

SrTiO₃:Pr³⁺, Ga³⁺ Phosphor의 발광특성에 관한 연구

이미애 · 남 산 · 김명호* · 서경수** · 변재동

고려대학교 재료공학과

*창원대학교 세라믹공학과

**한국전자통신연구소 신기능반도체연구부

(1998년 4월 15일 접수)

Luminescence Characteristics of SrTiO₃:Pr³⁺, Ga³⁺ Phosphor

Mi-Ae Lee, Sahn Nahm, Myong-Ho Kim*,
Kyung-Soo Suh** and Jae-Dong Byun

Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

*Department of Materials Science and Engineering, Changwon National University,
Changwon 641-773, Korea

**Microelectronics Technology Lab. ETRI, Yosung, P.O. Box 106,
Taejon 305-600 Korea

(Received April 15, 1998)

요 약

여기, 발광 및 감쇄시간을 측정함으로써 Ga³⁺가 SrTiO₃:Pr³⁺의 발광에 미치는 영향을 조사하였다. SrTiO₃:Pr³⁺에 Ga³⁺을 첨가함으로써 Pr³⁺발광의 세기가 크게 향상되었다. 실험결과를 분석한 결과 다음과 같은 메커니즘을 제안할 수 있다. SrTiO₃ 모체를 전자파 또는 전자빔으로 여기시키면 전도대와 가전자대에 각각 전자와 정공이 형성된다. 전도대의 전자는 Ga³⁺에 트랩되어 있는 정공과 복사 재결합하고, 그 에너지는 Pr³⁺에 전달되어 Pr³⁺은 그 자체 고유의 적색광을 방출하게 된다.

ABSTRACT

The effect of Ga³⁺ addition on the photoluminescence and cathodoluminescence of SrTiO₃:Pr³⁺ was studied by performing the excitation, emission and decay time measurements. Addition of Ga³⁺ in SrTiO₃:Pr³⁺ resulted in a considerable enhancement of Pr³⁺ emission intensity. From the analysis of the experimental results, the following mechanism is proposed. Excitation into the SrTiO₃ host lattice leads to the formation of electrons in the conduction band and holes in the valence band. The electrons in the conduction band recombine radiatively with the holes trapped at Ga³⁺ and the energy is transferred to Pr³⁺ ion which give its own characteristic red emission.

Key words : SrTiO₃, Pr³⁺, Ga³⁺, Photoluminescence, Cathodoluminescence

1. 서 론

산화물계 형광체는 황화물계 형광체보다 고진공에서 구동시 화학적 안정성이 높고, 부식성 가스의 방출이 적기 때문에 저전압에의 응용(예: Field Emission Display)이 유리한 형광체이다.¹⁾

희토류 이온들의 발광 특성에 관한 연구 사례는 수없이 많으며, 이 중에 특히 Pr³⁺를 doping한 형광체에 관한 연구도 많이 수행되었다.^{2,7)} Pr³⁺ 이온은 모체에 따라서

³P₀ → ³H₄ 또는 ¹D₂ → ³H₄의 전이(Fig. 1 참조)에 의해서 가시광선 영역의 녹색 또는 적색 발광하는 것으로 알려져 있다. 이 중에서 CaTiO₃:Pr³⁺와 SrTiO₃:Pr³⁺ 형광체는 자외선이나 전자빔을 조사하면 적색 발광만이 나타나는 것으로 알려져 있다.^{8,10)} 최근에는 SrTiO₃:Pr³⁺에 Al³⁺ 등을 첨가하여 Pr³⁺의 적색발광 효율을 크게 증가시켰다고 보고된 바 있다.¹⁰⁾ 그러나 Al³⁺ 첨가의 발광세기의 변화에 대한 메커니즘은 아직 명확히 규명하지 못하였다. 다만 Al³⁺에 의해서 발광휘도가 증가하는 것은 모체에 흡수된

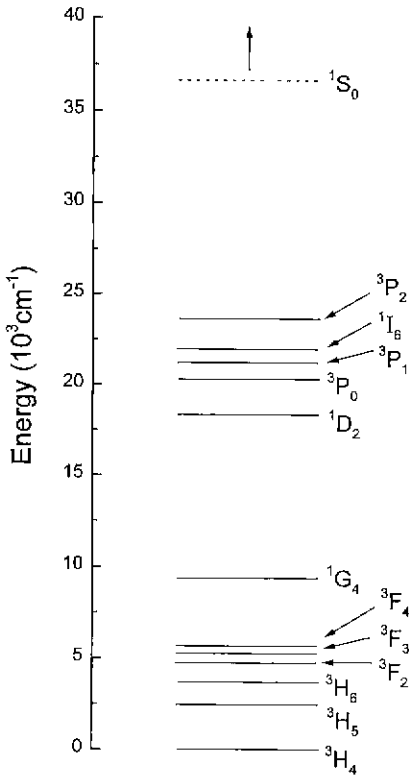


Fig. 1. The energy level scheme of Pr³⁺ ion⁸⁾.

