

Synthesis of $Sr_3Al_2O_6$ Phosphors by Solid State Reaction and Its Luminescent Properties

Sue Jin Kim, Hyung Il Won*, Chang Whan Won[†], and Hayk Nersisyan*

Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

*Rapidly Solidified Materials Research Center(RASOM), Daejeon 305-764, Korea

(Received February 11, 2011; Revised May 9, 2011; Accepted May 11, 2011)

고상법에 의한 $Sr_3Al_2O_6$ 형광체의 분말합성 및 발광특성

김수진 · 원형일* · 원창환[†] · Hayk Nersisyan*

충남대학교 신소재공학과

*급속응고신소재연구소

(2011년 2월 11일 접수 ; 2011년 5월 9일 수정 ; 2011년 5월 11일 승인)

ABSTRACT

A red strontium aluminate phosphor ($Sr_3Al_2O_6:Eu^{3+}, Eu^{2+}$) is synthesized using a solid state reaction method in air and reducing atmosphere. The investigation of firing temperature indicates that a single phase of $Sr_3Al_2O_6$ is formed when the firing temperature is higher than 1300°C. The effect of firing temperature and doping concentration on luminescent properties are investigated. $Sr_3Al_2O_6$ phosphor exhibits the typical red luminescent properties of Eu^{3+} and Eu^{2+} .

Key words : Phosphor, $Sr_3Al_2O_6:Eu^{2+}$, $Sr_3Al_2O_6:Eu^{3+}$, Solid state reaction

1. 서 론

발광 다이오드(LED, light emitting diode)는 전기 에너지를 적외선 또는 가시광선으로 전환시키는 소자로서 가전제품, 리모컨, 대형전광판, 자동차 램프, 교통 신호등, 휴대폰 등에 널리 사용되고 있다. 발광 다이오드의 수명은 100,000시간이며 사용 소비 전력이 백열전구의 20% 정도이므로 초절전용 광원으로 주목을 받고 있다. 또한 형광등에 사용되는 환경오염 물질인 수은이 발광 다이오드에는 없으므로 친환경적이다. 따라서 백색 발광 다이오드는 기존의 형광등이나 백열전구를 대체할 수 있는 가장 좋은 광원이다.¹⁻³⁾ 백색 발광 다이오드를 구현 하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 첫 번째 방법은 InGaN계의 청색(~460 nm) LED칩 위에 황색 형광체 YAG:Ce를 도포하여 백색 LED를 구현하는 방법과 장파장 UV LED칩에 적색, 녹색, 청색의 형광체를 조합하여 백색 LED칩을 구현하는 두 번째 방법으로 나눌 수 있다. 첫번째 방법의 경우 청색 발광 다이오드 칩 위에 YAG:Ce 형광체를 도포하면 청색광의 여기에 의해서 YAG:Ce 형광체는 황색을 발광하게 된다. 따라서 청색 발광다이오드의

청색광과 형광체에서 나오는 황색광이 혼합되면서 백색광이 만들어진다.^{4,5)} 그러나 YAG:Ce 형광체를 사용하여 만든 백색 발광 다이오드는 청색과 황색으로 구성된 2파장의 백색 발광 다이오드이므로 색 순도가 낮아 태양광과 같은 자연의 광원을 만들 수 없다. 이러한 단점을 해결하기 위해서는 청색, 녹색, 적색으로 구성된 3파장의 백색 발광다이오드를 개발해야만 한다. 이러한 3파장의 백색 발광 다이오드의 제조를 위해서는 청색 발광 다이오드 칩 위에 녹색과 적색을 발광하는 형광체를 도포하여 3파장이 혼합되어야 한다. 이 과정에서 가장 중요한 것은 고효율의 녹색과 적색을 발광하는 형광체를 개발하는 것이다. 현재 LED용으로 개발된 적색 형광체로는 $(Ca_{1-x}Sr_x)S:Eu^{2+}$, $CaS:Eu^{2+}$, $SrS:Eu^{2+}$ 등이 있다.⁶⁻⁹⁾ 그러나 이러한 황화물계열의 형광체는 제조공정에서 H_2S 가스 등 위해 물질이 발생될 뿐 아니라, 백색 LED를 만드는 과정 중에 발생하는 열에 의해 이 계열의 형광체에서는 발광 효율이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 반면 Eu^{2+} 가 도핑된 알칼리 희토류 알루미늄네이트(Alkaline earth aluminates) 계열의 형광체는 화학적으로 안정하고 내구성이 우수하며 여기원으로서의 방사성 물질을 함유하고 있지 않아 안전성이 뛰어난 재료로서 최근 다양한 분야에 널리 이용되고 있다.^{10,11)} 현재 스트론튬 알루미늄네이트계열 중에서 $Sr_3Al_2O_6$ 에 대한 연구가 보고 되고 있으며 발광특성이 저자마다

