

YNbO₄에 Bi³⁺가 도핑된 형광체의 빛발광 및 저전압 음극선발광 특성

한정화 · 김현정 · 박희동

한국화학연구소 화학소재연구단
(1997년 12월 11일 접수)

Photo- and Cathod-luminescent Properties of YNbO₄:Bi Phosphors

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

Advanced Materials Division,
Korea Research Institute of Chemical Technology
(Received December 11, 1997)

요 약

FED에 적합한 저전압용 YNbO₄:Bi 청색 형광체를 1250°C에서 4시간 동안 고상 반응으로 합성하였으며, 도핑되는 Bi³⁺의 양을 변화시키거나 Y/Nb 비율을 조절하는 방법으로 발광 특성을 개선하였다. YNbO₄에 Bi³⁺를 도핑하여 420-450 nm 영역의 강한 청색 발광 스펙트럼을 얻었으며, 254 nm의 여기 하에서 YNbO₄:Bi 형광체의 최대 빛발광 피크는 Y₂O₃:Nb₂O₅ 비율이 1:1이며 Bi³⁺의 도핑 양이 0.4 wt%인 경우에 얻어졌다. 저전압 음극선발광에서는 빛발광에서와 같이 Bi³⁺의 도핑 양은 0.4 wt%인 경우에 최대 값을 보여주고 있으나, Y₂O₃:Nb₂O₅ 비율은 0.495:0.505에서 최대의 발광 피크가 얻어졌다.

ABSTRACT

Field emission display (FED) is currently being explored as a potential flat panel display technology. The need of new materials for low voltage blue phosphors for FED focused our attention on the Y₂O₃-Nb₂O₅ system. Yttrium niobate doped with Bi³⁺ was prepared by solid state reaction technique and the optimization of the luminescent properties with a control of Bi³⁺ amounts and Y/Nb ratio was studied. Under 254 nm and low voltage electron excitations, Bi³⁺-activated YNbO₄ phosphors showed a strong and relatively narrow blue emission band with a range of 420 to 450 nm. Especially 0.4 wt% Bi³⁺ doped YNbO₄ phosphors with Y/Nb ratio of 1/1 showed the maximum emission intensity. Under low voltage electron excitation, maximum emission intensity appeared at the Y/Nb ratio of 0.495/0.505.

Key words : YNbO₄, Bi³⁺ doping, Photoluminescence, Cathodoluminescence

1. 서 론

현대는 정보화 사회라고 불리는 만큼 정보의 효율적인 교환을 가능케 하는 정보처리 시스템의 발전과 보급에 따라 이에 사용되는 정보교환 매체로써 디스플레이의 중요성이 크게 대두되고 있으며, 종류도 매우 다양해지고 화질 텔레비전(HDTV), 다중매체 컴퓨터, 휴대용 컴퓨터, 텔레비전 전화, 전자오락, 캠코더, 의료용 디스플레이, 자동차 및 항공 전자 공학 등등 개인용 컴퓨터에서부터 우주항공기의 표시소자에 이르기까지 전 분야에 걸쳐 활용되고 있다. 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 정보표시용 디스플레이는 음극선관(CRT)이 주종

을 이루고 있지만, 큰 부피와 무게 그리고 높은 구동전압으로 인한 불리한 점이 많아 평판 디스플레이의 개발이 절실히 요구되고 있다. 이 중에서 특히 전계방출 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 각광받고 있다.

FED의 발광은 저전압 음극선 여기를 기본으로 하고 있으며,¹⁾ 이에 사용되는 저전압용 형광체는 FED뿐만 아니라 형광표시관(VFD) 등의 핵심소자로서도 매우 주목받고 있는 물질이다.^{2,4)} 기존의 CRT나 표시소자에 많

이 사용되어 온 형광재료는 황화물계 화합물이 대부분을 차지하고 있고, 또한 발광을 나타내게 여기 시키는 방법이 고속 전자선에 의존해왔다. 그러나 황화물계 형광체는 고 진공이 요구되는 저전압용 형광체로 사용하기에는 황화물의 분해로 인해 발생하는 가스가 음극의 발광 특성을 열화 시켜 수명을 급격히 감소시키므로 FED용 형광체로 적합하지 않다. 따라서 FED의 실용화를 위하여 저속 전자관에서 발광효율이 뛰어나며 고 진공에서도 안정한 물성을 갖는 새로운 형광체의 개발이 절실히 요구되고 있다.

