

# Solid-State Metathesis 합성법을 통한 Sr<sub>2</sub>Si<sub>5</sub>N<sub>8</sub>:Eu<sup>2+</sup> 질화물 형광체의 저온 합성

Artavazd Kirakosyan, 정 상 훈, 전 덕 영 (KAIST 신소재공학과)

## I. Introduction

현재 LED 조명용 광 변환 물질로서  $\alpha$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup>,<sup>[5,6]</sup>  $\beta$ -SiAlON:Eu<sup>2+</sup>,<sup>[7]</sup>  $MSi_2O_{2-6}N_{2+2/36}:Eu^{2+}$ ,  $Ce^{3+}$  (M=Ca, Sr and Ba),<sup>[8,9]</sup>  $M_2Si_5N_8:Eu^{2+}$ ,  $Ce^{3+}$  (M=Ca, Sr and Ba),<sup>[10-23]</sup>  $CaAlSiN_3:Eu^{2+}$ ,<sup>[24,25]</sup>  $SrAlSiN_3:Eu^{2+}$ <sup>[26]</sup>를 비롯한 질화물계 실리케이트 형광체가 널리 쓰이고 있다. 이들 형광체는 열적, 화학적으로 매우 안정하며, n-UV 또는 청색 파장 영역에 걸쳐 넓은 여기 파장을 지니고 있기 때문에, 백색 LED 용 광 변환 물질로서 큰 장점을 지니고 있다. 이 중에서도  $Sr_2Si_5N_8:Eu^{2+}$  적색 발광 형광체는 높은 발광 효율과 높은 열적 안정성을 지니고 있으며, 고연색의 백색 LED를 구현하는데 적합한 적색 발광 파장을 지니고 있어 백색 LED 용 광 변환 물질로서 활용도가 높은 형광체이다.

$Sr_2Si_5N_8:Eu^{2+}$  형광체를 비롯한 질화물계 형광체의 합성 방법은 주로 종래의 고상 합성법을 통한 합성<sup>[10,11]</sup> 외에 열탄성 환원 반응(carbothermal reduction and nitridization)을 통한 합성<sup>[13,15-19]</sup> 및 고온에서의 calcination을 통한 합성<sup>[14]</sup> 등이 있다. 하지만 이와 같은 합성법은 질화물계 형광체를 합성하는데 몇 가지 문제점을 내포하고 있는데, 이러한 문제점들은 특히 금속(Sr) 원료물질을 선정하고 합성하는 과정에서 주로 나타난다. 일반적인 고상 합성법으로  $Sr_2Si_5N_8:Eu^{2+}$  형광체를 합성할 경우  $Sr_3N_2$  또는  $Sr(NH_2)_2$ 을 원료 물질로 사용하게 된다. 그런데 이들 원료 물질의 경우 가격이 비싸며 air/water 환경에서 민감하게 반응하기 때문에 Ar-filled glove box에서 합성을 진행해야 하는 단

점이 있다. 또한 합성 시에 균질의 형광체를 얻기 위해서 높은 압력과 섭씨 1500도 이상의 온도에서 장시간 반응을 진행시켜야 하는 어려움이 있다.

$Sr_2Si_5N_8:Eu^{2+}$  형광체의 또 다른 합성 방법인 열탄성 환원반응의 경우  $SrCO_3$ 을 원료 물질로 사용하는데, 합성 과정에서  $SrCO_3$ 의 분해를 통해 생기는 SrO이 매우 안정한 물질이기 때문에 형광체 합성 시 불순물로 작용할 수 있다. 또한, 합성에 사용되는 탄소의 잔류물이 생기거나, 환원 반응에서 생성되는 이산화탄소가  $Si_3N_4$  원료 물질과 결합하여 산질화 실리케이트 불순물이 합성될 수 있다. 이러한 이유로 인해 열탄성 환원 반응의 경우 재연성의 저하에 따른 대량 생산의 어려움이 있다.

따라서 저온, 상압 조건에서 손쉽게 고효율의  $Sr_2Si_5N_8:Eu^{2+}$  형광체를 합성할 수 있는 새로운 합성 방법의 개발이 필요하다.

