

Fabrication of $\text{YAG}:\text{Er}^{3+}$ powders for the single crystal growth according to the synthetic temperature and flux concentration

Cheol Woo Park, Suk Hyun Kang, Jae Hwa Park, Hyun Mi Kim, Jae Sang Choi, Hyo Sang Kang and Kwang Bo Shim[†]

Division of Advanced Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received July 30, 2015)

(Revised August 12, 2015)

(Accepted August 17, 2015)

Abstract In this study, using solid-state and flux, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Er}^{3+}$ ($\text{YAG}:\text{Er}^{3+}$) powders were successfully synthesized at low temperatures. To analyze the crystallinity of powders according to the synthesis or non-synthesis of powders and powder calcination temperatures, X-ray diffraction (XRD) was measured. In the case of pure YAG, when YAG was analyzed using the general solid-phase method, it was calcined for 12 hours at 1400°C and pure YAG phase could be obtained. But when BaF_2 was added to YAG, YAG was synthesized at lower temperature (1000°C). It was thus found that the synthesis temperature could be lowered by about 400°C . Also, when BaF_2 with an optimal concentration was added to $\text{YAG}:\text{Er}^{3+}$, the particle shape and size according to synthesis temperatures were surveyed, and corresponding luminous intensity was discussed.

Key words Solid-state method, Flux, BaF_2 , $\text{YAG}:\text{Er}^{3+}$, Particle shape, Upconversion (UC) luminescence

다양한 온도조건과 flux 첨가량에 따른 단결정 성장용 $\text{YAG}:\text{Er}^{3+}$ 분말 제조

박철우, 강석현, 박재화, 김현미, 최재상, 강효상, 심광보[†]

한양대학교 신소재공학부, 서울, 133-791

(2015년 7월 30일 접수)

(2015년 8월 12일 심사완료)

(2015년 8월 17일 게재확정)

요약 본 연구에서는 고상법 및 flux를 이용하여 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Er}^{3+}$ ($\text{YAG}:\text{Er}^{3+}$) 분말을 저온에서 성공적으로 합성하였다. 분말의 합성 여부와 분말 하소 시 온도에 따른 결정성을 분석하기 위하여 X-ray diffraction(XRD)를 측정하였다. 순수한 YAG는 일반적인 고상법으로 합성할 경우, 1400°C 에서 12시간 동안 하소하여 순수한 YAG 상을 얻을 수 있었고, 반면에 BaF_2 를 첨가한 결과는 상대적으로 낮은 온도(1000°C)에서 합성되었다. 즉, 합성온도를 약 400°C 가량 낮출 수 있는 것으로 나타났다. 또한, BaF_2 의 최적의 농도를 찾아 첨가 후, 열처리 온도에 따라 BaF_2 로 인한 입자의 형태 및 크기를 조사하였으며 그에 따른 발광강도에 대하여 논의하였다.

1. 서론

희토류(RE)가 도핑된 YAG는 cathode-ray tubes(CRTs), field-emission display(FEDs), light emitting diodes(LEDs), Laser 재료 등과 같이 다양한 분야에서 주목받고 있다[1]. 또한 YAG 물질은 LED에 사용되어 우수한 효과를 나타내며 LED에서 그 활용범위가 넓기 때문에

이에 대한 연구가 진행되고 있으며[2], 최근 희토류가 도핑된 YAG 고체 레이저 단결정은 우수한 레이저 발진 소재로서 국내에서는 소재산업의 낙후로 말미암아 전량 미국, 일본, 중국, 러시아 등으로부터 수입하여 사용하고 있는 실정이다[3]. YAG 제조 방법으로는 solvothermal synthesis[4-6], 수열합성법(hydrothermal synthesis)[7-11], 유기금속기상법(metal-organic chemical vapor)(MOCVD)[12], 공침법(co-precipitation)[13], 스프레이열분해법(spray pyrolysis)[14, 15], 방전플라즈마법(spark-plasma synthesis)[16], 극초단파자극법(microwave irradiation)[17], 그리고 졸겔법(sol-gel combustion)[18, 19] 등이 있다.