에너지가 Pr³⁺ 이온에 전이되어 Pr³⁺의 4f-5d state로의 여기 효율이 증가하기 때문인 것으로 설명하였다.

본 연구에서는 SrTiO₃에 Pr³⁺과 Ga³⁺을 동시에 첨가하여 합성 온도와 Pr³⁺과 Ga³⁺의 첨가량에 따른 발광 특성을 상세히 조사하였으며, SrTiO₃에서의 Pr³⁺의 적색 발광 기구를 규명하고, 발광 특성의 향상에 기여하는 Ga³⁺의 역할을 밝히고자 하였다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용한 원료는 Aldrich chemical사의 SrCO₃(5N), TiO₂(5N), PrCl₃(H₂O)₇(4N)와 Johnson Matthey사의 Ga₂O₃(5N)이다. 마이크로 전자 저울을 사용하여 ±0.1 mg의 오차범위까지 평량한 원료 분말을 agate 유발에 넣어 에탄올 중에서 4시간 이상 혼합 및 분쇄한 후 충분히 건조시켰다. 건조된 시료를 석영관에 담아서 900~1300°C 온도 범위에서 4시간동안 열처리하여 형광체를 합성하였다.

X선 회절 분석에는 D/Max-Rc(Rigaku 사)을 사용하였고, photoluminescence(PL) spectra는 Amico-Bowman Luminescence Spectrometer를 사용하여 얻었다.

PL 측정시 여기파의 second order Rayleigh 산란을 제거하기 위해 적당한 필터를 사용하였고, monochromator에는 4 nm의 폭을 가진 slit을 사용하였다. cathodoluminescence(CL) 측정은 상온에서 여러 시료를 장착할 수 있는 홀더에 형광시료를 담아 10⁻² Torr의 고진공 상태를 만든 후 CL spectrometer를 사용하여 행하였다. 800 V, 2.5 A를 가하여 생긴 열전자로 시료를 여기시켜 발광된 빛을 집광하여 광학 필터를 통과시킨 후 detector로 측정하여 CL 스펙트럼을 얻었다. 감쇄시간은 Spectra-Physics INC., GCR-11 (Nd YAG laser), Spectra-Physics INC., TSC-2(dye laser), Continuum ML2(Nd YAG laser)를 이용하여 측정하였고 이 레이저들은 10 Hz의 repetition rate로 8-ns 펄스를 만들어 냈으며, fluorescence intensity decay는 LeCroy 9310A 오실로스코프를 사용하여 monitor하였다. 반사 스펙트럼은 CARY/5E/UV-VIS-NIR Spectrophotometer를 이용하여 실온에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 SrTiO₃에 1.0 m/o Pr³⁺을 첨가한 시료와, 1.0 m/o Pr³⁺와 8.0 m/o Ga³⁺을 첨가한 시료를 1200°C에서 4시간 열처리한 후 측정된 X선 회절 무늬이다. 두 시료의 X선 회절 무늬를 JCPDS카드와 비교 분석한 결과 두 시료 모두 cubic perovskite 구조의 SrTiO₃ 인 것으로 판명되었다. 본 실험에서 합성한 모든 시료에 첨가된

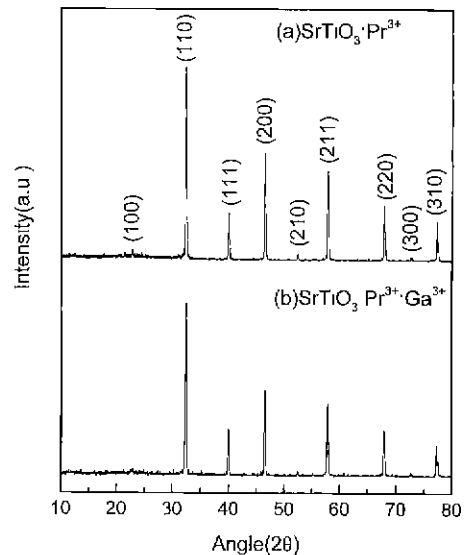


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of (a) SrTiO₃:(1.0 m/o)Pr³⁺ and (b) SrTiO₃:(1.0 m/o)Pr³⁺:(8.0 m/o)Ga³⁺ calcined at 1200°C for 4 hrs.