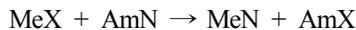
이미 몇몇 연구를 통해 저온에서 합성된  $Sr_2Si_5N_8$  형광체에 대한 연구가 보고된 바 있다. 대표적으로 Schnick와 그의 공동연구자들은 단일 소스를 기반으로 한  $Sr_2Si_5N_8$  형광체의 저온(>900°C) 합성방법에 대해 보고하였다. 이 방법에서는 ~300 bar 정도의 고압에서 암모니아에 metal을 용해하여 가공처리 된 active precursor를 사용하였다.<sup>[22]</sup> 그러나 이 연구에서는 형광체의 발광 특성 증대를 위한 추가적인 고온 열처리가 요구되어진다. Schnick와 그의 공동연구자들은 또한 1300-1400°C 정도의 온도에서 micro - crystalline  $Sr(NH_2)_2$ 와  $Si(NH_2)_2$ 사이의 반응을 통해  $Sr_2Si_5N_8$ 을 합성하는 방법을 성공적으로 개발하였다.

이와 같은 연구는 일반적인 합성온도(1450-1650°C)보다 상대적으로 저온에서 질화물계 실리케이트 형광체를(특히  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8$ ) 합성하는 가능성을 입증해주고 있다.<sup>[22,23]</sup>

본 연구에서 우리는 금속 질화물의 합성 방법들 중에서 저온 solid-state metathesis 반응에 관하여 소개하고자 한다. 이 방법은 binary nitride 합성과 질화 실리케이트 화합물을 포함한 복합 질화물 합성에 효과적인 가능성을 보인다.

Metathesis 합성법은 분자들 사이에서 하나 또는 그 이상의 이온들의 교환을 기반으로 한다. 본 합성 방법의 핵심은 질화물을 이루는 질소 이온이 삼중결합에 의해 매우 안정한 상태를 지니는 가스 상태의  $\text{N}_2$ 가 아닌 고 반응성의 알칼리 금속 질화물에 의해 공급된다는 것이다.

Metathesis 합성법을 통한 질화물의 합성 과정을 도식적으로 나타내면 다음과 같다.



여기서 Me는 주로 전이금속 이온이고 MeX는 금속 이온의 산화물, 할로젠 화물 등의 화합물을 뜻한다. Am은 알칼리나 알칼리 토금속이고, AmN은 알칼리 토금속의 질화물을 뜻한다.

상기 반응식에서의 반응은 이온의 교환 과정은 전이금속 화합물과 알칼리 금속 질화물의 이온 교환(ion exchange)의 형태로 발생한다. 이에 따라 알칼리 금속은 안정상인 산화물 또는 할로겐화물의 형태로 형성되며, 이때 전이 금속 이온은 반응성이 높은 질소 이온과 함께 남아있게 된다.

상기 반응 후에 남아 있는 알칼리 금속의 질화물 또는 반응을 통해 합성된 알칼리 금속의 산화물, 할로겐화물은 녹는점이 낮기 때문에 상대적으로 저온에서 높은 이동성(mobility)을 가지게 되어 열처리 반응시 플럭스(flux)로 작용하게 된다. 또한 할로겐화물과 산화물은 휘발성이 좋기 때문에 자가적인 정화 과정을 거쳐 불순물 없는 합성 결과물을 만들 수 있으며, 반응 후에 산 또는 물에 의해 분별적으로 쉽게 제거할 수 있다.

본 연구에서 우리는 개선된 Solid-State Metathesis 방법을 통한  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$  형광체의 합성 및 그 특성에 관해 연구하였다. 이에 따라 개선된 Solid-State Metathesis 방

법의 적용을 위한 새로운 반응 시스템으로서  $\text{Li}_3\text{N} - \text{SrCl}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Eu}_2\text{O}_3$ 와 같은 물질을 원료 물질으로 설계하여 조사하였다.