[†]Corresponding author
Tel: +82-2-2220-0501
Fax: +82-2-2291-7395
E-mail: kbshim@hanyang.ac.kr

이 합성법들은 균일한 나노 사이즈의 입자형태를 가지는 장점이 있지만, 낮은 발광효율을 가지며 원료 값이 비싸고, 긴 반응시간과 정확한 몰 비율을 유지해야 하는 단점이 있다[20]. 고상법의 경우 원재료 값이 싸고 공정이 간단할 뿐만 아니라 Solid-state reaction법 중에서도 oxide 계통의 물질을 사용함으로써, 반응이 매우 안정적이며, out-gassing에 의한 효율 저하를 방지하는 등의 많은 장점을 가지고 있다[21]. 하지만 고상반응 공정 시 사용되는 전기 저항로의 경우, 니켈-크롬, 철-니켈-크롬 및 철-크롬-알루미늄 합금으로 되어 있는 일반적인 발열체를 사용하게 되는데 이는 1200°C 이하의 온도에서만 사용 가능하다. YAG의 경우, YAG(Y₃Al₅O₁₂) 이외에 YAM(Y₄Al₂O₉), YAP(YAlO₃) 등의 부산물이 생성되거나, 원료가 남을 수 있기 때문에 1200°C 이상의 온도가 필요하다[22]. 1200°C 이상인 전기 저항로의 발열체는 백금, 백금-로듐 합금 및 탄화규소-이규소화몰리브덴-탄탄크로마이트가 있다. 이들은 일반적인 발열체보다 가격이 비싸 원료 제작에 어려움이 있기 때문에 flux를 사용하면 일반적인 전기 저항로(니켈-크롬, 철-니켈-크롬 및 철-크롬-알루미늄 합금의 발열체)의 사용이 가능하여 보다 낮은 온도에서도 제작이 용이하다. flux의 경우, 주로 H₃BO₃, NaCl, Na₂B₄O₇ · 10H₂O, Li₂B₄O₇ · 10H₂O, Li₂CO₃, Na₂CO₃, BaCl₂ · 2H₂O 등의 액상 flux와 AlF₃, MgF₂, BaF₂, GaF₃ 등의 기상 flux가 사용된다[23]. 이러한 flux들은 용점이 낮고, flux를 첨가하지 않은 원료의 소성 온도보다 200~400°C 낮은 물질을 선택해야 하며[23], 고상 반응을 통하여 분말을 제조할 때에는 분말의 발광 휘도, 입도분포 및 flux의 반응성과 용해성을 고려하여 선택되어야 한다[24]. 또한 flux를 과하게 첨가하게 되면 YAG 단결정 제조 시 불순물로 작용하게 되어 효율이 떨어질 우려가 있기 때문에 최적의 농도를 찾을 필요가 있다. 본 논문에서는 고상법을 이용하여 flux를 첨가한 단결정 제조용 YAG : Er³⁺ 원료를 합성하였으며, BaF₂의 최적의 첨가량을 찾아 YAG : Er³⁺의 정확한 합성온도를 확인하였다. 또한 온도에 따른 구조적 특징 및 형상을 조사하였으며, 이에 따른 UC 형광특성을 분석하였다.

2. 실험방법

YAG : Er³⁺의 합성을 위하여 BaF₂를 첨가한 고상법을 사용하였다. YAG : Er³⁺ 분말 제조를 위해 출발 원료는 산화이트륨(Y₂O₃, purity 99.99%, Junsei Chemical Co. Ltd., Japan), 산화알루미늄(Al₂O₃, Junsei Chemical Co. Ltd., Japan)을 사용하였으며 Er³⁺ 도핑을 위해 산화어븀(Er₂O₃, 99.99%, Alfa Aesar)을 사용하였다. 촉매제로는 불화바륨(BaF₂, 99.99%, Alfa Aesar)을 사용하여 화학

당량비에 따라 무게를 재고 불밀을 통해 혼합 후 12시간 건조를 한 후, 건조된 분말을 합성하기 위해 전기로에 장입했으며 합성조건은 300°C/h 승온속도로 700~1600°C 사이에서 12시간 합성하였다. 본 연구에서는 Er³⁺의 농도를 20.0 mol%로 고정하였고, BaF₂의 농도를 0~10 mol%로 하였다. 제작된 YAG : Er³⁺ 분말은 X선 회절 분석기(XRD, D/MAX2C, Rigaku, Japan)를 통하여 분말의 상을 분석하였고, 분말 형태는 주사전자현미경(SEM, JEOL, JSM 5900)으로 관찰하였으며, 상온에서 980 nm의 여기 광을 조사하였을 때 발생하는 형광 특성 분석을 위해 photoluminescence(PL, Perkin Elmer, LS55 with 100-mW laser diode, USA) 분석을 시행하였다.