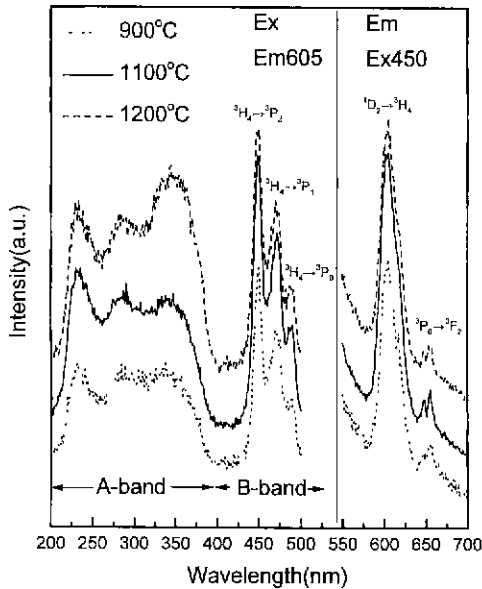


Fig. 3. PL excitation and emission spectra of SrTiO₃:(0.1 m/o)Pr³⁺ calcined at various temperatures for 4 hrs.

Pr³⁺ 및 Ga³⁺의 양은 각각 1.0 m/o 및 8.0 m/o 이하이므로, 이들은 SrTiO₃ 결정구조에 영향을 미치지거나 이차상을 형성하지 않는 것으로 생각된다.

Fig. 3은 SrTiO₃에 0.1 m/o Pr³⁺을 첨가하여 900~1200°C 온도범위에서 4시간 열처리한 시료의 여기 스펙트럼과 발광 스펙트럼이다. 450 nm로 여기시켜서 측정 한 발광 스펙트럼에서 605, 648 및 654 nm의 발광 peak들이 관찰되었다. 605 nm의 발광 peak는 Pr³⁺이온의 ¹D₂ 여기 준위에서 ³H₄ 기저 준위로의 전이에 의한 발광이며,²³⁾ 648~654 nm의 약한 발광 peak는 Pr³⁺이온의 여기준위인 ³P₀에서 ³F₂ 에너지 준위로의 전이에 의한 것이다.⁴⁾ 648~654 nm의 발광 peak는 세기가 약하였으며 이는 ³P₀ 에너지 준위로 여기된 전자가 대부분 ¹D₂ 에너지 준위로 비복사 감쇄되기 때문으로 생각할 수 있다.²³⁾ Fig. 3의 여기 스펙트럼은 여기파장을 200에서 500 nm 까지 주사하여 605 nm 발광 peak에서 측정 한 결과이다. 여기 밴드는 크게 200~388 nm영역의 broad band(A-band)와 450~500 nm 영역(B-band)으로 나눌 수 있다. B-band는 peak가 450, 470 및 486 nm인 세 개의 밴드로 이루어져 있으며, 이들은 각각 Pr³⁺ 이온의 ³H₄→³P_J(J=0, 1, 2) 전이에 의한 것이다. 이 결과는 다른 연구 결과들^{2,11-13)}과 일치한다. 한편, A-band는 peak가 233, 281 및 344 nm의 세 개의 밴드로 이루어져 있다. 이 세 밴드는 단결정 SrTiO₃의 흡수 스펙트럼^{14,15)}의 세 개의 밴드와 매우 유사하다. 따라서 A-band는 SrTiO₃의 가전자대에서

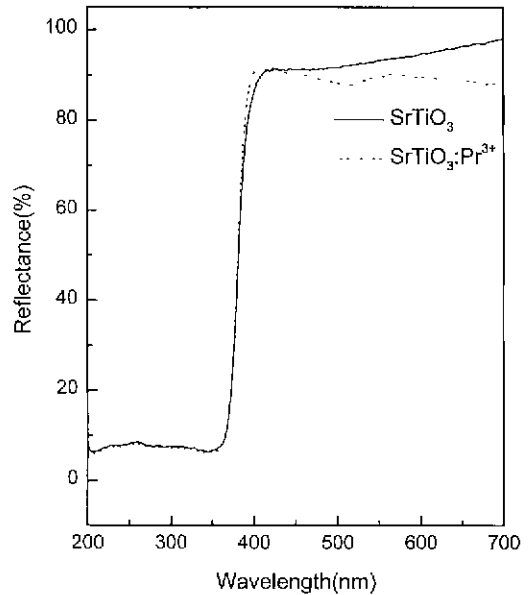


Fig. 4. Reflectance spectra of SrTiO₃ and SrTiO₃:(0.6 m/o)Pr³⁺ at room temperature.