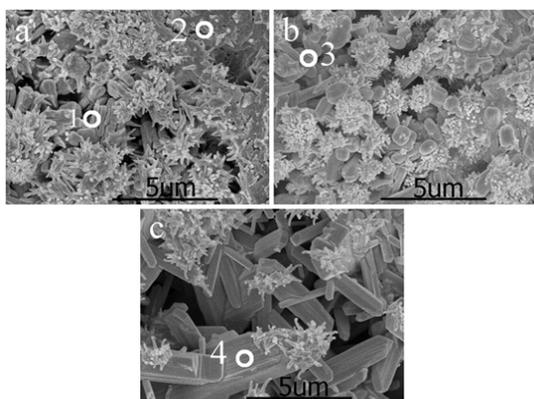
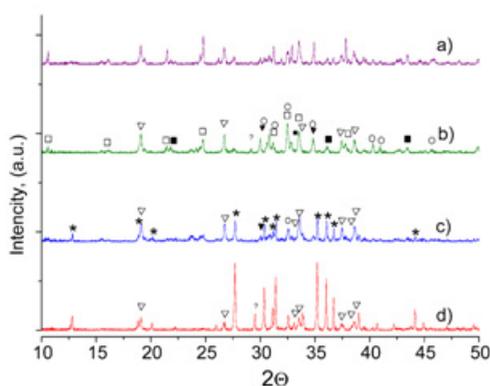
## II. Experimental

합성의 원료물질로는 99.9% 순도의  $\text{SrCl}_2$ , a- $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Li}_3\text{N}$ ,  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ (from Sigma-Aldrich)이 사용되었다. 원료 물질의 혼합 과정은 아르곤 가스 분위기의 glove box에서 진행되었으며, 2g 또는 3g의 파우더 상태의 원료물질의 혼합물을 알루미늄 도가니에 넣어 합성하였다. 합성은 튜브 타입의 퍼니스에서 진행되었으며 원료 물질의 환원 반응을 위해  $\text{H}_2$  20%/ $\text{N}_2$  80% 혼합 가스를 흘려 주었다. 샘플의 소결은 5 °/분의 속도로 실험 조건에 따라 900~1400 °C로 승온시켜 0~20시간동안 유지한 후, 퍼니스 내에서 공냉시키는 방식으로 진행하였다. 반응이 끝난 후의 파우더 형광체는 그라인딩 과정을 거친 후에, 소결 반응후 생긴 부산물을 제거하기 위해 산처리하여 증류수로 씻어낸 후 진공 오븐에 80 °C에서 2시간 동안 건조하여 최종 산물을 얻었다.

합성된 형광체의 조성 분석을 위해 X-ray diffractometer (Rigaku D/max IIIc, Rigaku, Japan with Cu Ka ( $\lambda = 1.542 \text{ \AA}$ )) 및 electron dispersive X-ray analyzer (NOVA 230) 등의 분석 장비를 사용하였다. 또한 주사 전자 현미경 (S-5000, Hitachi Ltd., Tokyo, Japan)과 형광분광광도계 (F-7000, Hitachi Ltd., Tokyo, Japan) 분석 장비를 이용해 파우더의 형태와 발광 특성에 대해 분석하였다. 형광체의 양자 효율은 동일 형광분광광도계 장비의 integrated sphere 측정법을 통해 측정하였으며, 형광체의 열적 안정성을 측정하기 위해 PTE-VUVD2L-100 승온 PL 장비를 사용하였다.

## III. Results and Discussion

[그림 1]은 1300 °C 온도에서 각각 0.5, 1, 1.25시간 조건에서 합성된  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$  형광체의 SEM 이미지이다. 합성 온도에서 0.5시간 열처리 할 때, 작은 사이즈의 결정