3. 결과 및 고찰

Flux의 영향을 보기 앞서 우리는 flux를 첨가하지 않은 순수 YAG가 생성되는 정확한 합성 온도를 확인하기 위해 각각 800~1600°C의 온도로 12시간 하소하여 얻어진 분말의 XRD 회절 패턴을 분석한 결과이다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이 합성온도가 800, 900°C일 경우, 원료인 Y₂O₃와 Al₂O₃가 함께 존재하고 있었고, 1000°C 일 경우, 원료인 Y₂O₃와 Al₂O₃ 그리고 YAM(Y₄Al₂O₉) 상이 함께 존재하는 것을 확인하였다. 1100°C인 경우, JCPDS No. 14-0475와 일치하는 것으로 보아 YAM(Y₄Al₂O₉) 상이 전반적으로 존재하고 있었으며, 약간의 YAP(YAlO₃) 상이 존재하는 것을 확인하였다. 1200°C에서는 JCPDS No. 33-0041와 일치하는 YAP(YAlO₃) 상이 대부분이지만 미량의 YAM(Y₄Al₂O₉)이 존재하고 있다. 그러나 합성 온도가 1300°C부터는 YAG(Y₃Al₅O₁₂) 상을 검출할 수 있

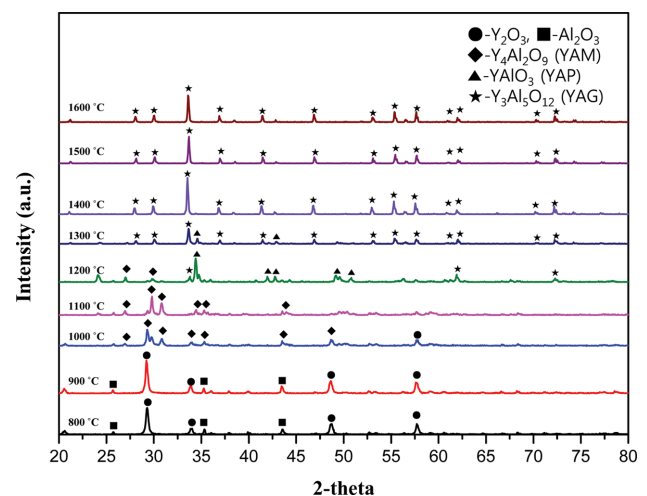


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of the YAG : Er³⁺ powder obtained through calcination temperature was changed to 800~1600°C for each 12 hours.

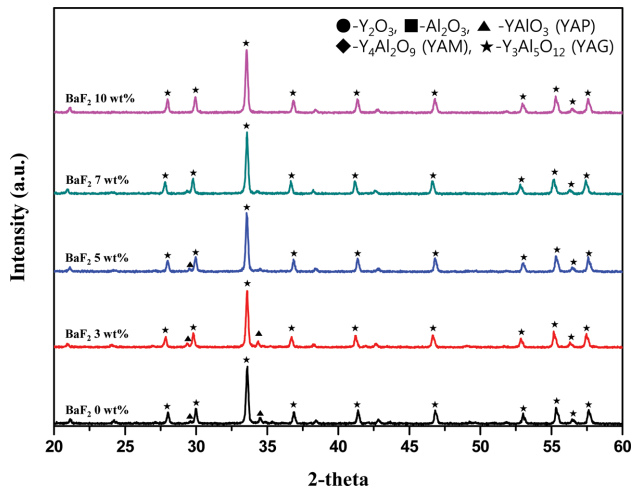


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of the YAG:Er³⁺ powder obtained through calcination at 1300°C for each 12 hours when the doping concentration of Er³⁺ was fixed at 20 mol% and the concentration of BaF₂ was changed.