전도대로 여기되는 전자에 의한 흡수로 생각된다. 이를 확인하기 위하여, SrTiO₃와 SrTiO₃:(0.6 m/o)Pr³⁺의 반사 스펙트럼을 조사한 결과(Fig. 4), 여기 스펙트럼의 A-band와 잘 일치하였다.

SrTiO₃ 내에서 Pr³⁺ 이온의 발광은, 광에너지가 Pr³⁺

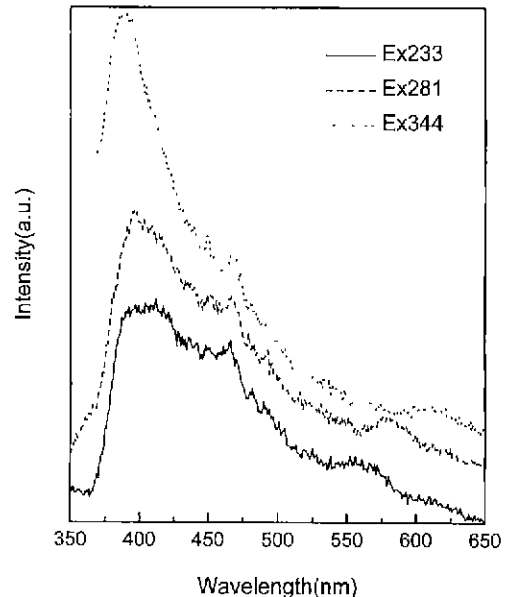


Fig. 5. Emission spectra of SrTiO₃ excited with various wavelengths.

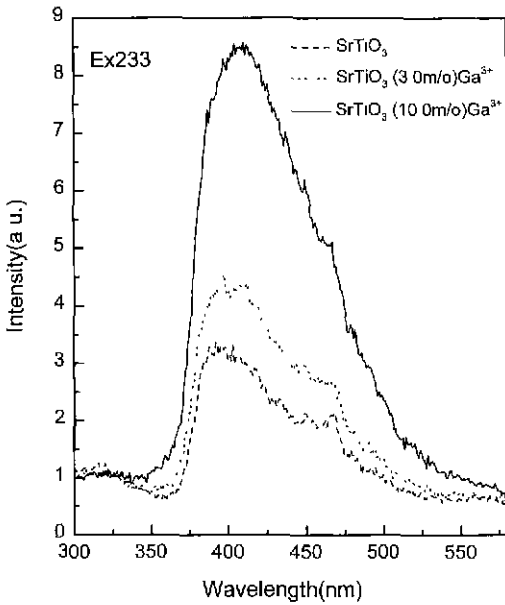


Fig. 6. Emission spectra of SrTiO₃, SrTiO₃:(3.0 m/o) Ga³⁺, and SrTiO₃:(10.0 m/o)Ga³⁺ calcined at 1200°C for 4 hrs.

이온 자체를 직접 여기시킴에 의한 것(B-band)과, SrTiO₃의 가전자를 전도대로 여기시켜 이 전자가 정공과 재결합하여 방출되는 에너지가 Pr³⁺ 이온에 전달되어 Pr³⁺ 이온을 여기시킴에 의한 것(A-band)으로 생각된다.¹⁶⁾ 이 메커니즘을 확인하기 위하여 순수한 SrTiO₃의 PL 특성을 조사하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 233, 281, 그리고 344 nm로 여기시킨 순수한 SrTiO₃에서 peak가 398 nm인 폭넓은 발광 band가 관찰되었으며 이 결과는 다른 연구자들의 CL 결과와 잘 일치한다.¹⁷⁾ 이

band의 상당 부분이 Pr³⁺이온의 여기 band와 겹쳐 있어서, 전자와 정공의 재결합 에너지가 효과적으로 Pr³⁺를 여기시키는 것으로 생각할 수 있다.¹⁶⁾ 한편 Ga³⁺를 첨가하면, acceptor의 농도가 증가되어, 전도대로 여기된 전자가 정공과 재결합할 수 있는 확률을 증대시켜, 이로 인해서 SrTiO₃의 발광세기가 증가할 것으로 생각된다. Fig. 6은 SrTiO₃에 3.0 m/o와 10.0 m/o의 Ga³⁺를 첨가하여 233 nm로 여기시켜 PL 특성을 조사한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 Ga³⁺의 첨가량에 따라 순수한 SrTiO₃에 비해 발광세기가 크게 증가하였다. 281 nm와 344 nm로 여기시켰을 때도 PL 스펙트럼은 위의 결과와 동일하였다. SrTiO₃ 발광 band의 감쇄시간을 측정한 결과 장비의 한계로 정확한 값을 구할 수 없었으나 10 nsec 이하인 것만 확인되었다. 이와 같은 결과를 종합하여 볼 때, SrTiO₃:Pr³⁺ 형광체는 발광 효율이 좋지 않을 뿐만 아니라, Pr³⁺ 이온을 직접 여기시켜서는 높은 발광 효율을 기대할 수 없다. 따라서 SrTiO₃ 모체의 흡수에 의한 여기 효율을 증가시키는 방법을 모색해야 한다. 즉, SrTiO₃의 전도대로 여기된 전자가 정공과 재결합할 수 있는 확률을 높여서 재결합시 방출되는 에너지 양을 증가시켜 Pr³⁺에 더 많은 에너지가 전달되게 함으로써 발광휘도를 증가시킬 수 있을 것이다. 전자가 재결합할 수 있는 정공의 농도를 증가시키기 위하여 본 실험에서는 Ti⁴⁺를 치환할 수 있는 Ga³⁺를 doping하였으며, 이로 인해서 발광효율의 증가를 가져올 것으로 기대했다.