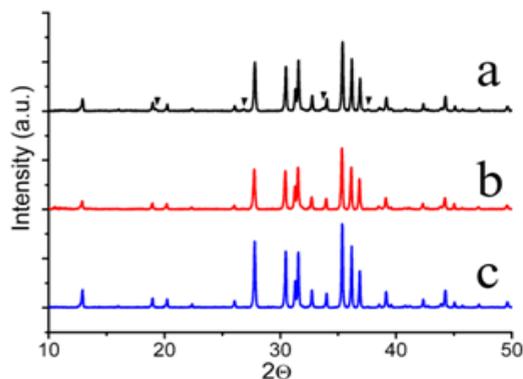
[그림 1]  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$  형광체의 SEM 이미지[그림 2]  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$  형광체의 XRD 패턴

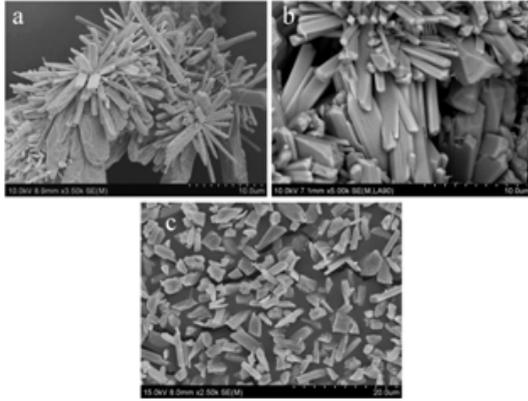
(crystal)이 형성된 부분과 (point 1) 부분적으로 녹아서 뭉쳐진 부분을 (point 2) 볼 수 있다. [그림 2]는 1300°C 온도에서 각각 0, 1, 1.25, 2 시간 조건에서 합성된 샘플의 XRD 측정 데이터이다. 합성 온도 최고점에서 0시간동안 유지한 샘플의 경우,  $\text{LiSi}_2\text{N}_3$ ,  $\text{SrCl}_2$ ,  $\text{Sr}_4\text{OCl}_6$ (JCPDS-70-3183, 75-1623, 86-1832)와 같은 물질이 존재하는 것을 확인할 수 있다[그림 2]-(a). 여기서  $\text{Sr}_4\text{OCl}_6$ 의 산소 이온은 원료 물질  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ 으로부터 합성된 것으로 보인다. 합성 온도 최고점에서의 유지 시간이 0.5~1시간으로 길어지면 (b), 샘플 조성의 변화가 일어나는데, 대표적으로  $\text{LiCl}$ (JCPDS-74-1972)와  $\text{SrSiN}_2$ (JCPDS-22-1438)이 이 구간에서 부분적으로 형성된다. 유지 시간이 1.25시간 이상이 되면 [그림 2]-(c) 샘플의 XRD 패턴 데이터에서  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8$ (JCPDS85-0101)의 피크(peak)이 나타나기 시작한다. 합성 시간이 길어짐에 따라 XRD 패턴 데이터에서  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8$ 상

의 피크 뚜렷하게 측정되며, 이는 높은 결정성을 가진  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8$  형광체가 합성됨을 나타낸다[그림 3]-(d). 또한, 이와 같은 합성 방법에서  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8$ 은 보다 낮은 온도에서 오랫동안 열처리하여 합성할 수 있다. 우리는 실험을 통해, 1100°C의 합성 온도에서 12시간 동안 열처리할 때  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8$ 상이 형성됨을 확인하였다.

[그림 3]은 1300 °C에서 6h동안 합성한 형광체 파우더의 XRD 패턴이다. 앞서 언급한 합성 과정에서 생기는 중간상( $\text{SrCl}_2$ ,  $\text{Sr}_4\text{OCl}_6$ ,  $\text{LiCl}$ ,  $\text{SrSiN}_2$ )이 완전하게 제거된 것을 확인할 수 있다[그림 3]-(a). 합성된 최종 산물에 소량 남아있는  $\text{LiSi}_2\text{N}_3$ 물질은 산처리 과정을 통해 제거할 수 있다[그림 3]-(b).  $\text{LiSi}_2\text{N}_3$ 의 존재는 합성 과정에서  $\text{SrCl}_2$  원료 물질이 부분적으로 증발(evaporation)하기 때문에 발생한다. 따라서 합성 시  $\text{SrCl}_2$ 을 10~15% 정도 과량으로 사용하여  $\text{LiSi}_2\text{N}_3$ 의 발생을 줄일 수 있다. [그림 3]-(c)는 형광체 샘플을 증류수를 이용해 정제(Purification)한 것으로 모든 불순물이 제거되어  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8$  형광체 단일상이 형성됨을 볼 수 있다.

