

Boron Oxide Flux를 이용한 $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ 청색 형광체의 제조 및 발광 특성

한정화 · 김현정 · 박희동
한국화학연구소 화학소재연구부
(1998년 12월 19일 접수)

Preparation and Luminescent Properties of $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ Phosphors by Flux Technique with B_2O_3

Cheong-Hwa Han, Hyun-Jung Kim and Hee Dong Park

Advanced Materials Division,
Korea Research Institute of Chemical Technology, Taejon 305-764, Korea
(Received December 19, 1998)

초 록

기존의 고상 반응법에 의해 합성된 $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ 형광체의 발광특성을 개선하기 위하여 B_2O_3 용제 첨가법으로 형광체를 합성하고, 빛발광(PL) 및 저전압 음극선발광(CL)을 측정하였다. PL 및 CL 모두 415~440 nm 영역에서 강한 청색 발광 스펙트럼을 나타냈으며, 고상 반응의 경우와 마찬가지로 Y/Nb 비율이 화학 양론상의 1:1인 경우보다 결합구조를 인위적으로 조절한 51/49나 54/46에서 최대의 발광강도를 보였다. 한편, 고상 반응에서는 1250°C에서 4시간 열처리하는 것이 최대의 발광효과를 나타냈으나,^{14,15)} B_2O_3 용제를 첨가하고 1100°C에서 열처리한 시료가 결정성이 좋고 입자의 크기 및 형태가 균일하여 PL뿐만 아니라 CL에서도 우수한 발광특성을 보였다. B_2O_3 용제를 첨가하는 방법으로 열처리 온도를 낮추고 입자크기와 형태를 조절하여 형광체의 휘도를 개선할 수 있었다.

ABSTRACT

A new processing method using flux technique with B_2O_3 was conducted to improve the performance of $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ phosphors, and their powder and luminescent properties were characterized by XRD, SEM, PL and CL. The properties were compared with those of the powders prepared by a solid state reaction method. The phosphors emit very intensive blue light in the wavelength range between 415 and 440 nm at both the PL and CL conditions. The maximum intensity of emission spectra is observed at the Y/Nb ratio of 51/49 or 54/46 in $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ phosphors. Whereas the phosphor fired at 1250°C for 4 h is proved to show the maximum intensity in the case of solid state reaction method, the B_2O_3 flux method produced the optimum phosphor powder of uniform shape with an improvement of luminescent intensity when fired at 1100°C. Consequently, the higher luminescent efficiency was able to be achieved through the powder shape control at even lower temperature by using the flux technique with B_2O_3 .

Key words : Bi^{3+} doping, YNbO_4 , B_2O_3 flux, Phosphor, Photoluminescence, Cathodoluminescence

1. 서 론

현재 정보표시용 디스플레이로 널리 쓰이고 있는 음극선관(CRT)은 화면의 대형화에 따라 치명적인 단점으로 큰 부피와 무거운 중량 등을 들 수 있는데, 이러한 CRT의 한계점으로 인해 평판 디스플레이의 개발이 절실히 요구되고 있다. 이 중에서 특히, 전계방출디스플레이(FED)는 진공 평판 음극선 튜브를 사용한 새로운 형

태의 차세대 디스플레이로 각광받고 있다. FED의 발광은 저전압 음극선 여기를 기본으로 하고 있으며,¹⁾ 이에 사용되는 저전압용 형광체는 FED뿐만 아니라 형광표시판(VFD) 등의 핵심소자로서도 매우 주목받고 있는 물질이다. 기존의 CRT나 표시소자에 많이 사용되어 온 황화물계 형광체는 고진공이 요구되는 저전압용 형광체로 사용하기에는 황화물의 분해로 인해 발생하는 가스가 음극의 발광특성을 열화 시켜 수명을 급격히 감소시키

므로 FED용 형광체로 적합하지 않다. 따라서 FED의 실용화를 위하여 저속전자관에서 발광효율이 뛰어나며 고진공에서도 안정한 물성을 갖는 새로운 형광체의 개발이 절실히 요구되고 있다. 특히 높은 휘도의 저전압용 청색 형광체를 얻기 위해 고진공과 오염에 큰 문제가 없는 산화물 형광체의 개발이 시급한 실정이다.