Fig. 7은 1200°C에서 4시간 소성한 SrTiO₃:(1.0 m/o) Pr³⁺ 형광체와 SrTiO₃:(1.0 m/o)Pr³⁺:(6.0 m/o)Ga³⁺ 형광체의 PL 스펙트럼을 비교한 것이다. Ga³⁺을 첨가했을 때 Pr³⁺ 이온의 직접 여기에 의한 peak들(450, 470, 486 nm)은 Ga³⁺이 첨가되기 전과 같으나 SrTiO₃ 모체의 흡

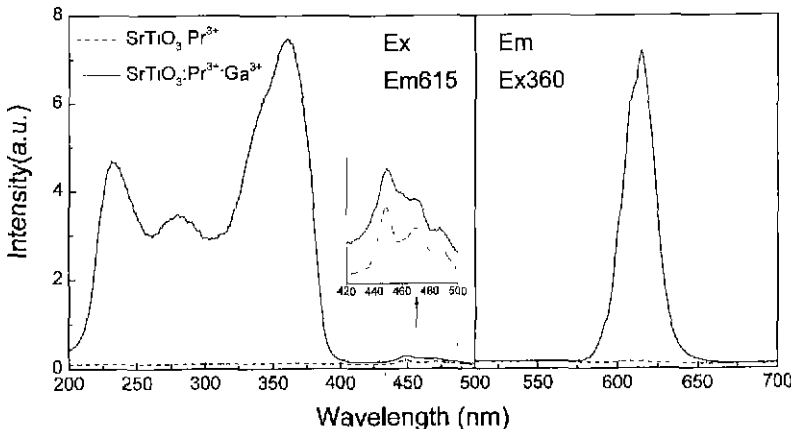


Fig. 7. PL excitation and emission spectra of SrTiO₃:(1.0 m/o)Pr³⁺ and SrTiO₃:(1.0 m/o)Pr³⁺:(6.0 m/o)Ga³⁺ fired at 1200°C for 4 hrs.

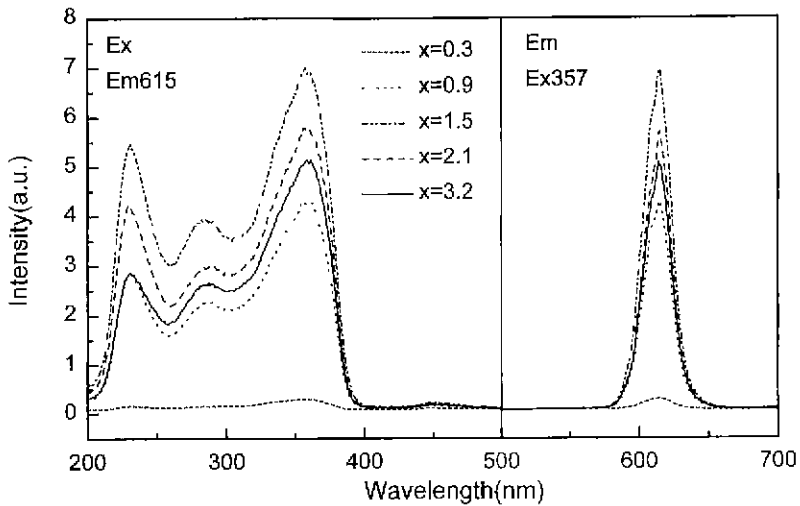


Fig. 8. PL excitation and emission spectra of SrTiO₃:(0.3 m/o)Pr³⁺:(x m/o)Ga³⁺ calcined at 1200°C for 4 hrs.