었으며, 1400°C에서 단일상의 YAG가 생성된 것을 확인하였다. 또한 점차 온도를 증가시킬수록 YAG(Y₃Al₅O₁₂) 이외에 YAM(Y₄Al₂O₉), YAP(YAIO₃) 등의 부산물이나 원료가 존재하지 않는 것을 확인하였다.

Fig. 1의 XRD 패턴을 이용하여 1300°C에서 Er³⁺ 이온의 도핑농도를 20 mol%로 고정하고 BaF₂ 농도를 다르게 한 후 12시간 동안 합성하여 얻어진 분말의 XRD 패턴을 분석한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. BaF₂의 농도가 0, 3, 5, 7 mol%일 경우, YAG 상이 아닌 YAIO₃(YAP) 상이 검출되었다. 그 다음 BaF₂를 10 mol%를 첨가한 결과, JCPDS No. 33-0040과 일치하는 단일 상의 YAG:Er로 확인되었다. 따라서 10 mol%의 BaF₂가 YAG:Er³⁺ 합성 시 최적의 농도인 것을 확인하였다. 그러나 이보다 용제를 과하게 첨가하게 되면 단결정 제조 시 불순물로 작용하게 되어 효율이 떨어질 가능성이 있다. 한편, 도핑제로 쓰이는 Er³⁺가 도핑 되었어도 Host의 격자 구조를 변화시키지 않는 것으로 보아 YAG:Er³⁺ 분말의 결정성에는 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

정확한 합성온도를 확인하기 위해 BaF₂의 첨가량을 최적의 농도인 10 mol%로 고정한 후 합성온도를 700~1300°C로 변화시켜 얻어진 XRD 패턴 결과를 나타냈다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 합성온도가 700°C일 경우, 원료인 Y₂O₃와 Al₂O₃ 상이 존재하는 것을 볼 수 있다. Fig. 1에서 800°C로 합성한 XRD 패턴과 일치하고 있다. 그러나 Fig. 3의 800°C에서는 YAP가 형성되지 않고, 바로 YAG상, YAM상이 존재하는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 1의 1300°C에서 합성한 합성 X선 회절 패턴과 일치하였음을 확인할 수 있었다. 이렇게 YAG 피크가 같은 온도인 경우에도 서로 다른 결과가 나타나는 것으로 보아 BaF₂가 YAG를 형성하는데 있어 상당한 영향

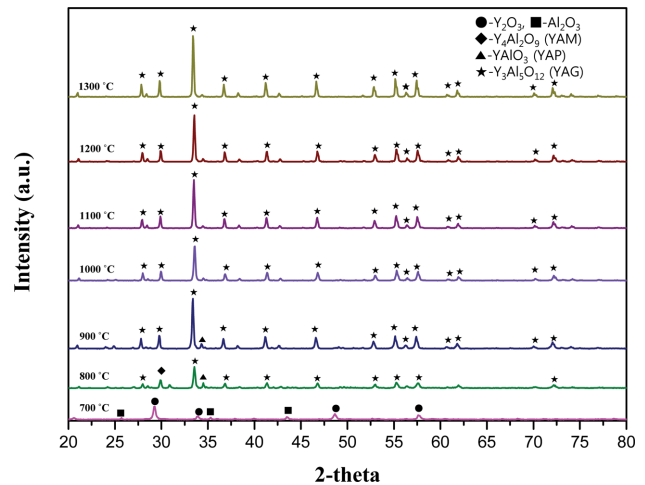


Fig. 3. Patterns of X-ray diffraction when the amount of the BaF₂ was fixed at 10 wt% and when the calcination temperature was changed to 700~1300°C for each 12 hours.