상 평형 그림 연구에 의하면,⁵⁾ Y_2O_3 - Nb_2O_5 계 에는 일그러진 fluorite 결정구조를 갖는 Y_3NbO_7 (= $3Y_2O_3 \cdot Nb_2O_5$) 외에 두 가지 형태의 상이한 결정구조를 갖는 $YNbO_4$ (= $Y_2O_3 \cdot Nb_2O_5$)가 존재한다. 저온상의 $YNbO_4$ (monoclinic: M-phase)는 fergusonite 결정구조를 갖고 있으며, 약 900 °C에서 scheelite형 구조의 고온상(tetragonal: T-phase)으로 전환된다.⁶⁾ Yttrium niobate는 자체 발광형으로 $[NbO_4]^{3-}$ 이온의 전하 이동(charge transfer)에 의한 넓은 띠의 청색 발광 스펙트럼(409 nm)을 나타낸다. 지금까지 발광 특성을 높이기 위해 yttrium niobate를 모체로 하여 bismuth 또는 lanthan을 포함한 희귀족 원소들을 도핑하는 시도가 있었으나,^{7,8)} 만족할 만한 충분한 연구가 이루어지지 않았다. 최근에 와서 영국의 Vecht는 $YNbO_4$:Bi 형광체가 기존의 청색 형광체인 P47(Y_2SiO_5 :Ce)보다 우수한 특성을 나타낸다고 보고하였다.^{9,10)}

형광체 제조는 모체결정의 형성과 여기에 도핑할 이온을 어떻게 첨가할 것인가에 따라 합성방법이 결정된다. 지금까지의 연구 조사 결과에 의하면,^{11,12)} $YNbO_4$ 계 화합물을 고상 반응,¹³⁻¹⁷⁾ citrate complexes의 소결,¹⁸⁾ 금속알콕사이드의 열분해,¹⁹⁾ 용융제 첨가법²⁰⁾ 등의 방법으로 주로 합성하였다. 본 연구에서는 가능성은 크나 지금까지 상세한 연구는 밝혀져 있지 않은 Y_2O_3 - Nb_2O_5 계를 대상으로 하여 합성 가능한 화합물들을 합성하고, 동시에 dopant의 양을 변화시켜 FED에 적합한 저전압용 청색 형광체를 개발하고자 한다. 이를 위해 먼저 약 409 nm에서 자체 발광하는 것으로 밝혀진 $YNbO_4$ 를 모체로 하여 dopant로 bismuth를 첨가하는 실험을 시도하였다.

2. 실험방법

본 연구의 실험에 사용된 시약은 일본의 고순도화학연구소의 Y_2O_3 (99.99%) 분말, Nb_2O_5 (99.99%) 분말, Bi_2O_3 (99.99%) 분말이며, 이 시약들을 원하는 조성에 따른 각각의 소정비가 되도록 평량한 후, 전체 약 3g의 원료를 마노 유발을 사용하여 보다 효과적인 혼합을 위해 아세톤용매 하에서 고르게 혼합하였다. 혼합한 시료를

각 1 g 정도의 pellet($\phi 10 \times 5$ mm)으로 만들어 백금 판으로 된 보트에 넣고 이를 다시 고 순도 알루미늄 도가니에 넣은 후, 뚜껑을 덮은 상태로 전기로를 사용하여 공기 중의 1250-1400 °C에서 2-24시간 동안 고상 반응을 시켰다.