$\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$ 계의 YNbO_4 에는 fergusonite 결정구조의 저온상(monoclinic : M-phase)과 scheelite형 구조의 고온상(tetragonal : T-phase)이 존재하는데, 저온상의 YNbO_4 는 약 900°C에서 고온상으로 전환된다.²⁻⁵⁾ Yttrium niobate 는 자체 발광형으로 $[\text{NbO}_4]^{3-}$ 이온의 전하 이동(charge transfer transition)에 의한 넓은 띠의 청색 발광 스펙트럼(395~400 nm)을 나타낸다. 지금까지 M-fergusonite 결정구조의 yttrium이나 gadolinium niobate를 모체로 하여 bismuth 또는 lanthanum을 포함한 희토류 원소들을 도핑하는 시도가 여러 차례 있었으나 만족할 만한 결과를 얻지 못했다.⁶⁻⁹⁾ 이외에도 yttrium niobate에 희토류 원소를 도핑하면 항상 임자 물질(host material)보다 발광특성이 저하된다는 연구보고도 있었다.¹⁰⁾ 최근에 Vecht¹¹⁻¹³⁾와 본 연구팀^{14,15)}에 의해 $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ 형광체가 기존의 CRT용 청색 형광체인 P47($\text{Y}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$)을 대체할 수 있는 새로운 저전압용 청색 형광체로서 FED에 적용될 수 있다는 가능성이 제시되었다.

YNbO_4 계 형광체의 합성 방법으로는 고온 반응, citrate complex의 소결, 금속 알콕사이드의 열분해 및 음제 첨가법 등이 알려져 있다. 지금까지의 연구결과에 의하면,^{14,15)} $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ 형광체를 고온 반응으로 합성하려면 1250°C 이상의 고온에서 열처리해야 하는데, 이와 같은 합성 조건에서는 형광체에 적합한 입자크기나 모양을 조절하기 어려울 뿐만 아니라, 휘발성이 매우 높은 Bi_2O_3 도핑제의 휘발을 축진하여 오히려 발광효과를 저하시키게 된다. 따라서 본 연구에서는 B_2O_3 를 용제로 첨가하여 합성 온도를 낮추고, 입자의 크기와 형태를 조절함으로써 기존의 고온 반응법에 의해 합성된 $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ 형광체의 발광특성을 개선하고자 시도하였다.

2. 실험방법

Fig. 1은 용제 첨가법에 의한 $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ 형광체 제조의 개략적인 공정도를 나타낸다. 출발원료로 일본의 고순도화학연구소의 Y_2O_3 (99.99%) 분말, Nb_2O_5 (99.99%) 분말과 dopant로 쓰이는 Bi_2O_3 (99.99%) 분말을 원하는 조성에 따른 각각의 소정비가 되도록 평량한 후, 용제로 YNbO_4 에 대하여 3 mol 정도 과량의 B_2O_3 (99.99%) 분말을 넣고 아세톤용매 내에서 mixer mill을 사용하여 고

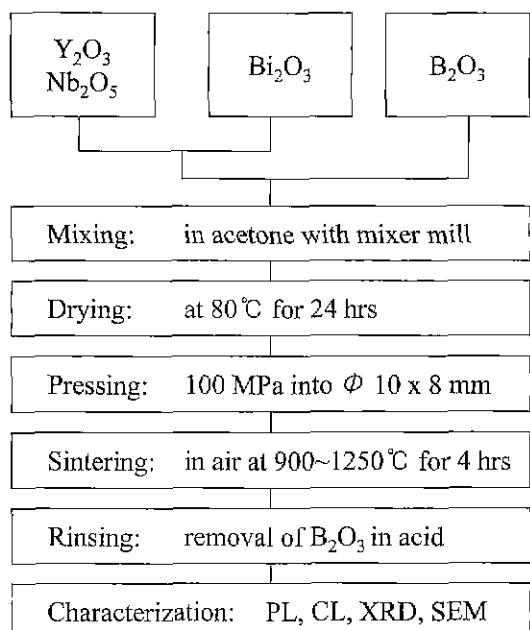


Fig. 1. Flow chart of the sample preparation of $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ phosphors.