[†]Corresponding author : Chang Whan Won

E-mail : cwwon@cnu.ac.kr

Tel : +82-2-42-821-6587 Fax : +82-2-42-822-9401

약간씩 다르기에 논란이 되고 있다.¹²⁻¹⁵⁾ 상온에서 합성된 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ 형광체가 612 nm의 파장을 갖는 red 발광한다는 연구결과가^{16,17)} 있는 반면 655 nm나¹⁸⁾ 510 nm에서^{14,15)} 발광한다는 연구결과도 있다. 본 연구에서는 적색 또는 백색 LED를 구현하기 위해 Eu^{3+} 와 Eu^{2+} 를 활성화시킨 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 형광체를 고상법으로 제조하고 그 발광 특성을 분석하였다.

2. 실험방법

출발원료로서 98% 이상되는 순도급의 SrCO_3 (대정화금, Korea), Al_2O_3 (Junsei, Japan)와 Eu_2O_3 의 분말을 사용하였다. 일정한 몰 비율의 원료를 Ball mill에 넣고 24 h 혼합하였으며 효과적인 혼합을 위해 에탄올 중에서 실시하였다. 에탄올을 제거한 분말 원료는 알루미늄나 관상로를 사용하여 1200°C-1500°C의 온도에서 일정 시간 동안 고상 반응시켜 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6: \text{Eu}^{3+}$ 와 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6: \text{Eu}^{2+}$ 를 합성하였다. 합성온도와 시간, 도펀트의 농도, 환원분위기 등의 제반 반응 조건이 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6: \text{Eu}^{2+}$ 와 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6: \text{Eu}^{3+}$ 에 미치는 영향과 이에 따른 형광체의 발광특성을 검토하기 위해 X-ray diffraction (XRD, model Siemens, German)와 Scanning electron microscopy (SEM, model JSM-5410, JEOL Co.), Fluorescence spectrophotometer(F-7000, Hitachi, Japan)을 이용하여 특성평가를 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6: \text{Eu}^{3+}$ 시료를 도펀트 농도를 0.05mol로 하여 1200°C에서 1500°C까지 각각 100°C씩 변화시켜 3 시간 동안 열처리시킨 분말들의 X선 회절 분석 결과를

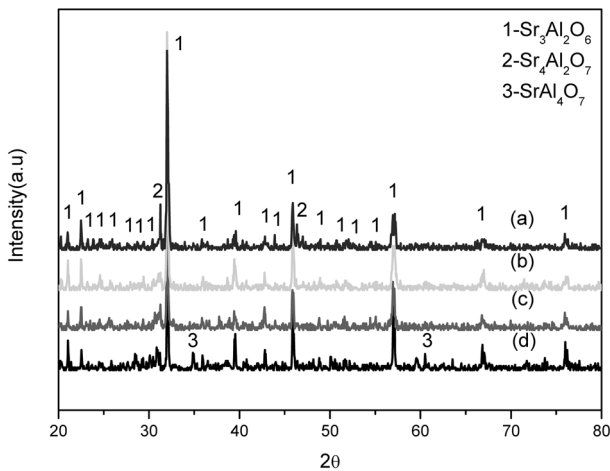


Fig. 1. XRD patterns of $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6: \text{Eu}^{3+}$ phosphors obtained at different calcinations temperatures: (a)1500°C, (b) 1400°C, (c) 1300°C, and (d) 1200°C for 3 h.