[그림 4]는 1300°C에서 6시간 열처리 조건에서 과량의  $\text{SrCl}_2$ 을 첨가하거나(b), 또는 정량의  $\text{SrCl}_2$ 만을 사용하여 (a) 합성된  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8$  형광체 파우더의 SEM 이미지 데이터이다. 두 경우 모두 막대 모양의  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8$ 형광체가 뚜렷하게 관찰된다. 하지만, 과량의  $\text{SrCl}_2$ 을 첨가한 경우에 형광체 입자가 보다 크고 입자 표면이 매끄럽게 합성된 것을 볼 수 있다. 형광체 결정의 크기는 대략 1~5 $\mu\text{m}$ 의 직경에 5 $\mu\text{m}$ 이상의 길이로 형성된다. 그라인딩과 산처리 과정을

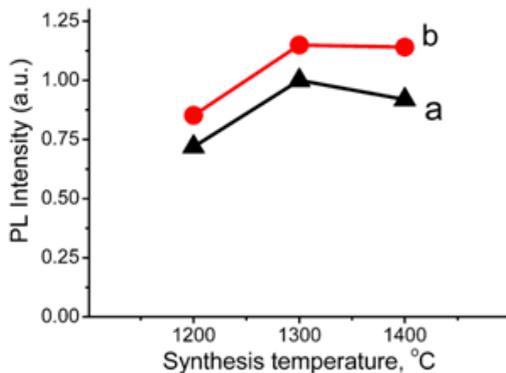
[그림 3] 합성된  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$  형광체의 XRD 패턴



[그림 4] SrCl<sub>2</sub> 첨가량 및 산처리 유무에 따른 형광체의 SEM 이미지 변화

거친 후의 형광체는 보다 향상된 결정성을 지니는 것으로 보이며, 입자의 크기는 5-10 $\mu$ m 정도로, 잘 분산되어 있음을 확인할 수 있다.

[그림 5]는 합성 온도에 따른 Sr<sub>2</sub>Si<sub>5</sub>N<sub>8</sub>:Eu<sup>2+</sup>형광체의 발광 강도를 나타낸 것이다. 여기서 a와 b는 각각 산처리 및 정제(purification)과정 전후의 샘플의 발광 강도(PL intensity)를 나타낸다. 산처리 후의 형광체 샘플은 산처리를 하지 않은 샘플에 비해 약 10~15% 정도 높은 발광 강도를 보이는데, 이는 산처리 과정에서 LiCl 등의 불순물이 제거되었기 때문으로 보인다. Sr<sub>2</sub>Si<sub>5</sub>N<sub>8</sub>:Eu<sup>2+</sup>형광체의 합성 최적화 온도는 1300°C이며 이때의 발광 강도는 YAG:Ce<sup>3+</sup>(Mitsubishi,00902) 형광체의 115~116% 정도로 나타난다. 형광체의 반치폭(FWHM)은 상온에서 95nm이



[그림 5] 합성 온도 및 후처리 과정에 따른 Sr<sub>2</sub>Si<sub>5</sub>N<sub>8</sub>:Eu<sup>2+</sup>형광체의 발광 강도의 변화

며, 이는 지금까지 보고된 Sr<sub>2</sub>Si<sub>5</sub>N<sub>8</sub>:Eu<sup>2+</sup>형광체보다 3~10nm정도 넓은 값이다.<sup>[11,12,22,23]</sup>