수에 의한 200~388 nm의 여기 band의 세기는 월등히 증가하였다. 이는 doping된 Ga³⁺가 Ti⁴⁺자리에 치환되어¹⁶⁾ SrTiO₃ 내의 정공의 농도를 증가시켜 SrTiO₃의 전도대로 여기된 전자와 정공과의 재결합율을 증가시키고, 이때 방출되는 에너지가 Pr³⁺ 이온에게 전이되어 Pr³⁺ 이온의 발광 peak의 세기를 증가시킨 것으로 생각된다.¹⁶⁾

Ga³⁺ 첨가량에 따른 발광 효율의 변화를 알아보기 위해 SrTiO₃에 Pr³⁺ 및 Ga³⁺를 각각 0.1~1.0 m/o와 0.1~8.0 m/o를 첨가하여 PL 특성을 조사하였다. Fig. 8은 Pr³⁺ 첨가량을 0.3 m/o로 고정시키고 Ga³⁺의 첨가량을

0.3, 0.9, 1.5, 2.1 그리고 3.2 m/o로 변화시켜 1200°C에서 4시간 열처리하여 PL 특성을 조사한 결과이다. 발광 세기는 Ga³⁺ 첨가량이 1.5 m/o까지 증가함에 따라 증가하였으며, Ga³⁺ 첨가량이 1.5 m/o 이상인 경우에는 오히려 감소하였다. 그러나 조성에 따른 peak의 위치의 변화는 관찰되지 않았다.

Table 1은 Pr³⁺ 및 Ga³⁺의 첨가량과 열처리 온도를 달리하여 얻은 시료의 발광세기를 측정된 결과를 종합한 것이다. 모든 조성에서 열처리 온도가 1200°C일 때 가장 큰 발광 세기를 얻었다. 1200°C에서 4시간 소성한 시료들

Table 1. Relative Peak Emission Intensities of SrTiO₃:Pr³⁺:Ga³⁺ of Various Compositions, SrTiO₃:(α m/o)Pr³⁺:(β m/o)Ga³⁺, Calcined at Differing Temperatures. (Ex:355 nm)

α	β(Relative intensity)	Calcination temperature (for 4 hrs)
0.1	0.3(20) 0.9(42) 1.5(40) 3.0(30)	1000°C
	0.3(75) 0.9(62) 1.5(55) 3.0(55)	1100°C
	0.1(15) 0.3(80) 0.9(78) 1.5(58) 3.0(75)	1200°C
	0.30(65) 1.5(48)	1300°C
0.3	1.5(75) 2.1(40) 2.7(40) 3.2(30)	1000°C
	0.9(84) 1.5(96) 2.1(85) 2.7(84) 3.2(68)	1100°C
	0.3(6) 0.9(60) 1.5(96) 2.1(80) 2.7(90) 3.2(72)	1200°C
	0.9(28) 1.5(28) 2.1(40) 3.2(30)	1300°C
0.6	0.9(57) 1.5(57) 2.0(77) 2.5(80) 3.0(87) 4.0(89)	1000°C
	0.9(78) 1.5(79) 2.0(80) 2.5(85) 3.0(95) 4.0(99)	1100°C
	0.9(83) 1.5(85) 2.0(89) 2.5(90) 3.0(99) 4.0(100) 7.0(85)	1200°C
	0.9(37) 1.5(35) 2.5(30) 4.0(25)	1300°C
1.0	1.0(25) 2.0(55) 4.0(70) 6.0(85) 8.0(75)	1000°C
	1.0(26) 2.0(68) 4.0(75) 6.0(88) 8.0(86)	1100°C
	1.0(28) 2.0(72) 4.0(76) 6.0(90) 8.0(78)	1200°C

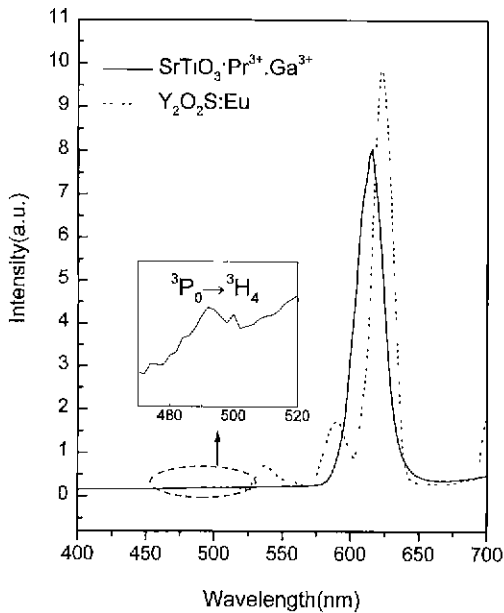


Fig. 9. CL spectra of $\text{SrTiO}_3:(0.3 \text{ m/o})\text{Pr}^{3+}:(1.5 \text{ m/o})\text{Ga}^{3+}$ fired at 1200°C for 4 hrs and $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}$ (CRT phosphor).