르게 혼합하였다. 80°C에서 24시간 전조한 시료를 각 1.5 g 정도의 pellet($\phi 10 \times 8 \text{ mm}$)으로 만들어 백금 판으로 된 보트에 넣고 이를 다시 고순도 알루미나 도가니에 넣은 후, 뚜껑을 덮은 상태로 전기로를 사용하여 공기 중의 900~1250°C에서 4 시간 동안 가열하였다. 용제로 쓰인 과량의 B_2O_3 를 제거하기 위해 끓은 HCl 용액에 1시간 정도 끓인 후, 100°C에서 24시간 전조 시켰다.

합성된 시료의 상 확인 및 결정성을 조사하기 위하여 Rigaku사의 DMAX-33 X-선 분말 회절 분석기로 X-선 회절 무늬를 측정하였다. 이 때 사용한 X-선의 파장은 1.54 Å인 $\text{Cu}/\text{K}\alpha$ 선이고, Ni filter를 사용하였으며 35 kV, 20 mA의 조건에서 측정하였다. 분말 시료의 입자크기와 모양은 JEOL사의 JSM-840A 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 조사하였다. 합성된 시료의 빛발광(PL) 및 여기 스펙트럼은 Perkin Elmer LS 50 형광분광광도계로 측정하여 얻었다. 모든 시료에 대하여 펄스 제논 방전 램프로부터 254 nm radiation으로 여기 시켰다. 이때의 발광 스펙트럼은 240 nm/min의 주사속도로 300~600 nm의 파장영역에서 주사하여 얻었으며, 여기 스펙트럼의 측정을 발광 스펙트럼과 동일한 주사속도로 200 nm에서 400 nm 까지 주사하여 얻었다. 여기 스펙트럼의 발광 파장은 418 nm로 고정시켜 측정하였다. 한편, 음극선발광(CL) 특성을 조사하기 위해, 800 V, 2.4 mA의 저전압 전자선으로 여기 시켜 발광스펙트럼을 얻었다.

3. 결과 및 고찰

형광체의 일반적인 합성 방법인 고온 반응법과 함께 합성 조건, 입자의 크기 및 형태를 조절하기 위한 B_2O_3 용제 첨가법에 의해 제조된 $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ 형광체를 X-선 회절 분석기(XRD)와 주사전자현미경(SEM)을 통해 비교하였다. Fig. 2에 나타낸 X-선 회절 분석 결과에 의하면, 기존의 고온 반응에 의해 합성한 경우에는 1250°C 이상의 고온에서 열처리해야 M-fergusonite 결정구조를 갖는 저온상의 YNbO_4 를 얻을 수 있었으나,^{14,15)} B_2O_3 용제의 첨가로 그 이하의 낮은 온도에서도 결정성이 우수하고 단일한 저온상이 형성된 것을 알 수 있었다. 또한 B_2O_3 용제를 첨가하여 다양하게 열처리 조건을 변화시켜보았으나, 고온 반응의 경우와 마찬가지로 scheelite 구조의 고온상을 얻을 수 없었다. B_2O_3 용제 첨가법에 의해 제조된 YNbO_4 는 900°C에서 이미 저온상이 형성되기 시작하여 1100°C에서는 미 반응물인 Nb_2O_5 가 완전히 없어지고 단일한 상이 형성되었다. 1250°C 이상의 고온에서 열처리한 경우에도 X-선 산란 강도의 변화가 거의 없어 1100°C의 경우와 비슷한 결정성을 보임을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 소성 온도를 고온 반응보다 낮은 1100°C로 고정해서 실험하였는데, 이와 같은 합성 조건하에서는 회발성이 매우 높은 Bi_2O_3 도핑제의 회발 정도를 최소화함으로써 발광 효과를 높일 수