합성된 시료의 발광 및 여기 스펙트럼은 Perkin Elmer LS 50 형광분광광도계로 측정하여 얻었다. 각 분말 시료를 용융 실리카 창을 갖는 원형 셀 홀더에 위치시키고, 여기 스펙트럼을 200-400 nm에서 측정하여 최대 흡수 피크를 갖는 파장을 radiation 파장으로 발광 스펙트럼을 측정하였다. 발광 스펙트럼은 700 nm/min의 주사속도로 300-700 nm의 파장영역에서 주사하여 얻었다. 합성된 형광체의 결정성을 조사하기 위하여 Rigaku사의 DMAX-33 X-선 분말 회절분석기를 이용하여 X-선 회절 무늬를 측정하였다. 이 때 사용한 X-선의 파장은 1.54 Å인 Cu/K α 선이고, Ni filter를 사용하였으며 35 kV, 20 mA의 조건에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Y_2O_3 와 Nb_2O_5 를 1:1의 비율로 혼합한 시료를 1250 °C와 1400 °C에서 2-24 시간 동안 고상 반응시켜 $YNbO_4$ 화합물을 합성하였다. Fig. 1에 소성 온도 및 시간에 따른 $YNbO_4$ 화합물의 X-선 회절분석 결과를 나타내었다. 이 그림에 의하면, 1250 °C에서 4시간 소성한 경우에는 저온

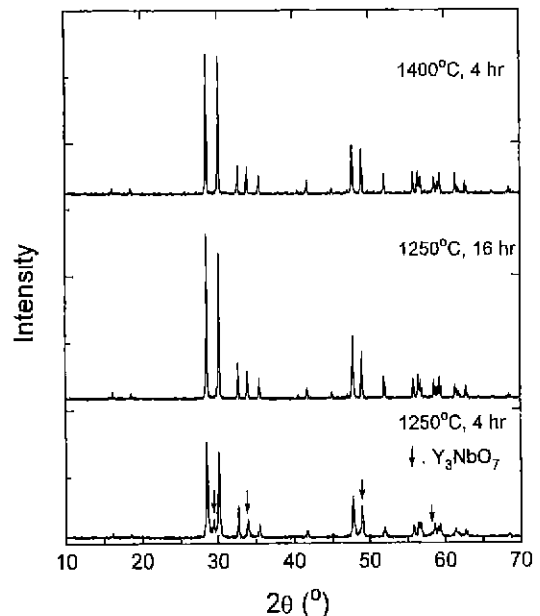


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of $YNbO_4$ powders calcined at different temperatures.

상의 YNbO₄(M-phase) 외에 일그러진 fluorite 결정구조를 갖는 Y₃NbO₇가 소량 존재하나, 1250°C에서 16시간 또는 1400°C에서 4시간 소성한 경우에는 YNbO₄의 상만 완전히 형성된 것을 알 수 있다. 이 그림에는 다 나타나지 않았지만, 동일한 소성 온도에서 시간이 길어질수록 또는 동일한 반응시간 동안 온도가 높아질수록 단일한 YNbO₄의 상이 형성되나, 그와 동시에 dopant로 쓰이는 Bi₂O₃가 다량 증발하여 오히려 발광 특성을 저하시키는 현상을 볼 수 있었다. 지금까지 알려진 Bi₂O₃의 휘발온도는 약 960-1010°C 정도이므로²⁰⁾ 현재와 같은 고온의 합성 조건하에서는 Bi₂O₃의 휘발성이 매우 강하고, 각 실험 조건에 따라 휘발 정도가 불규칙하여 정확한 도핑 양을 파악하기 어렵다. 이런 결점을 보완하기 위해 미리 실험 조건을 정하고, 예비 실험을 통해 각 실험 조건에 따른 Bi₂O₃의 휘발 양을 측정하여 이 결과를 토대로 본 실험을 수행하였다.

Fig. 2는 가열 온도 및 시간에 따른 Bi₂O₃의 휘발 양을

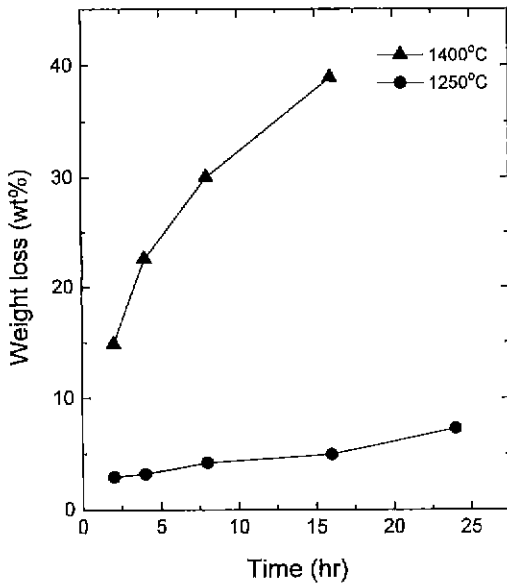


Fig. 2. Weight loss of Bi₂O₃ at different temperatures.