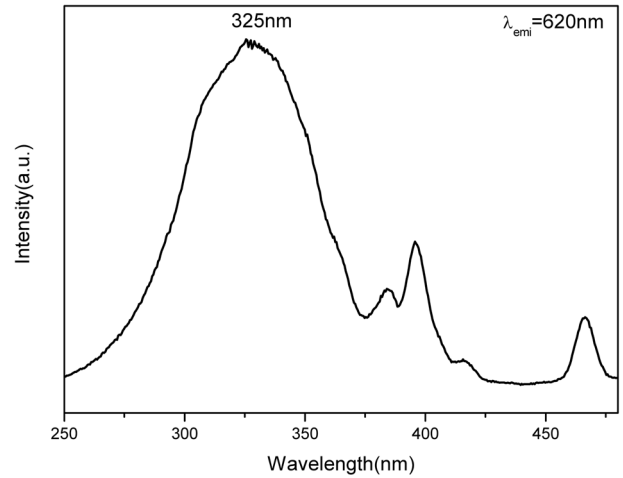


Fig. 2. Excitation of spectrum of $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6: \text{Eu}^{3+}$ at 1400°C for 3 h.

나타내었다. 열처리온도가 1200°C일 경우 반응이 완전히 일어나지 않아 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 외에 중간상인 SrAl_4O_7 가 생성되었으며 1400°C 경우 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 단일상이 생성되었다. 1200°C에서 1400°C까지 온도가 증가할수록 peak intensity는 증가하였다. 그러나 열처리 온도가 1500°C 이상인 경우부터는 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 외에 $\text{Sr}_4\text{Al}_2\text{O}_7$ 상이 생성되었다. 위의 결과로부터 낮은 온도일 때는 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 상이 안정하여 단일상으로 나타나며 1400°C 이상의 높은 온도에서는 $\text{Sr}_4\text{Al}_2\text{O}_7$ 의 상이 안정하여¹⁹⁾ 두 가지 상이 생성되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 2은 1500°C, 3시간, air 분위기에서 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6: \text{Eu}^{3+}$ 적색 형광체의 여기($\lambda_{ex}=325\text{nm}$) 스펙트럼을 나타내었다. $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6: \text{Eu}^{3+}$ 적색형광체의 여기 스펙트럼은 발광파장(λ_{em})을 620 nm에 고정하고 측정하였으며 250 nm~480 nm 영역에서 325 nm, 400 nm, 460 nm 3개의 peak이 발생하였다.

Fig. 3.1은 열처리온도에 따른 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6: \text{Eu}^{3+}$ 적색형광체의 발광($\lambda_{em}=620\text{nm}$) 스펙트럼을 각각 나타내었다. Air 분위기에서 Eu^{3+} 의 농도를 0.05 mol로 고정하여 1200°C~1500°C의 온도범위에서 3시간 동안 가열하여 합성하였다. 발광스펙트럼은 여기 파장(λ_{ex})을 325 nm에 고정하고 측정하였으며 570 nm에서 730 nm까지 넓게 나타난다. 620 nm를 최대 발광파장으로 하는 적색의 발광을 보이며 각각 576 nm 588 nm에서도 2개의 발광 피크가 관찰된다. 이는 Eu^{3+} 이온의 에너지 준위가 $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_j$ 로 전이²⁰⁻²²⁾ 되었기 때문이다. 1200 °C 이상의 온도조건에서 발광특성이 나타나기 시작해 1400°C로 열처리한 분말에서 가장 높은 발광 효율을 보이며 오히려 1500°C부터는 발광효율의 감소가 관찰된다. $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 의 주피크($\theta=32^\circ$)를 확대한 X선 회절 분석 결과인 Fig. 3.2를 살펴보면 1500°C보다 1400°C에서 Intensity가 큰 것을 볼 수 있다. Scherrer's formula인 (1)식에 의하여 결정자 크기를 계산하면 1400°C에서 482Å, 1500°C에서 431Å의 값을 얻을 수 있다. 이는