을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 900°C에서는 전반적으로 YAG 상이 나타나는 것을 알 수 있었으며, 1000°C에서부터 JCPDS No. 33-0040과 일치하는 것으로 보아 단일상의 YAG로 확인되었다. BaF₂를 첨가하지 않고 합성할 경우, 1400°C에서 YAG가 형성되므로 약 400°C 정도의 합성온도가 차이 나는 것을 알 수 있다. 이는 원료 합성 시 flux가 용해되어 그 표면장력에 의해 미립자끼리의 접촉을 도와 합성온도와 열처리 시간을 낮추는 역할을 할 뿐만 아니라, 입자끼리의 접촉기회를 증가시켜 결정성장을 도우며, 활성제가 모체 내부에 잘 분산 및 활성화될 수 있도록 하기 때문에[23] 보다 낮은 온도(1000°C)에서 YAG:Er³⁺가 합성된다.

Fig. 4는 BaF₂를 첨가량을 10 mol%로 고정한 후 온도에 따라 BaF₂가 형상 및 입자 크기에 미치는 영향을 분석하기 위해서 700~1300°C로 하소된 분말의 SEM image를 보여주고 있다. 700°C(Fig. 3(a))에서 합성한 결과, 입자들이 응집현상이 심해 입자의 형상을 구분할 수 없었다. 반면에 온도를 900°C(Fig. 3(b))로 증가하였을 때, 작은 구형의 입자들이 응집해 있는 것을 관찰할 수 있었으며, 점차 온도를 증가시킬수록 입자가 성장하는 것을 알 수 있다. 온도를 1200°C(Fig. 3(d))로 증가했을 경우, 응집현상이 약간 줄어들었으며, 분말의 형태는 1 μm의 크기의 구형의 입자들이 균일하게 형성하고 있었다. Katsutoshi Ohno et al.의 연구결과에 의하면 BaF₂가 용융되어 표면에너지를 감소시키기 위해 입자에 액막을 형성하고 있어 응집 현상이 줄어들기 때문이라고 보고하고 있다[24]. XRD 패턴과 SEM image를 분석한 결과, BaF₂를 용제로 첨가하여 열처리하는 것이 기존의 고상 반응의 경우보다 비교적 낮은 온도에서도 결정성을 향상시킬 뿐만 아니라 입자크기와 형태의 조절이 가능하