측정한 결과이며, 그림에서 보는 바와 같이 Bi₂O₃의 휘발 양은 대체로 가열 온도 및 시간에 비례하여 증가하나, 각각의 실험 조건에, 예를 들면 소성 용기의 크기나 모양 및 덮개의 유무 등에 따라서는도 매우 큰 편차를 보인다. Bi₂O₃가 첨가된 YNbO₄ 화합물을 합성할 경우 위의 실험데이터를 이용하여 Bi³⁺의 양을 조절하였다.

Table 1은 고상 반응을 이용하여 YNbO₄:Bi 형광체의 각 합성 조건에 따른 빛발광(photoluminescence, PL) 특성을 측정한 결과이며, 각 수치는 발광 스펙트럼의 최대 피크의 값과 그에 따른 파장을 나타낸다. Bi³⁺를 도핑한 YNbO₄에 대하여 제논 램프로부터 나온 254 nm radiation을 가지고 여기 시킴에 따라, 청색 발광 영역인 약 420-450 nm에서 비교적 높은 피크를 갖는 발광 스펙트럼을 보였다. Table 1에서 볼 수 있듯이, Y₂O₃:Nb₂O₅의 비율을 1:1로 고정하여 가열 온도, 시간 및 Bi³⁺ 도핑 양을 변화시킨 결과, 가열 온도가 낮고 시간이 짧을수록 높은 빛발광 피크를 갖는다. 이는 XRD 측정 결과와 비교해 볼 때, 고온에서 장시간 가열할수록 결정성은 향상되지만 dopant인 Bi₂O₃의 휘발이 촉진되어 발광 특성을 저하시키는 결과로 파악할 수 있다. 1250°C에서 4시간 가열하고 고온에서 서서히(50°C/hr) 식힌 경우에는 Bi³⁺ 도핑 양이 0.4 wt%일 때 발광의 최대 값을 보이는 반면에, 급속 냉각 시(quench)에는 4 wt%인 경우에 최대 발광 피크를 나타냈다.

Fig. 3은 1250°C에서 4시간 가열했을 때 도핑 양의 변화(0.2-8 wt%)에 따른 시료의 빛발광(PL) 스펙트럼을 나타내는데, Table 1에서 나타난 대로 Bi³⁺ 도핑 양이 0.4 wt%일 때 최대의 발광 피크를 보이며, 도핑 양이 증가할수록 빛발광 피크의 최대 값이 감소하면서 장파장 쪽으로 이동하는 현상을 보여주고 있다. 그러나 2 wt% 이상에서는 빛발광 스펙트럼의 최대치가 거의 감소하지 않으며 더 이상 장파장 쪽으로의 이동도 없다.

한편, 위와 같은 방법으로 확정된 최적의 가열 온도, 시간 및 Bi³⁺ 도핑 양 등의 조건 외에 모체인 YNbO₄의 Y/Nb 비율에 따른 발광 스펙트럼의 변화를 측정한 결과를 Table 2에 나타내었다. Y₂O₃:Nb₂O₅의 비율이 1:1인

Table 1. PL Properties of YNbO₄ Doped with Different Bi Concentrations in Various Calcining Conditions

Bi ₂ O ₃ wt%	1250°C			1400°C
	4 hr	4 hr, quench	16 hr, quench	4 hr
0.4	1352(418 nm)	1058(422 nm)	1129(420 nm)	1070(425 nm)
1	1200(434 nm)	1052(433 nm)	1113(435 nm)	1068(438 nm)
2	1137(442 nm)	1129(442 nm)	1132(443 nm)	1000(445 nm)
4	1150(446 nm)	1174(444 nm)	1145(446 nm)	864(449 nm)
6	1120(447 nm)	1087(446 nm)	1116(447 nm)	889(450 nm)
8	1132(448 nm)	1061(448 nm)	1036(449 nm)	687(454 nm)