있었다. 한편, 이 그림에는 나타내지 않았지만 도핑제로 쓰이는 Bi_2O_3 양의 변화(0.1~1.0 wt%)에 따른 X-선 회

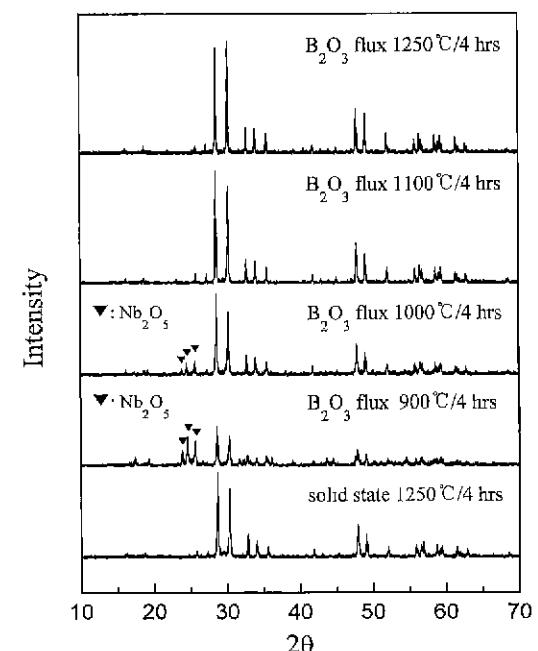


Fig. 2. X-ray diffeaction patterns of $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ powders in various calcining conditions.

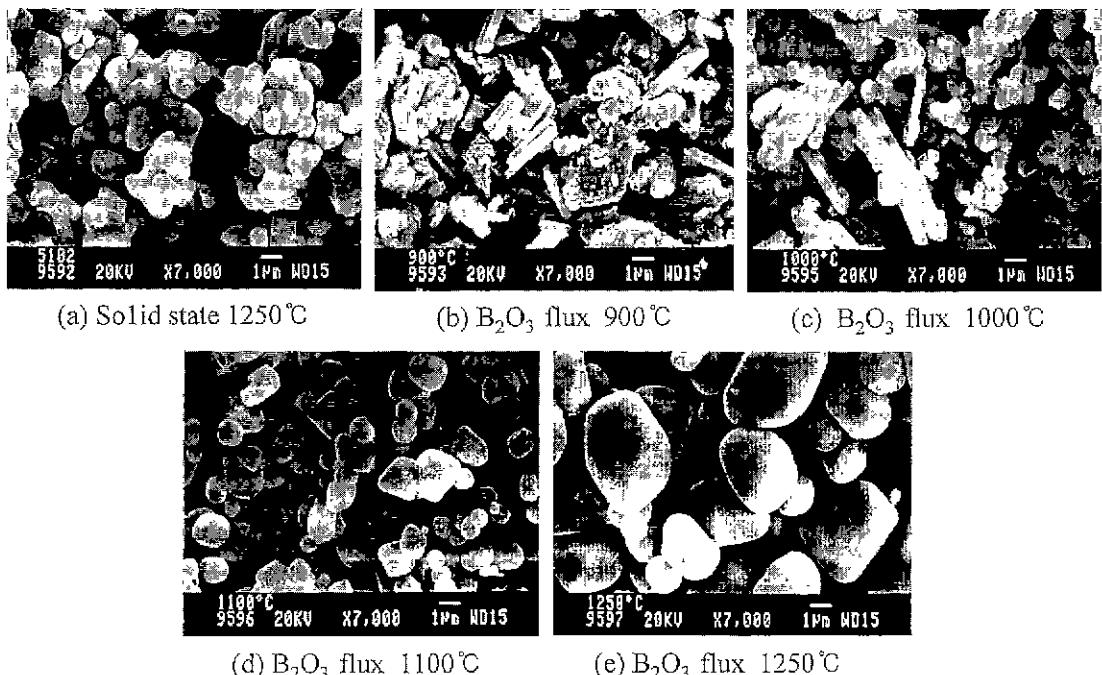


Fig. 3. SEM photograph of $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ phosphors in various calcining conditions.

질 패턴을 비교해 본 결과, 도핑제의 첨가량이 증가하여 YNb₄:Bi 형광체의 결정성에는 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

고상 반응과 B₂O₃ 용제 첨가법에 의해 합성된 시료의 입자크기 및 형태를 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 각기 다른 합성 방법으로 제조된 시료의 사진을 비교해 보면, B₂O₃ 용제 첨가법에 의해 합성된 시료(d)는 고상 반응에 의해 합성된 시료(a)보다 입자의 형태가 구상으로 매우 균일하게 분포되어 있으며, FED용 형광체에 적합하다고 알려진 크기(평균 입경: 1~2 μm)를 이루고 있다. 또한, B₂O₃ 용제 첨가법에 의해 합성된 시료들(b~d)은 열처리 온도의 증가에 따라 입자의 형태가 균일하게 구상으로 성장하였으며, 특히 1250°C 이상의 고온에서는 급격한 입자의 성장이 일어난 것을 확인할 수 있었다. X-선 회절 패턴과 주사전자현미경 사진을 분석한 결과, B₂O₃를 용제로 첨가하여 열처리하는 것이 기존의 고상 반응의 경우보다 비교적 낮은 온도에서도 결정성을 향상시킬 뿐만 아니라 입자크기와 형태의 조절이 용이해 형광체의 합성이 효과적임을 알 수 있다.