합성된 형광체의 외부 및 내부 양자효율은 각각 62%, 75%로 측정되었으며, 이는 기존에 보고된 형광체의 양자효율과 비슷한 수준이다.<sup>[11,14]</sup> 합성된 형광체의 승온 PL 측정 결과 175°C의 온도에서 상온의 89~90%의 발광 강도를 보였으며, 이는 기존 문헌에서 보고된 값보다 조금 높은 것으로 합성된 Sr<sub>2</sub>Si<sub>5</sub>N<sub>8</sub>:Eu<sup>2+</sup> 형광체가 매우 우수한 열적 안정성을 지니고 있음을 확인할 수 있다.<sup>[11,16,21]</sup> 형광체의 CIE(Commission Internationale de L'Eclairage) 값은 CIE(x,y) = (0.6382, 0.3612)로 측정되었다. 상기 형광체를 청색 LED 칩( $\lambda_{em} = 450nm$ ) 위에 Eu<sup>2+</sup>이 도핑된 SrSi<sub>2</sub>O<sub>2-6</sub>N<sub>2+2/36</sub>와 BaSi<sub>2</sub>O<sub>2-6</sub>N<sub>2+2/36</sub> 형광체와 함께 도포할 경우 색온도(CCT) 4700K의 백색광을 구현할 수 있으며, 이때의 CRI 값은 구동 전류에 따라 90~92 범위에서 측정되었다.<sup>[8,9]</sup>

위와 같은 결과를 통해 개선된 Solid-State Metathesis 합성법을 이용한 Sr<sub>2</sub>Si<sub>5</sub>N<sub>8</sub>:Eu<sup>2+</sup> 형광체의 합성 과정에서 SrCl<sub>2</sub>, Li<sub>3</sub>N, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 원료 물질들 간의 화학적 반응은 다음의 화학식 (1)과 같이 설명할 수 있다.



이와 같은 화학적 반응의 메커니즘은 복잡하며 순차적인 과정을 거쳐 형성된다. 앞에서 확인한 XRD 패턴 및 SEM 이미지 데이터에 따르면, 위 반응은 원료 물질의 solid + liquid 반응 메커니즘을 통해 LiCl 및 Sr<sub>2</sub>Si<sub>5</sub>N<sub>8</sub>:Eu<sup>2+</sup> 형광체 상이 형성됨을 확인할 수 있다. 또한 과량의 SrCl<sub>2</sub>을 통해 합성 과정에서 증발되는 SrCl<sub>2</sub>을 보충하여 불순물을 줄이고, 높은 발광 강도를 가지는 형광체를 합성할 수 있다. Li<sub>3</sub>N은 SrCl<sub>2</sub>의 환원제로 사용되는 동시에 합성되는 형광체에 질소 이온을 제공하는 역할을 하는데, 이는 비교적 저온과 상압의 환경에서 질화 반응을 이끌어내는 데 크게 기여한다. 또한, 반응 시에 질소 가스를 지속적으로 제공하여 질화물의 분해를 막아, 결과적으로 반응 시스템에서의 Sr 또는 Li 성분의 기화를 억제할 수 있다.

물질의 화학 반응은 합성 온도 및 시간뿐만 아니라 반

응 시스템에서의 액체상의 존재에 따라 영향을 받는다. 12시간 이상의 긴 합성 시간에서는  $1100\sim 1150^\circ\text{C}$ 의 저온에서도 부분적으로  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8$ 상이 형성되는데, 이와 같은 반응은 확산 프로세스의 가속으로 인해 가능하게 된다. 다른 한편으로, 액상의 존재는  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8$ 의 결정성을 높이는 데에도 기여한다. 더욱이 melt-assisted 반응 환경의 빠른 모빌리티(mobility)에 의해  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8$ 막대 모양 결정의 성장도 비교적 빠르게 진행될 수 있다.

개선된 Solid State Metathesis 합성의 또 다른 특징은 합성 과정에서 생기는 LiCl 물질이 반응 과정에서 기화되어(evaporated) 자체적으로 플럭스(flux) 역할을 하게 된다는 것이다. 이에 따라, Solid State Metathesis 방법을 통해 합성된 형광체는 동일 조건에서 고상합성법 또는 열탄성 환원 반응에 의해 합성된 형광체에 비해 높은 결정성을 지니며 양자 효율 및 발광 강도에 있어서도 보다 좋은 성과를 보일 수 있게 된다.