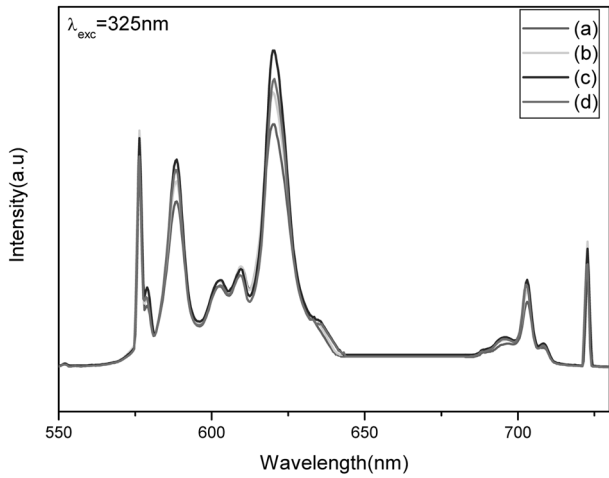


Fig. 3. 1 Emission of spectrum of Sr₃Al₂O₆: Eu³⁺ at (a)1200°C, (b)1300°C, (c)1400°C, and (d)1500°C for 3h.

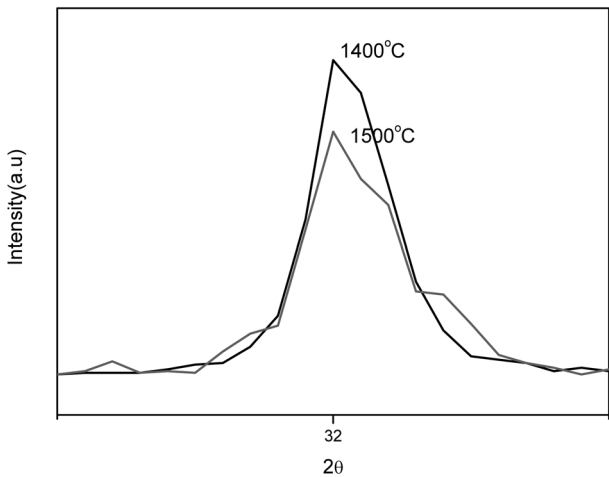


Fig.3.2 Main peak of Sr₃Al₂O₆: Eu³⁺ phosphors obtained at 1400°C and 1500°C.

1400°C에서 제조된 Sr₃Al₂O₆: Eu³⁺ 형광체의 결정성이 더 높은 것을 나타내며 이로 인해 발광 효율의 증가에 영향을 끼치는 것으로 생각된다.

$$t = K \cdot \lambda / B \cos \theta_B \quad (1)$$

(t=thickness of crystallite, K=constant dependent on crystallite shape(0.89), λ=x-ray wavelength, B= FWHM (full width at half max) or integral breadth(1.54Å), θ_B=Bragg angle)

Fig. 4는 air분위기에서 1200°C~1500°C까지 온도를 변화시켜 3시간 동안 열처리한 Sr₃Al₂O₆: Eu³⁺ 형광체의 입자 형상을 SEM을 통하여 나타내었다. 사진에 나타난 바와 같이 1200°C와 1300°C에서 제조된 Sr₃Al₂O₆: Eu³⁺ 형광체

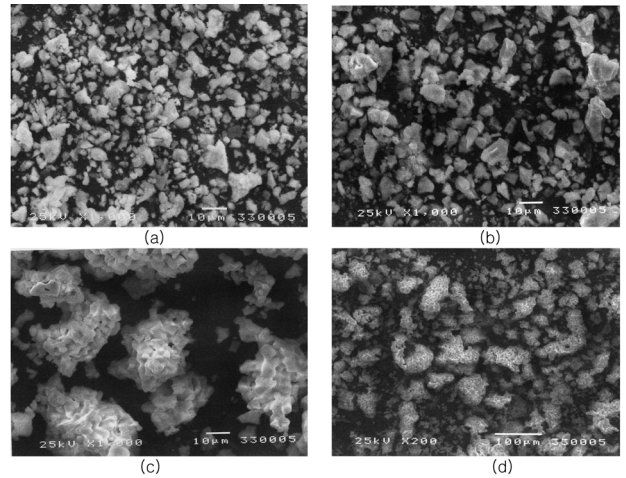


Fig. 4. SEM images of Sr₃Al₂O₆: Eu³⁺ phosphor synthesized at (a)1200°C, (b)1300°C, (c)1400°C, and (d)1500°C for 3 h.