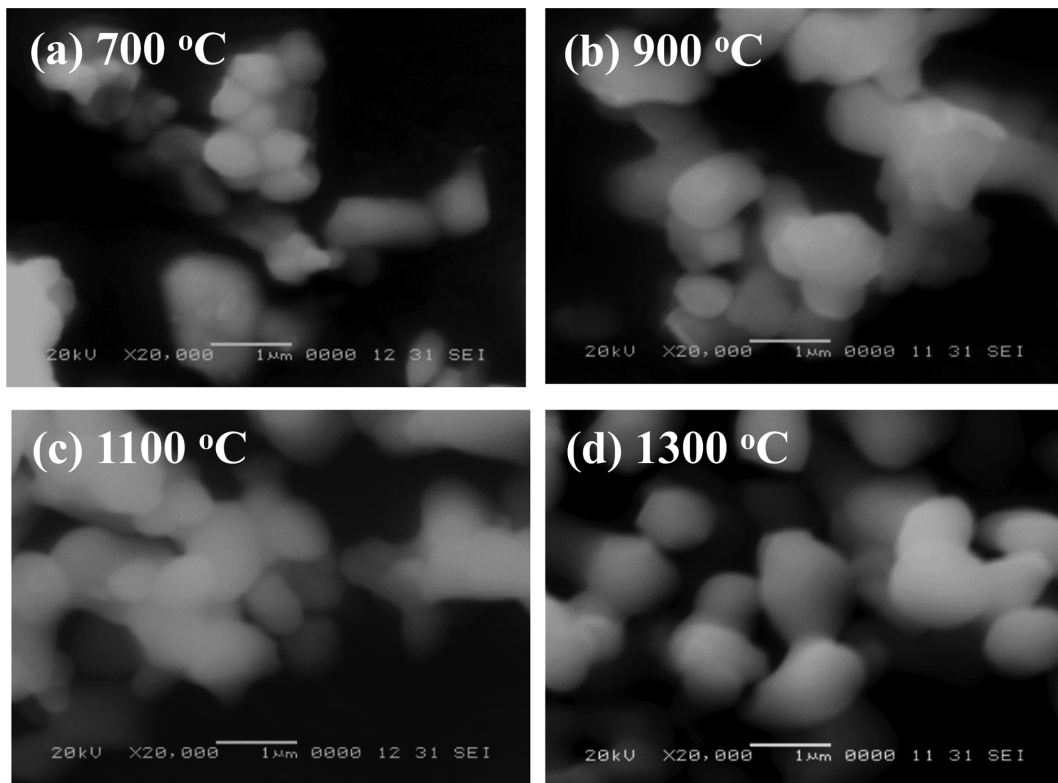


Fig. 4. SEM images of YAG : Er³⁺ power calcined at 700~1200°C when the concentration of BaF₂ was fixed at 10 wt%.

다는 것을 알 수 있다. LED의 경우, 더 밝고 고해상도를 만들기 위해서는 더 작고 밝은 입자의 형광체가 필요하지만 입자의 크기에 대한 dead layer의 비율이 높아지기 때문에 입자의 크기가 작아질수록 형광체의 밝기는 더 어두워지게 된다[25]. 즉, 분말의 합성온도에 따라 입자의 크기가 달라지며, BaF₂가 녹아 액막이 형성되어 응집현상은 사라져 점차 구형의 형태로 존재하게 된다.

Fig. 5는 BaF₂를 첨가량을 10 mol%로 고정한 후, 각

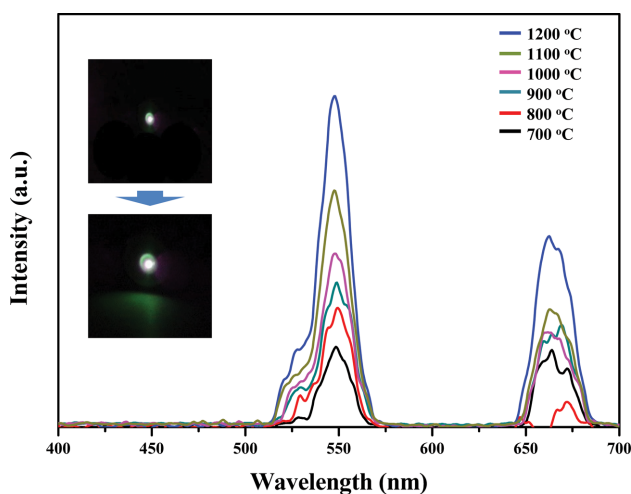


Fig. 5. The room temperature upconversion spectra of the YAG : Er³⁺ powder excited at 980 nm.

각 다른 온도에서 하소된 YAG : Er³⁺ 분말의 형광 특성 분석을 위해 PL 분석을 시행하였다. 980 μm의 레이저 다이오드(LD) 펌프의 전류가 1.35에 해당하는 500 mW의 전력 레이저 다이오드(LD)이다. 배출량(679 nm의 중심)과 유사한(560 nm에서 중심) 녹색과 빨간색은 각각 ²H_{11/2}/⁴S_{3/2} → ⁴I_{15/2}와 ⁴F_{9/2} → ⁴I_{15/2}의 복사 전환에서 발생하는 것으로 관찰되었으며[26], 피크파장이 530 nm, 660 nm에서 발광스펙트럼을 갖는 녹색형광체임을 알 수 있었다[27]. 또한 700°C~1200°C로 하소한 분말의 발광 스펙트럼의 결과에 의하면, 열처리 온도가 증가할수록 발광 강도가 약간씩 향상되는 것을 알 수 있었다. 이 중 1200°C에서 12시간 동안 열처리하여 얻어진 YAG : Er³⁺ 분말이 가장 좋은 발광 휘도를 나타내는 것을 확인하였다. XRD 패턴과 SEM image의 분석결과에서도 볼 수 있듯이, 합성온도를 증가시키면 결정성이 더 우수해지고 입자의 크기가 증가하고 형태가 균일하게 구형으로 되어 발광강도를 증가시키는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

고상법을 이용하여 Er₂O₃, Y₂O₃, Al₂O₃ 등의 산화물에 BaF₂를 첨가하여 온도 별로 열처리를 시행하였다. Flux를 첨가하지 않고 합성한 결과, YAG가 검출되는 온도는 1300°C 이상이며, 1500°C부터 단일상의 YAG가 검