#### IV. Conclusions

지금까지 우리는  $\text{Li}_3\text{N}-\text{SrCl}_2-\text{Si}_3\text{N}_4-\text{Eu}_2\text{O}_3$  원료 물질을 이용한 개선된 Solid-State Metathesis 합성 방법을 통해 저온에서  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$  형광체가 합성되는 과정 및 합성된 형광체의 광 특성에 대해 연구하였다. 이 반응 시스템에서  $\text{SrCl}_2$ 는 알칼리 금속의 원료로서,  $\text{Li}_3\text{N}$ 는 효율적인 환원제 및 형광체의 질소 이온을 제공하는 소스 역할로 사용되었다. 형광체의 합성 온도 및 유지 시간은 형광체의 상 형성과 발광 강도 등에 크게 영향을 주었다. 또한 우리는 이 반응에서 질화물 형광체 물질이 반응 매커니즘을 통해 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 우리는 개선된 Solid State Metathesis 합성법을 통해 기존 합성법에 비해 약  $400\sim 500^\circ\text{C}$  낮은 온도인  $1100^\circ\text{C}$  조건에서  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8$  형광체를 합성할 수 있었다. 또한  $\text{SrCl}_2$  원료 물질 및 합성 과정에서 형성되는 LiCl이 열처리 과정에서 플럭스 역할을 하며, 이를 통해 형광체의 높은 결정성과 발광 강도 향상에 기여하는 것을 확인하였다.

상기 합성법을 통한  $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$  형광체 합성의 최적

온도는  $1300^\circ\text{C}$ 이며, 이때 합성된 형광체의 발광 강도는  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  형광체의 115% 수준으로 매우 높은 발광 강도를 나타내었으며, 열적 안정성에서도 우수한 수치를 보였다. 따라서 우리는 이와 같은 Metathesis 합성 방법이 앞으로 질화물 형광체를 합성하는 보다 효율적이며 우수한 합성법이 될 것으로 기대한다.

#### 참고문헌

- [1] R. -J. Xie and N. Hirosaki, Sci. Technol. Adv. Mater., 8, 588 (2007)
- [2] K. Sakuma, K. Omichi, N. Kimura, M. Ohashi, M. D. Tanaka, N. Hirosaki, Y. Yamamoto, R. -J. Xie and T. Suehiro, Opt. Lett., 29, 17. (2004)
- [3] W. Schnick, Int. J. Inorg. Mater., 3, 1267 (2001)
- [4] W. Schnick and H. Huppertz, Chem. Eur. J., 3, 679 (1997)
- [5] R. -J. Xie, N. Hirosaki, K. Sakuma, Y. Yamamoto and M. Mitomo, Appl. Phys. Lett., 84, 5404 (2004).
- [6] H.-L. Li, R. -J. Xie, N. Hirosaki, T. Suehiro and Y. Yajima, J. Electrochem. Soc., 155, J175. (2008)
- [7] N. Hirosaki, R. -J. Xie, K. Kimoto, T. Sekiguchi, Y. Yamamoto, T. Suehiro and M. Mitomo, M. Appl. Phys. Lett., 86, 211905. (2005)
- [8] Y. Q. Li, G. deWith and H. T. Hintzen, J. Mater. Chem., 15, 4492. (2005)
- [9] Y. Q. Li, A. C. A. Delsing, G. deWith and H. T. Hintzen, Chem. Mater., 17, 3242 (2005).
- [10] Y. Q. Li, Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands., (2005)
- [11] Y. Q. Li, J. E. J. van Steen, J. W. H. van Krevel, G. Botty, A. C. A. Delsing, F. J. DiSalvo, G. deWith and H. T. Hintzen, Alloys Compd., 417, 273 (2006)
- [12] X. Q. Piao, T. Horikawa, H. Hanzawa and K.-I. Machida, Appl. Phys. Lett., 88, 161908 (2006)
- [13] X. Q. Piao, T. Horikawa, H. Hanzawa and K.-I. Machida, Chem. Lett., 35, 334. (2006)
- [14] R. -J. Xie, N. Hirosaki, T. Suehiro, F.-F. Xu and M. Mitomo, Chem. Mater. 18 5578 (2006)
- [15] X. Q. Piao, K.-I. Machida, T. Horikawa and H. Hanzawa, J. Electrochem. Soc., 155, J17. (2008)
- [16] H.-L. Li, R. -J. Xie, N. Hirosaki and Y. Yajima, J. Electrochem. Soc., 155, J378. (2008)

