 Bi^{3+} 와 Eu^{3+} 이온 첨가에 따른 LaNbO_4 청색 형광체의 발광특성을 조사하였다. LaNbO_4 에 Bi^{3+} 이온을 도핑하여 형광체를 합성한 경우 420~450 nm 영역에 청색 발광 스펙트럼을 얻었으며 254 nm의 여기하에서 최대 발광피크는 도핑된 양이 1 mol% 일 때 얻어졌다. 이 때 Bi^{3+} 이온의 도핑양이 증가할수록 발광 최대치가 감소하는 경향을 보였는데, 이것은 활성제 양이 증가됨에 따라 나타나는 농도소광 현상으로 볼 수 있다. 또한 Bi^{3+} 의 양 증가에 따라 발광피크가 장파장 쪽으로 이동되는 것을 볼 수 있는데, 이는 O^{2-} 에서 Bi^{3+} 로의 전하 이동에 기인하기 때문이다. $\text{LaNbO}_4 : \text{Eu}$ 형광체의 경우 1 mol%에서는 415~460 nm, 530~560 nm 및 570~620 nm 영역에 피크가 관측되고 있으나 도핑되는 양이 10 mol%일 때 610 nm 부근에서 최대 발광피크를 나타내는 적색 발광 스펙트럼이 얻어졌다. 음극선 발광특성은 빛 발광 특성과 유사한 경향을 보이고 있으나 Bi^{3+} 이온 첨가시 발광최대 파장이 장파장 쪽으로 이동하는 Bi 효과를 관측할 수 있었다. 본 연구에서 합성된 $\text{LaNbO}_4 : X$ ($X = \text{Bi}, \text{Eu}$)는 FED용 형광체로 적용 가능함을 보여 주고 있다.

감사의 글

이 연구는 2004년도 단국대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었으며 이에 감사합니다.

참 고 문 헌

[1] Y.S. Na and O.K. Kwon, "FED driving method", *Information Display* 2(3) (2001) 63.

- [2] B.K. Ju, "Trends and prospects of FED technology", *Information Display* 2(3) (2001) 6.
- [3] G. Blasse and B.C. Grabmaier, "Luminescent materials", 1st ed. (Springer-Verlag, Berlin, 1994) p25.
- [4] D. Grisafe and B. Fritsch, "Rare earth niobate systems and the phosphor $\text{GdNbO}_4 : \text{Bi}$ ", *J. Solid State Chem.* 17 (1976) 313.
- [5] A. Vecht, C.S. Gibbons, D.W. Smith and X. Jing, "New blue emitting phosphor thin films for FEDs", The 2nd International Conference on the Science and Technology of Display Phosphors, San Diego, U.S.A. (1996) 277.
- [6] A. Vecht, D. Charlesworth and D.W. Smith, "Niobate phosphors for low-voltage applications", *SID '97*, 28, (1997) 588.
- [7] X. Jing, C. Gibbons, D. Nicholas, J. Silver, A. Vecht and C.S. Frampton, "Blue luminescence in yttrium and gadolinium niobates caused by bismuth. The importance of non-bonding ns^2 valence orbital electrons", *J. Mater. Chem.* 9 (1999) 2913.
- [8] R.C. Ropp, "Luminescence and the solid state", 1st ed. (Elsevier, Amsterdam 1991) 446.
- [9] S.K. Lee, H. Chang, C.H. Han, H.J. Kim, H.G. Jang and H.D. Park, "Electronic structures and luminescence properties of YNbO_4 and $\text{YNbO}_4 : \text{Bi}$ ", *J. Solid State Chem.* 156 (2001) 267.
- [10] C.H. Han, H.-J. Kim and H.D. Park, "Photo- and cathod-luminescent properties of $\text{YNbO}_4 : \text{Bi}$ phosphors", *J. Kor. Ceram. Soc.* 35(3) (1998) 245.
- [11] M.D. Lumb, "Luminescence spectroscopy", 1st ed. (Academic Press, London, 1978) p.70.
- [12] H. Yamamoto, "CRT phosphors with a scope to FED phosphors", The First International Conference on the Science and Technology of Display Phosphors, San Diego, U.S.A. (1995) 15.