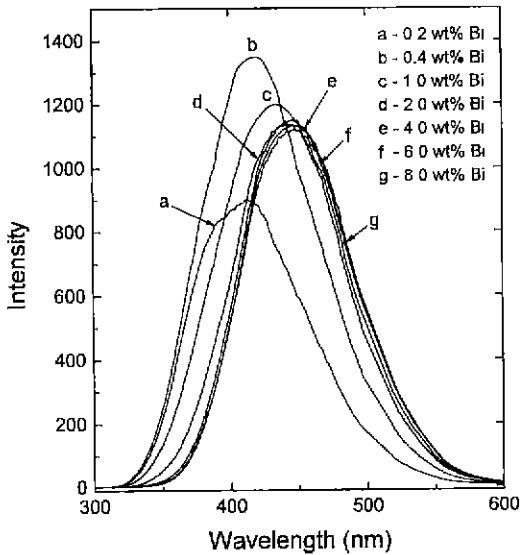


Fig. 3. PL emission spectra of $YNbO_4$ doped with different Bi concentrations(1250°C, 4hr).

경우에 대부분의 Bi^{3+} 이온 농도에서 비교적 고르게 높은 발광 피크를 보이며, Y/Nb 비율의 변화에 관계없이 Bi^{3+} 도핑 양이 0.4 wt%일 때 최대의 발광 피크를 나타낸다. 도핑 양의 증가에 따라 발광 피크가 증가하다가 0.4 wt%일 때 최대치를 나타내고, 그 이상에서는 오히려 감소하는 현상은 농도 quenching의 결과에 기인한다. 즉, 활성제인 Bi^{3+} 의 농도가 임계 도핑 양보다 많아지면, 활성제들이 서로 응집하거나 이온대를 형성하게 되고, 이로부터 비 발광 중심이 생기거나 킬러로의 변환이 이루어지는 것으로 생각할 수 있다.²¹⁾ 또한 모든 경우에 Bi^{3+} 양의 증가에 따라 발광의 최대치가 장파장 쪽으로 이동하는 현상이 나타나는데, 이는 결정장의 감소에 의한 것으로 볼 수 있다. 즉, 잘 알려진 천연 광물인 ferugonite와 동일한 결정구조를 갖는 저온상의 $YNbO_4$ 의 경우, 독립된 $[NbO_4]^{3-}$ -사면체 사이의 공간에 존재하는 Y^{3+} 의 반경(0.102 nm)에 비해 Bi^{3+} 의 반경(0.117 nm)이 크므로 bismuth가 yttrium을 치환할 때 격자의 일그러짐이 생겨 Bi^{3+} 양의 증가에 따라 빛발광이 장파장으로

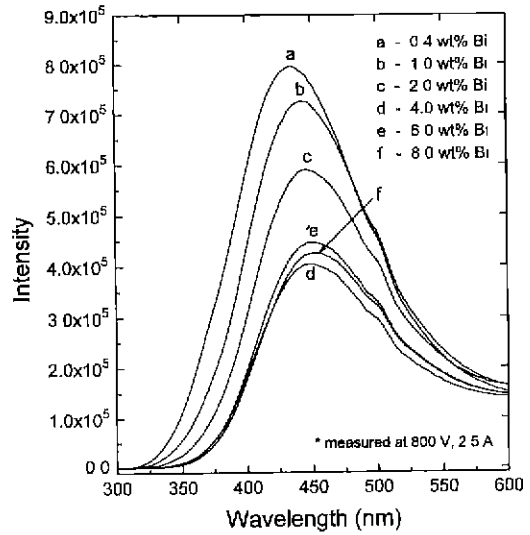


Fig. 4. CL emission spectra of $YNbO_4$ doped with different Bi concentrations(1250°C, 4hr).

로 이동하는 것으로 설명할 수 있다.²²⁾

Fig. 4는 800 V, 2.5 A에서 측정된 저전압의 전자선 여기에 의한 음극선발광(cathodoluminescence, CL) 스펙트럼을 나타낸다. 전체적인 청색 발광은 빛발광 스펙트럼과 매우 유사한 경향을 보여주고 있으나, Bi^{3+} 양의 증가에 따라 발광 스펙트럼의 최대치가 매우 빠르게 감소하며 0.4 wt%일 때가 최고의 발광 피크를 나타낸다. 또한 Bi^{3+} 의 양이 0.4 wt%일 때 434 nm에서 발광의 최고 값을 가지면서 Bi^{3+} 양이 증가할수록 장파장 쪽으로 이동하나, 빛발광의 이동 폭보다는 적은 경향을 보여주고 있다.