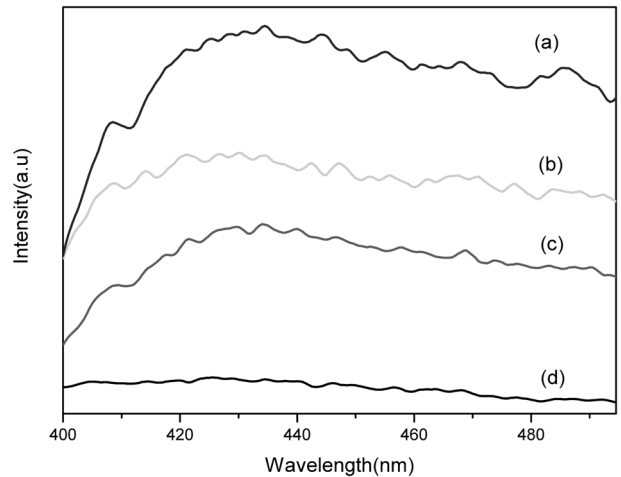


Fig. 5. Excitation of spectrum of Sr₃Al₂O₆: Eu²⁺ at (a)1500°C, (b)1400°C, (c)1300°C, and (d)1200°C for 3 h.

의 경우 크기는 10 μm 이하이며, 특정한 형태 없이 불규칙한 입자형상을 나타내었다. 1400°C와 1500°C에서 제조된 Sr₃Al₂O₆: Eu³⁺ 형광체는 입자들의 응집으로 인한 necking 현상을 볼 수 있었으며 이것으로 보아 소결이 일부 진행된 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 5와 Fig. 6은 열처리온도에 따른 Sr₃Al₂O₆: Eu²⁺ 적색형광체의 여기(λ_{ex}=428 nm) 및 발광(λ_{em}=612 nm) 스펙트럼을 각각 나타내었다. 환원분위기에서 Eu²⁺의 농도를 0.05 mol로 고정하여 1200 °C~1500 °C의 온도범위에서 3 시간 동안 가열하여 합성하였다. 여기서 스펙트럼은 발광파장(λ_{em})을 612 nm에 고정하고 측정하였다. 그리고 발광스펙트럼은 여기 파장(λ_{ex})을 428 nm에 고정하고 측정하였다. 우선 여기 스펙트럼을 살펴보면 Eu²⁺의 에너지 준위가 4f⁷→4f⁶5d 상태로 전이되어 400 nm~540 nm까지 넓은

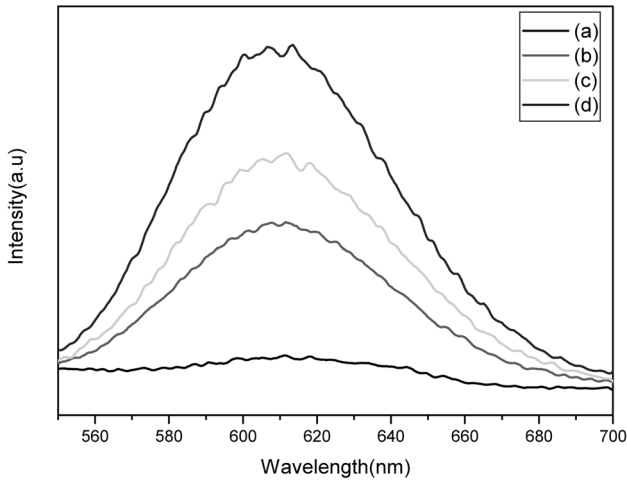


Fig. 6. Emission of spectrum of $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{2+}$ at (a)1200°C, (b)1300°C, (c)1400°C, and (d)1500°C for 3 h.