의 Pr^{3+} 및 Ga^{3+} 첨가량에 따른 발광세기를 대략적으로 살펴보면, Pr^{3+} 양이 0.6 m/o까지 증가함에 따라, 발광 세기도 증가하였으나, 1 m/o인 경우에는 오히려 감소하는 경향을 보이며 Ga^{3+} 의 첨가량에 따른 발광세기도 이와 비슷한 경향을 보인다. 위 결과를 종합하여 보면, Pr^{3+} 의 첨가량과 Ga^{3+} 첨가량의 비($\text{Pr}^{3+}:\text{Ga}^{3+}$)가 대략 1:4 내지 1:6 정도일 때, 가장 높은 발광 세기를 얻었다. 이 결과는 발광 세기가 activator인 Pr^{3+} 의 농도와 sensitizer인 Ga^{3+} 의 농도와의 비와 밀접한 관계가 있음을 보여주는 것이다. 그러나 그 이유는 아직 규명하지 못하였다.

Fig. 9는 1200°C 에서 4시간 소성한 $\text{SrTiO}_3:(0.3 \text{ m/o})\text{Pr}^{3+}:(1.5 \text{ m/o})\text{Ga}^{3+}$ 형광체와 $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}$ 형광체의 CL 스펙트럼을 비교한 것이다. $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}$ 형광체가 몇 개의 peak들을 보이는 반면, $\text{SrTiO}_3:(0.3 \text{ m/o})\text{Pr}^{3+}:(1.5 \text{ m/o})\text{Ga}^{3+}$ 형광체는 peak가 하나인 발광밴드를 보이며, 그 peak의 세기는 $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}$ 형광체의 peak 세기의 약 80%였다. 삽입된 그림은 500 nm 근방을 확대한 것으로, $^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_4$ 전이에 의한 발광 peak가 약하게나마 있음을 보여준다.

Fig. 10은 여기 파장을 266과 355 nm로 하여 1200°C 에서 4시간 협성한 $\text{SrTiO}_3:(0.6 \text{ m/o})\text{Pr}^{3+}:(4.0 \text{ m/o})\text{Ga}^{3+}$ 형광체의 감쇄 시간을 측정할 결과이다. 이 결과로부터 구한 감쇄 시간은 여기 파장이 266 nm일 때는 약 50 μs , 355 nm일 때는 약 40 μs 로 다른 연구에서

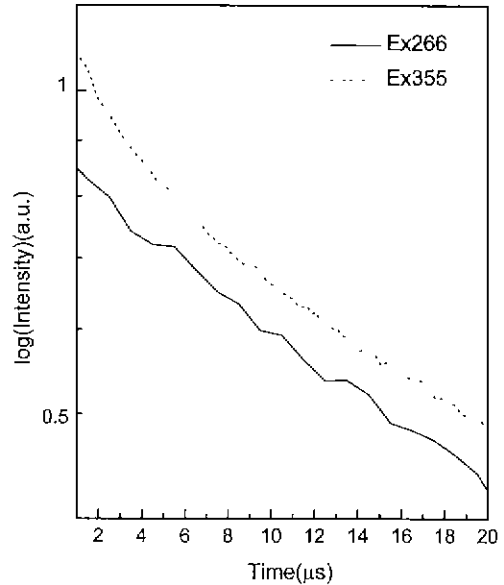


Fig. 10. Fluorescence decay curves for $\text{SrTiO}_3:(0.6 \text{ m/o})\text{Pr}^{3+}:(4.0 \text{ m/o})\text{Ga}^{3+}$ ($^1\text{D}_2 \rightarrow ^3\text{H}_4$) with 266 and 355 nm, pulsed excitations.

측정된 값과 유사하였다.^{3,4)}

4. 결 론

$\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 에 Ga^{3+} 을 첨가하여 발광특성에 미치는 영향을 조사하고 그 메커니즘을 규명하고자 하였다. 첨가된 Ga^{3+} 은 SrTiO_3 의 여기밴드를 크게 증가시켰으며, 이로 인해서 $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ 의 PL 및 CL 특성이 크게 향상되었음을 알아냈다. Pr^{3+} 고유의 발광색인 615 nm는 Ga^{3+} 의 첨가량에 따른 변화는 없었으나, 발광세기는 Ga^{3+} 량에 따라 증가하였으며, 이 발광밴드의 감쇄시간은 약 50 μs 이었다. 이 결과로부터 다음과 같은 메커니즘을 제안한다. SrTiO_3 모체를 전자파 또는 전자빔으로 여기시키면 전도대와 가전자대에 각각 전자와 정공이 형성된다. 전도대의 전자는 Ga^{3+} 에 트랩되어 있는 정공과 복사 재결합하고, 그 에너지는 Pr^{3+} 에 전달되어 Pr^{3+} 은 그 자체 고유의 적색광을 방출하게 된다.