출되었다. BaF₂를 첨가하여 YAG:Er³⁺ 분말 합성 시 10 mol%가 최적의 농도로 확인되었으며, 도핑제로 쓰인 Er³⁺는 결정성에 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 10 mol%의 용제를 첨가한 후 700~1300°C에서 열처리하였을 때, 1000°C에서부터 JCPDS No. 33-0040과 일치하는 단일상의 YAG:Er³⁺를 성공적으로 합성할 수 있었으며, flux를 첨가한 것과 첨가하지 않은 것의 합성온도의 차이는 약 400°C인 것으로 나타났다. SEM image와 PL 분석결과, 열처리 온도를 증가시킬수록 BaF₂로 인해 입자는 점차 구형으로 성장하였고 입자 크기에 따라 발광강도는 증가되며 1200°C에서 얻어진 분말이 가장 좋은 발광 휘도를 나타냈다. 또한 피크파장이 530 nm, 660 nm에서의 녹색발광 현상을 나타냈다. 따라서 본 연구를 종합적으로 볼 때, YAG 합성 시 10 mol%의 BaF₂를 첨가하게 되면 일반 전기 저항로를 이용할 수 있기 때문에 YAG 원료 생산의 양산화가 가능할 것으로 기대된다. 이와 함께 제조된 분말을 통해 단결정 성장에 대한 최적화 공정 실험들을 진행할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 전략적핵심소재기술개발사업(과제번호: 10047571)의 지원으로 인해 이루어졌습니다.