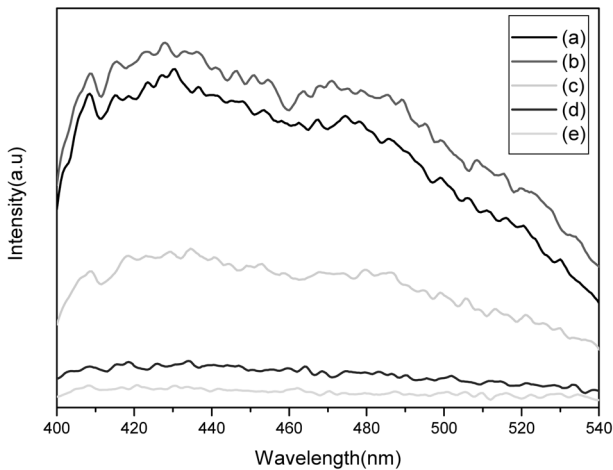


Fig. 7. excitation of spectrum of $\text{Sr}_{3-x}\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}_x^{2+}$ at 1500°C for 3h x= (a)0.1, (b)0.2, (c)0.3, (d)0.4, and (e)0.5.

여기 밴드를 보인다.²³⁾ 이것은 다양한 여기원의 이용을 통해 UV 영역이나 BLU chip으로 발광 될 수 있다는 것을 나타낸다. 428 nm에서 피크의 강도는 열처리 온도가 증가하면서 같이 증가한다. 즉 1500°C에서 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{2+}$ 적색형광체는 1300°C나 1400°C에 비하여 더 넓은 여기 스펙트럼과 더 강한 intensity를 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 발광 스펙트럼은 550 nm~700 nm까지 나타나고 중심발광 피크는 612 nm이다. 적색 영역에서 발광 밴드가 나타나는 이유는 도펀트인 Eu^{2+} 의 에너지 준위가 $5d \rightarrow 4f$ 상태로 전이^{10,24)} 되었기 때문이다. 1300°C 이상의 온도조건에서 발광특성이 나타나기 시작해 1500°C로 열처리한 분말에서 가장 높은 발광 효율을 보였다. 불순물 상이 발생함에도 불구하고 온도가 증가할수록 발광 효율이 증가하는 이유는 온도가 높아질수록 $\text{Eu}^{3+} \rightarrow \text{Eu}^{2+}$ 로 환원이 더

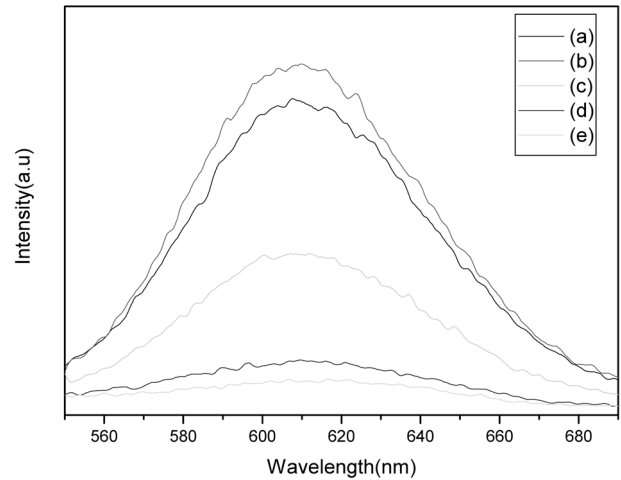


Fig. 8. emission of spectrum of $\text{Sr}_{3-x}\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}_x^{2+}$ at 1500°C for 3 h x= (a)0.1, (b)0.2, (c)0.3, (d)0.4, and (e)0.5.