- [17] X. Piao, K.-I. Machida, T. Horikawa and B. Yun, J. Lumin. 130, 8. (2010)
- [18] T. Horikawa, M. Fujitani, X. Q. Piao, H. Hanzawa and K.-I. Machida, J. Cer. Soc. J., 115, 623. (2007)
- [19] T. Horikawa, X. Q. Piao, M. Fujitani, H. Hanzawa and K.-I. Machida, Mater. Sci. Eng.: 012024. (2009)
- [20] T. Xiaoming, Z. Weidong, H. Yunsheng and H. J. Xiaowei, Rare Earths, 26, 652 (2008)
- [21] H.L. Li, R. -J. Xie, N. Hirosaki, T. Takeda and G. Zhou Int. J. Appl. Ceram. Technol., 6, 459. (2009)
- [22] M. Zeuner, J. Schmidt and W. Schnick, Chem. Mater., 21, 2467 (2009)
- [23] M. Zeuner, F. Hintze and W. Schnick, Chem. Mater., 21, 336 (2009)
- [24] K. Uheda, N. Hirosaki, Y. Yamamoto, A. Naoto, T. Nakajima and H. Yamamoto, Electrochem. Solid State Lett., 9, H22. (2006)
- [25] J. Li, T. Watanabe, N. Sakamoto, H. Wada, T. Setoyama and M. Yoshimura, Chem. Mater., 20, 2095 (2008)
- [26] W. Hiromu, Y. Hisanori and K. Naoto, J. Solid State Chem., 181, 1848 (2008)
- [27] G. Edward and K. Richard, Chem. Mater., 8, 333 (1996)
- [28] W. Schipper, Chem. Mater., 4, 688 (1992)
- [29] C. J. Duan, X. J. Wang, W. M. Otten, A. C. A. Delsing, J. T. Zhao and H. T. Hintzen, Chem. Mat., 20, 4, 1597 (2008)
- [30] H. Hagemann, F. Kubel and H. Bill, ChemInform Abs., 28, 17, 9236-011 (1997)

## 저 자 약 력

### Artavazd Kirakosyan



- 2002년 : diploma, Inorganic chemistry and Environmental protection, Yerevan State University, Armenia.
- 2003년 : visiting researcher - Univ. Notre Dame, IN, USA
- 2005년 : PhD, Institute of Chemical Physics, NAS, Armenia Physical Chemistry
- 2005-2008년 : Engineer technologist, Hoktembryan Ferroalloy Factory, Armenia
- 2008~2009년: Engineer technologist, Pure Iron, Armenia
- 2009~2012년: PosDoc KAIST
- 관심분야 : Luminescent materials, Inorganic phosphors, Nano structures

### 정 상 훈



- KAIST 신소재 공학과 공학학사
- KAIST 신소재 공학과 공학석사
- 2011년 2월~현재 : KAIST 신소재 공학과 박사과정
- 관심분야 : 발광소재, LED용 형광체, 나노 결정 소재

### 전 덕 영



- 서울대학교 해양학과 이학학사
- KAIST 물리학과 이학석사
- Lehigh University 물리학과 이학박사
- 1988년 2월~1994년 8월 : AT&T Bell Labs Member of Technical Staff
- 2004년 8월~2005년 8월 : Fraunhofer IZM 방문교수
- 2008년 12월~현재 : World Class University (WCU) project 사업단장
- 2002년 9월~현재 : KAIST 신소재공학과 정교수
- 관심분야 : OLED, Flexible Display, ACEPL, LED용 발광소재, 투명박막 발광소재