본 실험의 주목적인 합성방법의 개선을 통한 발광 특성의 향상 효과를 비교하기 위해, 기존의 고상 반응법과 B₂O₃ 용제 첨가법으로 제조된 형광체의 빛발광 및 음극선발광을 측정하였다. 일반적으로 약 395~400 nm에서 자체 발광하는 YNb₄에 Bi³⁺가 도핑되면 발광의 중심이 장파장 쪽으로 이동하는 현상을 볼 수 있는데, 이런 현상은 희토류 원소의 vanadate¹⁶⁾ niobate^{6,8)}에서도 관찰되었으며 다음과 같이 설명할 수 있다. 먼저, YNb₄의 청색 발광은 [NbO₄]³⁻ 이온의 전하 이동(charge transfer transition)에 의해서, 즉 valence band를 이루는 O²⁻ 이온의 2p orbital과 Y³⁺ 및 Nb⁵⁺이온의 4d orbital로 이루어진 conduction band와의 띠 간격(band gap : E_g)에서 이루어진다. 여기에 도핑제인 Bi³⁺ 이온의 6s² orbital이 O²⁻ 이온의 2p orbital 약간 위에 있게되어 conduction band와의 띠 간격이 좁아지고, 이에 따라 발광의 주파장도 장파장 쪽으로 이동하게 된다.^{9,10)}

Fig. 4는 고상 반응으로 1250°C에서 4 시간 가열했을 때 Bi₂O₃ 도핑 양의 변화(0.1~1.0 wt%)에 따른 시료의 음극선발광(cathodoluminescence, CL) 스펙트럼을 나타낸다. 음극선발광은 800 V, 2.4 mA의 저전압 전자선 여기 하에서 측정하였다. Bi³⁺가 도핑된 YNb₄ 형광체는 415~440 nm 영역에서 강한 청색 발광 스펙트럼을 보이며, Bi³⁺ 도핑 양이 0.2 wt%일 때 최대의 발광 피크를 나타낸다. Bi³⁺ 도핑 양이 0.2 wt% 이상에서 발광강도가 오히려 감소하는 현상은 농도 quenching의 결과에 기인한다고 알려져 있는데, 이런 현상은 Leverenz¹⁷⁾나 Ozawa¹⁸⁾ 등에 의해 자세히 연구되었으나 구체적인 메

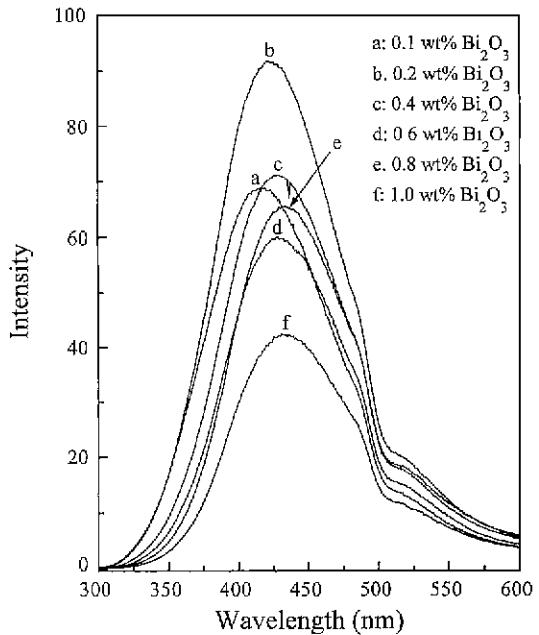


Fig. 4. CL emission spectra of YNb₄ doped with different Bi concentrations(solid state, 1250°C/4 hrs, Y/Nb=51/49).