Fig. 5는 저전압 전자선 여기(800 V, 2.5 A)에 의한 $YNbO_4:Bi$ 형광체의 음극선발광이 Y_2O_3 와 Nb_2O_5 의 비율에 따라 어떤 변화가 있는지를 조사한 스펙트럼으로, Y/Nb의 비율이 0.495/0.505일 때 최대의 발광 피크를 나타내며 430-440 nm 영역의 청색 발광을 보여주고 있다. Table 1, 2에 나타난 빛발광 특성에서는 Y/Nb의 비율이 1/1에서 발광 스펙트럼의 최대치를 나타낸 반면에,

Table 2. PL Properties of $YNbO_4:Bi$ Phosphors with the Variation of Y/Nb Ratio

Bi_2O_3 wt%	$Y_2O_3:Nb_2O_5$			
	1250°C, 4 hr			
	0.480 : 0.520	0.490 : 0.510	0.495 : 0.505	0.500 : 0.500
0.4	1162(420 nm)	1234(417 nm)	1107(417 nm)	1352(418 nm)
1	1090(430 nm)	1157(432 nm)	1026(429 nm)	1200(434 nm)
2	1165(441 nm)	1171(442 nm)	1150(443 nm)	1137(442 nm)
4	1174(445 nm)	1145(443 nm)	1118(443 nm)	1150(446 nm)

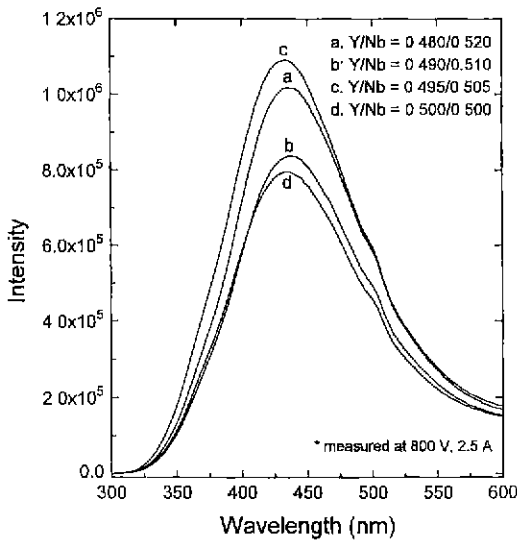


Fig. 5. CL emission spectra of 0.4 wt% Bi-doped YNbO₄ with the variation of the Y/Nb ratio (1250°C, 4hr).

음극선발광에서는 Y/Nb의 비율이 0.495/0.505에서 최대의 발광 피크를 보여주는 상이한 경향을 나타내고 있다. 이런 현상은 저전압 전자선 여기에 의한 음극선발광의 경우, 낮은 전압으로 전자의 침투가 표면(약 10 Å 내외)에 국한되어²³⁾ 형광체의 표면 상태에 따라 발광 특성의 변화가 매우 민감한 반응을 보이므로, Y/Nb의 비율을 화학양론상의 1/1 보다 결합구조를 인위적으로 조정한 0.495/0.505에서 음극선발광이 더 효율적인 것으로 설명될 수 있다.

4. 결 론

FED에 적합한 저전압용 청색 형광체를 얻기 위하여, 도핑되는 Bi₂O₃의 증발 데이터를 먼저 실험적으로 구한 뒤에 적합한 조성의 Y₂O₃, Nb₂O₅와 Bi₂O₃의 혼합물을 공기 중의 1250°C에서 고상 반응시켜 YNbO₄:Bi 형광체를 합성하였다. 발광 특성을 증가시키기 위해 Bi³⁺ 도핑량을 변화시키거나, 모체의 Y/Nb 비율을 조절하는 방법으로 형광효율 및 휘도 개선을 시도하였다. 합성된 시료에 대하여는 빛발광 분석, 저전압 음극선발광 분석 및 X-선 회절 분석 등을 통해 특성을 평가하였고, 다음과 같은 결과를 얻게 되었다.