REFERENCES

1. Stuart M. Jacobsen, "Phosphors for Full-color Low-voltage Field-emission Displays," *Journal of the SID*, 4/4, 331-335 (1996).
2. A. M. Srivastava, D. A. Doughty and W.W.Beers, "Photon Cascade Luminescence of Pr^{3+} in $\text{LaMgB}_5\text{O}_{10}$," *J. Electrochem. Soc.*, 143, 12, 4113-4116 (1996).

3. A. Lorenzo, L.E. Bausa and J. Garcia Sole, "Optical Spectroscopy of Pr³⁺ Ions in LiNbO₃," *Phys. Rev. B* **51**, 23, 16643-16650 (1995).
4. W. Ryba-Romanowski, I. Sokolska and S. Golab, "Photoluminescence of LiTaO₃:Pr," *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 6, 686-687 (1997)
5. G. C. Aumüller, W. Kostler, B. C. Grabmaier and R. Frey, "Luminescence Properties of Pr³⁺ in Cubic Rare Earth Oxides," *J Phys. Chem. Soli.*, **55**, 8, 767-772 (1994).
6. N.V. Kulshov, V.G. Shcherbitsky, A.A. Lagatsky, V.P. Mikhailov, B.I. Minkov, T. Danger, T. Sandrock and G. Huber, "Spectroscopy, Excited-state Absorption and Stimulated Emission in Pr³⁺-doped Gd₂SiO₅ and Y₂SiO₅ Crystals," *J. Luminescence*, **71**, 27-35 (1997).
7. H.E. Hoefdraad and G. Blasse, "Green Emitting Praseodymium in Calcium Zirconate," *Phys. Stat. Sol.*, (a)**89**, K95 (1975).
8. Stanley R. Rotman, "Wide-gap luminescent materials : Theory and Applications," ed. Harry L.Tuller, p.43, Kluwer Academic Publishers (1997).
9. Cheol-hee Park, Che-ik Jeon, Byung-Yong Yu, Han Choi, Hyun-Sook Bae, Chang-Hong Kim and Chong-Hong Pyun, "Luminescence Properties of CaTiO₃:Pr³⁺," International Conference on the Science and Technology of Display Phosphors, pp 151-153 (1996).
10. H. Yamamoto, S. Okamoto, H. Toki, K. Tamura and S. Itoh, "Effects of Al addition on luminescence properties of SrTiO₃:Pr³⁺," Third International Conference on the Science and Technology of Display Phosphors, California, November 3-5 (1997).
11. I. M. Batyaev, S. M. Shilov and Colani Meulcbe, "Spectral Luminescent Properties of Compounds of Praseodymium(III) Chloride with some Alkali-Metals Chlorides," *Optics and Spectroscopy*, **78**, 5, 705-708 (1995).
12. G. Wittmann and R. M. Macfarlane. "Photon-gated Photoconductivity of Pr³⁺:YAG," *Optics Letters*, **21**, 6, 426-428 (1996).
13. Lyuji Ozawa. "Cathodoluminescence Theory and Applications," pp.214-215, Kodansha, Tokyo (1990).
14. M. Cardona. "Optical Properties and Band Structure of SrTiO₃ and BaTiO₃," *Phys. Rev.*, **140**, 2A, A651-655 (1965).
15. S. Ahuja and T.R.N. Kutty. "Nanoparticles of SrTiO₃ Prepared by Gel to Crystallite Conversion and Their Photocatalytic Activity in the Mineralization of Phenol," *J. Photochem Photobiol. A:Chem.*, **97**, 99-107 (1996).
16. Klick, C. C and Schulman, J. H., "Luminescence in Solid," Solid State Physics, 5, eds. F. Seitz and D. Turnbull, p.97. Academic Press, New York (1957).
17. B. G. Yacobi and D. B. Holt, "Cathodoluminescence Microscopy of Inorganic Solids." p.247, Plenum Press, New York (1990).
18. O. Saburi, "Properties of Semiconductive Barium Titanates," *J. Phys. Soc. Jpn.*, **14**, 9, 1159-1174 (1959).