카니즘은 아직 밝혀지지 않았다. 이 외에도 Bi³⁺ 도핑 양의 증가에 따라 발광의 최대치가 장파장 쪽으로 이동하는 현상이 나타나는데, 이는 앞에서 언급한 띠 간격 E_g의 감소 효과뿐만 아니라 YNb₄ 모체의 Y³⁺에 비해 이온 반경이 큰 Bi³⁺의 치환에 따른 결정장의 감소에 의한 것으로 볼 수 있다.^{14,19)}

한편, 위의 고상 반응 실험에서 얻어진 조건을 토대로 하여 새로운 합성방법인 B₂O₃ 용제 첨가법에 의해 제조된 형광체의 발광특성을 분석한 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. B₂O₃ 용제 첨가법으로 900~1250°C에서 4 시간 열처리한 시료의 빛발광(Fig. 5a) 및 음극선발광(Fig. 5b) 스펙트럼에 의하면, 열처리 온도가 증가할수록 PL 및 CL 모두 발광강도가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 1100°C 이상에서 열처리한 경우 발광의 최대 값을 보이는데, 이는 고상 반응으로 1250°C에서 열처리한 시료보다 현저히 증가된 발광강도를 나타낸다. X-선 회절 패턴과 주사전자현미경 사진의 분석 결과에서도 볼 수 있듯이, 열처리 온도를 증가시키면 결정성이 더 우수해지고 입자의 형태가 균일하게 구형으로 되어 발광강도를 증가시키는 것으로 생각된다. 그러나 앞에서 이미 언급한대로, B₂O₃ 용제를 첨가할 경우 열처리 온도를 1250°C 이상으로 올리면 결정이 지나치게 성장하여 입자의 크기가 증가할 뿐만 아니라(평균 입경: ≥3 μm), 휘발성이 매우 높은 Bi₂O₃ 도핑제의 휘발을 촉

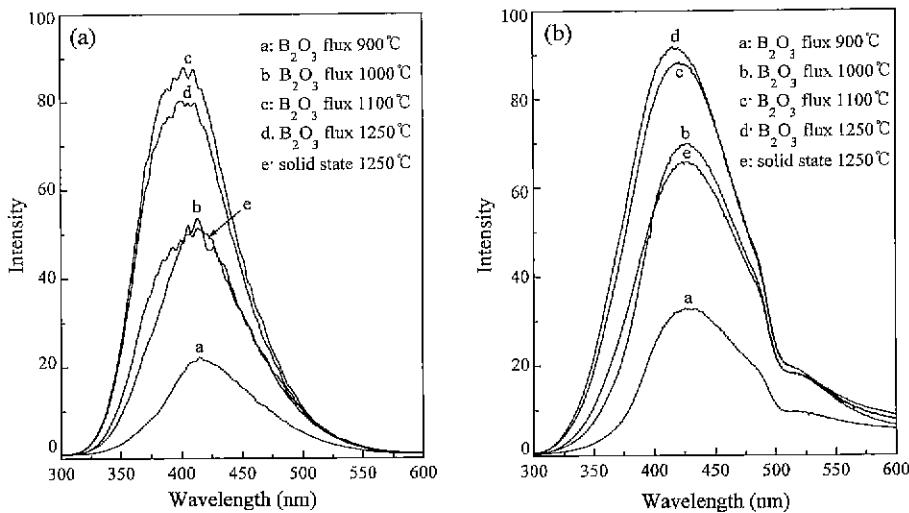


Fig. 5. PL (a) and CL (b) emission spectra of 0.2 wt% Bi-doped YNbO_4 in various calcining conditions ($\text{Y}/\text{Nb}=51/49$).