References

- [1] K. Zhang, H.Z. Liu, Y.T. Wu and W.B. Hu, "Co-precipitation synthesis and luminescence behavior of Ce-doped yttrium aluminum garnet (YAG:Ce) phosphor: The effect of precipitant", *J. Alloys Compd.* 453 (2008) 265.
- [2] V. Lupei, "Comparative spectroscopic investigation of rare earth-doped oxide transparent ceramics and single crystals", *J. Alloys Compd.* 451 (2008) 52.
- [3] S.H. Lee, H.T. Kim, S.I. Bae and S.J. Jung, "Growth of Nd:YAG single crystal by czochralski method and characteristics of laser generation", *Korean J. Opt. Photon.* 9 (1998) 3.
- [4] J.G. Li, T. Ikegami, J.H. Lee, T. Mori and Y. Yajima, "Reactive yttrium aluminate garnet powder via coprecipitation using ammonium hydrogen carbonate as the precipitant", *J. Mater. Res.* 15 (2000) 1864.
- [5] Y. Sang, H. Liu, Y. Lv, J. Wang, T. Chen, D. Liu, X. Zhang, H. Qin, X. Wang and R.I. Boughton, "Yttrium aluminum garnet nanoparticles synthesized by nitrate decomposition and their low temperature densification behavior", *J. Alloys Compd.* 490 (2010) 459.
- [6] X. Zhang, H. Liu, W. He, J.Y. Wang, X. Li and R.I. Boughton, "Novel synthesis of YAG by solvothermal method", *J. Cryst. Growth* 275 (2005) 1913.
- [7] Z. Wu, X. Zhang, W. He, Y. Du, N. Jia, P. Liu and F. Bu, "Solvothermal synthesis of spherical YAG powders via different precipitants", *J. Alloys Compd.* 472 (2009) 576.
- [8] Y. Hakuta, T. Haganuma, K. Sue, T. Adschiri and K. Arai, "Continuous production of phosphor YAG:Tb nanoparticles by hydrothermal synthesis in supercritical water", *Mater. Res. Bull.* 38 (2003) 1257.
- [9] H. Yang, L. Yuan, G. Zhu, A. Yu and H. Xu, "Luminescent properties of YAG:Ce³⁺ phosphor powders prepared by hydrothermal-homogeneous precipitation method", *Mater. Lett.* 63 (2009) 2271.
- [10] J.H. In, H.C. Lee, M.J. Yoon, K.K. Lee, J.W. Lee and C.H. Lee, "Synthesis of nano-sized YAG:Eu³⁺ phosphor in continuous supercritical water system", *J. Supercrit. Fluids* 40 (2007) 389.
- [11] M.J. Yoon, J.H. In, H.C. Lee and C.H. Lee, "Comparison of YAG:Eu phosphor synthesized by supercritical water and solid-state methods in a batch reactor", *Korean J. Chem. Eng.* 23 (2006) 842.
- [12] Q.X. Zheng, B. Li, H.D. Zhang, J.J. Zheng, M.H. Jiang and X.T. Tao, "Fabrication of YAG mono-dispersed particles with a novel combination method employing supercritical water process", *J. Supercrit. Fluids* 50 (2009) 77.
- [13] Y. Li, J. Zhang, Q. Xiao and R. Zeng, "Synthesis of ultrafine spherical YAG:Eu³⁺ phosphors by MOCVD", *Mater. Lett.* 62 (2008) 3787.
- [14] X. Li and W. Wang, "Preparation of uniformly dispersed YAG ultrafine powders by co-precipitation method with SDS treatment", *Powder Technol.* 196 (2009) 26.
- [15] L. Mancic, K. Marinkovic, B.A. Marinkovic, M. Dramicanin and O. Milosevic, "YAG:Ce³⁺ nanostructured particles obtained via spray pyrolysis of polymeric precursor solution", *J. Eur. Ceram. Soc.* 30 (2010) 577.
- [16] S.H. Lee, D.S. Jung, J.M. Han, H.Y. Koo and Y.C. Kang, "Fine-sized Y₃Al₅O₁₂:Ce phosphor powders prepared by spray pyrolysis from the spray solution with barium fluoride flux", *J. Alloys Compd.* 477 (2009) 776.
- [17] M. Suarez, A. Fernandez, J.L. Menendez and R. Torrecillas, "Production of dispersed nanometer sized YAG powders from alkoxide, nitrate and chloride precursors and spark plasma sintering to transparency", *J. Alloys Compd.* 493 (2010) 391.
- [18] M.L. Saladino, G. Nasillo, D.C. Martino and E. Caponetti, "Synthesis of Nd:YAG nanopowder using the citrate method with microwave irradiation", *J. Alloys Compd.* 491 (2010) 737.
- [19] L. Yang, T. Lu, H. Xu and N. Wei, "Synthesis of YAG powder by the modified sol-gel combustion method", *J. Alloys Compd.* 484 (2009) 449.
- [20] C.W. Won, H.H. Nersisyan, H.I. Won, J.H. Lee and K.H. Lee, "Efficient solid-state route for the preparation of spherical YAG:Ce phosphor particles", *J. Alloys Compd.* 509 (2011) 2621.
- [21] S.M. Park, J.S. Yoo and J.D. Lee, "Synthesis of YAG as host material for low-voltage phosphor", *Theories and Applications of Chem. Eng.* 2 (1996) 2567.
- [22] Y.H. Kim and S.J. Lee, "Synthesis of YAG:Ce³⁺ phosphor powders by polymer solution route and alumina seed application", *J. Kor. Powd. Met. Inst.* 20 (2013) 1.

- [23] W.T. Yoo, G.Y. Hong and I.W. Park, "The effect of heat-treatment on YAG phosphors for LEDs applications", *Theories and Applications of Chem. Eng.* 8 (2002) 2.
- [24] K. Ohno and T. Abe, "The synthesis and particle growth mechanism of bright green phosphor", *J. Electrochem. Soc.* 141 (1994) 5.
- [25] M. Nakielska, J. Sarnecki, M. Malinowski and R. Piramidowicz, "Up-conversion and fluorescence quenching processes studies in highly Pr³⁺-doped YAG waveguides", *J. Alloys Compd.* 451 (2008) 190.
- [26] J. Zhou, W.X. Zhang, J. Li, B.X. Jiang, W.B. Liu and Y.B. Pan, "Upconversion luminescence of high content Er-doped YAG transparent ceramics", *Ceramics International* 36 (2010) 193.
- [27] D. Matsuura, "Red, green and blue up-conversion luminescence of trivalent rare earth ion-doped Y₂O₃ nanocrystals", *Appl. Phys. Lett.* 81 (2002) 4526.