1. YNbO₄에 Bi³⁺를 도핑하여 420-450 nm 영역의 강한 발광 스펙트럼을 나타내는 청색 형광체를 얻을 수 있었다.
2. YNbO₄:Bi 형광체에서 최대의 빛발광 피크는 1250°C에서 4시간 가열하고, Y₂O₃:Nb₂O₅ 비율이 1:

1이며 Bi³⁺의 도핑 양이 0.4 wt%인 경우에 얻어졌다.

3. 저전압 음극선발광에서는 빛발광에서와 같이 Bi³⁺의 도핑 양은 0.4 wt%인 경우에 최대치를 보이나, Y₂O₃:Nb₂O₅ 비율은 0.495:0.505에서 최대의 발광 피크를 나타냈다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 한국전자통신연구원의 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. 이종덕, 권상직, "FED(Field Emission Display) 기술과 전망," 전자공학회지, **22**(3), 283-292 (1995).
3. 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. 15-18 (1995).
4. A. G. Chakhovskoi, W. D. Kesling, J. T. Trujillo and C. E. Hunt, "Phosphor Selection Constraints in Application of gated Field-Emission Microcathodes to Flat Panel Displays," *J. Vac. Sci. Technol.* **B 12**(2), 785-789 (1994).
5. I. A. Bondar, L. N. Koroleva and N. A. Toropov, "Phase Equilibria in the System Y₂O₃-Nb₂O₅," *Izv. Akad. Nauk SSSR Neorgan. Mater.* **5**(10), 1730-1733 (1969); *Inorg. Mater. (Engl. transl.)* **5**(10), 1465-1468 (1969).
6. V. S. Stubican, "High-Temperature Transitions in Rare-Earth Niobates and Tantalates," *J. Am. Ceram. Soc.* **47**(2), 55-58 (1964).
7. D. Grisafe and B. Fritsch, "Rare Earth Niobate Systems and the Phosphor GdNbO₄:Bi," *J. Solid State Chem.* **17**, 313-318 (1976).
8. R. C. Ropp, "Luminescence and the Solid State." Elsevier. 431-448 (1991).
9. 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).
10. A. Vecht, D. Charlesworth and D. W. Smith, "Niobate Phosphors for Low-Voltage Applications," *SID '97*, **28**, 588-590 (1997).
11. Gmelin, "Das System Nb-RE-O." *Handbuch der Anorg. Chem.*, (in German) Nb [B3], 128-140.
12. C. Keller, "Ternary Oxides of Niobium and Tantalum of the Type ABO₄," *Z. Anorg. Allgem. Chem.*, **318**, 89-106 (1962).
13. G. Blasse and A. Bril, "Investigations on Bi³⁺-Activated

- Phosphors," *J. Chem. Phys.*, **48**(1), 217-222 (1968).
14. H. P. Rooksby and E. A. D. White, "The Structure of 1:1 Compounds of Rare Earth Oxides with Niobia and Tantalum," *Acta Cryst.*, **16**, 888-890 (1963).
 15. G. J. McCarthy, "X-ray Studies of RENbO_4 Compounds," *Acta Cryst.*, B **27**, 2285-2286 (1971).
 16. A. K. Pradhan and R. N. P. Choudhary, "X-ray, SEM and Thermal Analysis of RNbO_4 -type Fergusonites," *J. Mater. Sci. Lett.*, **6**(12), 1425-1426 (1987).
 17. C. Quinn and R. Wusirika, "Twinning in YNbO_4 ," *J. Am. Ceram. Soc.*, **74**(2), 431-432 (1991).
 18. 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).
 19. L. N. Ansel'm, G. L. Bir and I. E. Myl'nikova, "ESR of Gd^{3+} in YNbO_4 ," *Soviet Phys. - Solid State*, **12**(7), 1500-1502 (1971).
 20. Gmelin, "Wismut(III)-oxid Bi_2O_3 ," *Handbuch der anorg. Chem.*, (in German) Bi [19], 109-113
 21. 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).
 22. A. Morell and N. El Khiati, "Green Phosphors for Large Plasma TV Screens," *J. Electrochem. Soc.*, **140**(7), 2019-2022 (1993).
 23. 유재수, 이종덕, "FED용 형광체의 개발 동향," *전자공학회지*, **22**(3), 338-346 (1995).