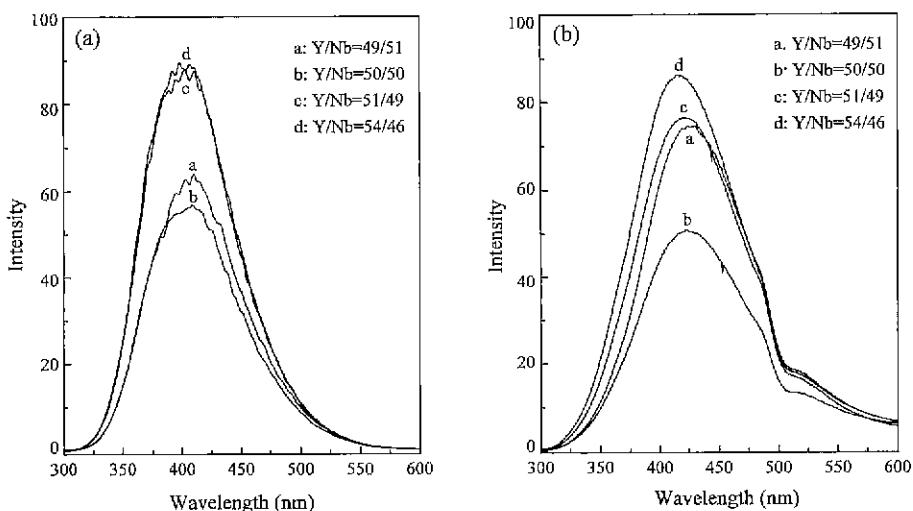


Fig. 6. PL (a) and CL (b) emission spectra of 0.2 wt% Bi-doped YNbO_4 as a function of the Y/Nb ratio (B_2O_3 flux technique, $1100^\circ\text{C}/4$ hrs).

진하여 오히려 발광 효과를 저하시키게 된다.

Fig. 6은 B_2O_3 읍제 첨가법에 의해 제조된 $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ 형광체의 빛발광(a) 및 음극선발광(b)이 Y_2O_3 와 Nb_2O_5 의 비율($\text{Y}/\text{Nb}=49/51\sim 54/46$)에 따라 어떤 변화가 있는지를 조사한 스펙트럼이다. 고상 반응의 경우와 마찬가지로,^{14,15)} $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ 형광체의 발광 특성은 도핑제인 Bi^{3+} 의 양뿐만 아니라 Y/Nb 비율에 따라 크게 달라진다는 것을 알 수 있다. 특히 PL 및 CL 모두 Y/Nb 비율이 화학 양론 상의 1/1인 경우보다 결합구조를 인위적으로 조절한 51/49나 54/46일 때 최대의 발광 피크를 나타내며, Y/Nb 비율에 관계없이 415~420 nm 영역에서 강한 청색 발광을

보인다. 빛발광(a)의 경우에는 Y/Nb 비율이 51/49와 54/46에서 동일하게 발광 스펙트럼의 최대치를 나타낸 반면에, 음극선발광에서는 Y/Nb 비율이 51/49일 때 보다 54/46에서 더 높은 발광 강도를 보인다. 이로부터 $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ 형광체를 효과적으로 합성하기 위해서는 합성 방법에 관계없이 항상 과량의 Y_2O_3 가 필요한 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

기존의 고상 반응법에 의해 합성된 $\text{YNbO}_4:\text{Bi}$ 형광체

의 발광특성을 개선하기 위하여 B_2O_3 을제를 첨가하는 방법으로 형광체를 합성하였다. 합성된 시료에 대하여는 빛발광 분석, 저전압 음극선발광 분석, X-선 회절 분석 및 전자주사현미경 사진 등을 통해 특성을 평가하였다. $YNbO_4:Bi$ 형광체를 고상 반응으로 합성했을 때, 0.2 wt%의 Bi_2O_3 를 도핑하고 1250°C에서 4시간 열처리한 경우에 최대의 발광강도를 얻었으며, 모체인 $YNbO_4$ 의 Y/Nb 비율이 화학 양론상의 1:1인 경우보다 결함구조를 인위적으로 조절한 51/49나 52/48에서 발광효율이 더 높은 것으로 나타났다.^{14,15)}