활발하게 일어나기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7과 Fig. 8는 1500°C, 3시간, 환원분위기에서 Eu^{2+} 의 농도에 따른 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{2+}$ 적색형광체의 여기($\lambda_{\text{ex}}=428 \text{ nm}$) 및 발광($\lambda_{\text{em}}=612 \text{ nm}$) 스펙트럼을 각각 나타내었다. 이 때 Eu^{2+} 의 농도범위는 0.1~0.5 mol로 변화시키면서 실험하였다. 발광스펙트럼을 보면 Eu^{2+} 의 농도가 0.2 mol 일 때 발광강도가 가장 우수했으며, 0.2 mol 이상일 때에 발광효율이 낮아지는 것을 관찰 할 수 있었다. Leverenz 등의 보고에 의하면 적당량 이상의 도펀트가 첨가될 경우 형광체의 구조적 불균일성이 증가하여 발광세기가 떨어지게 된다. 즉, 도펀트의 양이 증가하게 되면 나머지 도펀트들은 응집되거나 이온대를 형성하여 비발광 중심 또는 킬러역할을 하게 되어 발광효율을 저하시키는 원인이 된다.²¹⁾

5. 결 론

본 연구에서는 Europium을 도펀트로 하여 산화분위기와 환원분위기 아래에서 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 적색 형광체를 고상법으로 합성하고 특성을 연구하였다. 1400°C에서 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 단일상이 생성되었으며 결정성이 제일 높은 것을 확인할 수 있었다. 1200°C~1300°의 경우 10 μm 이하의 분말크기를 가지며 1400°C 이상이 되면 necking 현상이 일어났다. $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}$ 형광체의 여기 스펙트럼은 UV 영역(250 nm~480 nm)에서 발생하였으며 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{2+}$ 형광체의 발광스펙트럼은 400 nm~540 nm에서 발생하였다. $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}$ 형광체의 발광스펙트럼은 570 nm~730 nm의 영역에서 620 nm 중심파장을 나타내며 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{2+}$ 형광체는 550 nm~700 nm의 영역에서 612 nm 중심파장을 나타냈다. $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6:\text{Eu}^{3+}$ 형광체는 결정성의 영향으로 1400°C에서 최대 발광 효율

을, Sr₃Al₂O₆:Eu²⁺ 형광체는 1500°C에서 최대 발광 효율을 보였다. Sr₃Al₂O₆:Eu²⁺ 형광체는 Eu²⁺의 도핑농도가 0.2 mol까지 발광 효율이 증가함을 보이다가 0.2 mol의 경우에는 발광효율이 감소하는 경향을 보였다.