본 연구에서 융제로 B_2O_3 를 첨가하여 $YNbO_4:Bi$ 형광체를 합성한 결과, PL 및 CL 모두 415~440 nm 영역에서 강한 청색 발광 스펙트럼을 나타냈으며, 고상 반응의 경우와 마찬가지로 Y/Nb 비율이 51/49나 54/46에서 최대의 발광강도를 보였다. 따라서 $YNbO_4:Bi$ 형광체의 효과적인 합성을 위해서는 항상 과량의 Y_2O_3 가 필요한 것을 확인할 수 있었다. 한편, 고상 반응의 경우보다 낮은 1100°C에서 열처리한 시료가 결정성이 좋고 입자의 크기 및 형태가 균일하여 빛발광뿐만 아니라 저전압 음극선발광에서도 우수한 발광특성을 보이며, 고상 반응으로 1250°C에서 열처리한 시료보다 현저히 증가된 발광강도를 나타낸다. 이렇게 B_2O_3 을제를 첨가하는 방법으로 열처리 온도를 낮추고 입자크기와 형태를 형광체에 적합하게 조절함으로써 형광체의 휘도를 개선할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 과학기술부의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. H. Toki, F. Kataoka, Y. Satoh, Y. Kagawa and S. Itoh, "Phosphors for Low-Voltage Electron Excitation," Proceedings of the 2nd International Display Workshops. Hamamatsu, Japan, 81-84 (1995).
2. C. Keller, "Ternary Oxides of Niobium and Tantalum of the Type ABO_3 ," *Z. Anorg. Allgem. Chem. (in German)*, **318**, 89-106 (1962).
3. V. S. Stubičan, "High-Temperature Transitions in Rare-Earth Niobates and Tantalates," *J. Am. Ceram. Soc.*, **47**(2), 55-58 (1964).
4. K. A. Gingerich and H. E. Bair, "Relation between Ion-ic Radii and Transformation Temperature in Rare Earth Niobates," *Advan. X-Ray Anal.*, **7**, 22-30 (1964).
5. O. Yamaguchi, K. Matsui, T. Kawabe and K. Shimizu, "Crystallization and Transformation of Distorted Tetragonal $YNbO_4$," *J. Am. Ceram. Soc.*, **68**(10), 275-276 (1985).
6. G. Blasse and A. Bril, "Investigations on Bi^{3+} -Activated Phosphors," *J. Chem. Phys.*, **48**(1), 217-222 (1968).
7. G. Blasse and A. Bril, "Luminescence of Phosphors Based on Host Lattices ABO_3 ," *J. Chem. Phys.*, **50**(7), 2974-2980 (1969).
8. D. Grisafe and B. Fritsch, "Rare Earth Niobate Systems and the Phosphor $GdNbO_4:Bi$," *J. Solid State Chem.*, **17**, 313-318 (1976).
9. X. Jing, J. Silver, C. S. Gibbons and A. Vecht, "Blue Luminescence in Mixed Yttrium and Gadolinium Niobates Caused by Bismuth. The Role of the ns^2 Ions," Extended Abstract, The 4th International Conference on the Science and Technology of Display Phosphors, Bend, U.S.A., 389-392 (1998).
10. R. C. Ropp, "Luminescence and the Solid State," Elsevier, 431-448 (1991).
11. A. Vecht, C. S. Gibbons, D. W. Smith and X. Jing, "New Blue Emitting Phosphor Thin Films for FEDs," Extended Abstract, The 2nd International Conference on the Science and Technology of Display Phosphors, San Diego, U.S.A., 277-281 (1996).
12. A. Vecht, D. Charlesworth and D. W. Smith, "Niobate Phosphors for Low-Voltage Applications," *SID '97*, 28, 588-590 (1997).
13. A. Vecht and D. Smith, "Phosphor Materials," PCT Int. Appl., WO 9735943 (1997).
14. 한정화, 김현정, 박희동, "YNbO₄에 Bi³⁺가 도핑된 형광체의 빛발광 및 저전압 음극선발광 특성," *요업학회지*, **35**(3), 245-250 (1998).
15. C. H. Han, H. J. Kim and H. D. Park, "Effects of Y/Nb Ratio on Luminescence Properties of $YNbO_4:Bi$ Phosphors," Submitted to *J. Mater. Sci.* (1999).
16. R. K. Datta, "Bismuth in Yttrium Vanadate and Yttrium Europium Vanadate Phosphors," *J. Electrochem. Soc.*, **114**, 1057-1063 (1967).
17. H. W. Leverenz, "An Introduction to Luminescence of Solids," Dover Publication, (1968).
18. L. Ozawa, "Determination of Self-Concentration Quenching Mechanisms of Rare Earth Luminescence from Intensity Measurements on Powdered Phosphor Screens," *J. Electrochem. Soc.*, **126**(1), 106-109 (1979).
19. A. Morell and N. El Khiati, "Green Phosphors for Large Plasma TV Screens," *J. Electrochem. Soc.*, **140**(7), 2019-2022 (1993).