REFERENCES

1. T. Mukai, M. Yamada, and S. Nakamura, "Current and Temperature Dependence of Electroluminescence of InGaN-based UV/Blue/Green Light-emitting Diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** [11B] L1358-61 (1995).
2. S. Nakamura, M. Senob, N. Iwasa, and S. Nagahama, "High-power InGaN Single-quantum-well-structure Blue and Violet Light-Emitting Diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **67** [13] 1868-70 (1995).
3. S. Nakamura, "The Role of Structural Imperfections in InGaN-based Blue Light-emitting Diodes and Laser Diodes," *Science*, **281** 956-61 (1998).
4. P. Schlotter, R. Schmidt, and J. Schneider, "Luminescence Conversion of Blue Light Emitting Diodes," *Appl. Phys., A*, **64** [4] 417-18 (1997).
5. Y.D. Huh, Y.S. Cho, and Y. R. Do, "The Optical Properties of (Y_{1-x}Gd_x)_{3-z}(Al_{1-y}Ga_y)₅O₁₂:Ce_z Phosphors for White LED," *Bull. Kor. Chem. Soc.*, **23** [10] 1435-38 (2002).
6. Y. Hu, W. Zhuang, H. Ye, S. Zhang, Y. Fanga, and X. Huang, "Preparation and Luminescent Properties of (Ca_{1-x}Sr_x)S:Eu²⁺ Red-emitting Phosphor for White LED," *J. Lumin.*, **111** [3] 139-45 (2005).
7. C. Guo, D. Hunag, and Q. Sum, "Methods to Improve the Fluorescence Intensity of CaS:Eu²⁺ Red-emitting Phosphor for White LED," *Mater. Sci. & Eng. B.*, **130** [1-3] 189-93 (2006).
8. K. S'wiatk K. Karpin'ska, M. Godlewski, L. Niinisto, and M. Leskela, "Influence of Eu Concentration on Recombination Processes in CaS: Eu²⁺ Thin Films," *J. Lumin.*, **60-61** 923-25 (1994).
9. N. Yamashita, O. Harada, and K. Nakamura, "Photoluminescence Spectra of Eu²⁺ Centers in Ca(S,Se):Eu and Sr(S,Se):Eu," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** 5539-45 (1995).
10. D. Ravichandran, S.T. Johnson, S. Erdei, R. Roy, and W. B. White, "Crystal Chemistry and Luminescence of the Eu²⁺ Activated Alkaline Earth Aluminate Phosphor," *Display*, **19** [7] 197-203 (1999).
11. G. Blasse and B. C. Grabmaier, "Luminescent Materials," pp. 33-70, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
12. T. Katsumata, K. Sasajima, T. Nabae, S. Kumuro, and T. Morikawa, "Characteristics of Strontium Aluminate Crystals Used for Long-duration Phosphors," *J. Am. Ceram. Soc.*, **81** [2] 413-16 (1996).
13. Y. Pan, H. sung, H. Wu, J. Wang, X. Yang, M. Wu, and Q. Su, "Variable Geometry Effects on the Scramjet Ignition and Combustion," *Mater. Res. Bull.*, **27** [3] 225-29 (2006).
14. Y. Liu and C. N. Xu, "Influence of Calcining Temperature on Photoluminescence and Triboluminescence of Europium-doped Strontium Aluminate Particles Prepared by Sol-Gel Process," *J. Phys. Chem., B* **107** [17] 3991-95 (2003).
15. M. Akiyama, C. N. Xu, K. Nonaka, and T. Watanabe, "Intense Visible Light Emission from Sr₃Al₂O₆: Eu,Dy," *Apply. Phys. Lett.*, **73** [21] 3046-48 (1998).
16. P. Zhang, L. X. Li, M. X. Xu, and L. Liu, "The New Red Luminescent Sr₃Al₂O₆:Eu²⁺ Phosphor Powders Synthesized via Sol- Gel Route by Microwave-assisted," *J. Alloy Compd.*, **456** [1-2] 216-19 (2008).
17. P. Zhang, M. X. Xu, Z. T. Zheng, B. Sun, and Y. H. Zhang, "Rapid Formation of Red Long Afterglow Phosphor Sr₃Al₂O₆:Eu²⁺, Dy³⁺ by Microwave Irradiation," *Mater. Sci. Eng. B.*, **136** [2-3] 159-64 (2007).
18. G. Liu, J. H. Liang, Z. H. Deng, and Y. D. Li, "Synthesis and Photoluminescence Research of Novel Red-fluorescent Sr₃Al₂O₆ Powders," *Chin. J. Inorg. Chem.*, **18** [11] 1135-37 (2002).
19. X. Ye, W. Zhuang, J. Wang, W. Yuan, and Z. Qiao, "Thermodynamic Description of SrO-Al₂O₃ System and Comparison with Similar Systems," *J. Phase Equilib Diff.*, **28** [4] 362-68 (2007).
20. R. Y. Wang, "Distribution of Eu³⁺ Ion in LaPO₄ Nanocrystals," *J. Lumin.*, **106** [3-4] 211-17 (2004).
21. S. Shionoya and W. Yen, "Phosphor Handbook," pp. 190, CRC Press, New York, 1999.
22. R. Jagannathan, T.R.N. Kutty, M. Kottaisamy, and P. Jeyagopal, "Defects Induced Enhancement of Eu³⁺ Emission in Yttria(Y₂O₃:Eu³⁺)," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** [11] 6207-12 (1994).
23. D. R. Vij, "Luminescence of Solids," p. 122, Pleum Press, New York, 1998.
24. S.H. Poort, W.P. Blokpoel, and G. Blasse, "Luminescence of Eu²⁺ in Barium and Strontium Aluminate and Gallate," *Chem. Mater.*, **7** [8] 1547-51 (1995).