

열처리 온도가 SrWO₄:Sm³⁺ 박막의 구조, 표면, 발광 특성에 미치는 효과

조신호 

신라대학교 배터리학과

Effects of Annealing Temperature on the Structural, Morphological, and Luminescent Properties of SrWO₄:Sm³⁺ Thin Films

Shinho Cho

Department of Batteries Science and Engineering, Silla University, Busan 46958, Korea

(Received July 16, 2023; Revised August 11, 2023; Accepted August 14, 2023)

Abstract: The effects of the annealing temperature on the structural, morphological, and luminescent properties of SrWO₄:Sm³⁺ thin films grown on quartz substrates by radio-frequency magnetron sputtering were investigated. The thin films were annealed at various annealing temperatures for 20 min in a rapid thermal annealer after growing the thin films. The experimental results showed that the annealing temperature has a significant effect on the properties of the SrWO₄:Sm³⁺ thin films. The crystal structure of the as-grown SrWO₄:Sm³⁺ thin films was transformed from amorphous to crystalline after annealing at 800°C. The preferred orientation along (112) plane and a significant increase in average grain size by 820 nm were observed with increasing the annealing temperature. The average optical transmittance in the wavelength range of 500~1,100 nm was decreased from 72.0% at 800°C to 44.2% at an annealing temperature of 1,000°C, where the highest value in the photoluminescence intensity was obtained. In addition to the red-shift of absorption edge, a higher annealing temperature caused the optical band gap energy of the SrWO₄:Sm³⁺ thin films to fall rapidly. These results suggest that the structural, morphological, and luminescent properties of SrWO₄:Sm³⁺ thin films can be controlled by varying annealing temperature.

Keywords: Thin film, Transmittance, Annealing temperature

1. 서론

최근에 전계발광소자, 발광다이오드, 디스플레이 분야에 응용하기 위하여 주황색과 적색 발광 소재의 개발에 많은 관심이 집중되고 있다 [1]. 일반적으로 적색 계열 발광은 모체 결정(host crystal)에 적색 계열 파장 영역에 해당하는 에너지 준위를 갖고 있는 3가의 Eu³⁺와 Sm³⁺ 이온을

도핑하여 구현하고 있다. 활성제 Eu³⁺와 Sm³⁺ 이온을 도핑하는 경우에 모체 내에 위치하는 활성제 이온 주변의 국소적 환경 변화에 따라 주황색 발광(~592 nm), 적주황색 발광(~615 nm), 적색 발광(~640 nm)으로 변하는 것으로 보고되고 있다 [2]. Eu³⁺ 이온의 발광 스펙트럼은 ⁵D₀→⁷F₁ (~592 nm) 자기 쌍극자 전이에 의한 주황색 발광과 ⁵D₀→⁷F₂ (~615 nm) 전기 쌍극자 전이에 의한 적주황색 발광이 서로 대치하고 있고, Sm³⁺ 이온의 발광 스펙트럼은 ⁴G_{5/2}→⁶H_{7/2} (~605 nm) 자기 쌍극자 전이에 의한 주황색 발광과 ⁴G_{5/2}→⁶H_{9/2} (~645 nm) 전기 쌍극자 전이에 의한 적색 발광이 서로 경쟁하고 있다 [3,4].

주 발광 파장과 세기를 결정하는 모체 내에 위치하는 활

✉ Shinho Cho; scho@silla.ac.kr

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

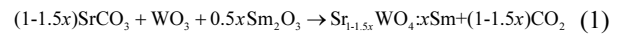
성제 이온 주변의 환경은 증착 온도, 도핑하는 활성제 이온의 농도, 증착 압력, 기판 종류, 열처리 온도와 같은 증착 조건에 따라 달라지는 것으로 보고되고 있다 [5]. 본 연구에서는 상기와 같은 여러 변수 중에서, 기판 위에 박막을 증착한 다음에 실시하는 열처리 온도가 미치는 효과를 조사하고자 한다. 일반적으로 박막을 성장시킨 다음에 열처리 공정을 수행하는 목적은 박막 내의 결함(defects)과 내부 응력을 제거하고 모체에 도핑되는 활성제 이온의 확산을 발생시켜 박막의 재결정화를 촉진시킴으로써 박막의 구조, 표면, 발광 특성을 향상시키는 것이나, 최적의 열처리 온도는 증착하는 물질의 종류에 따라 다르기 때문에 박막의 특성을 개선하기 위한 열처리 방법에 많은 노력을 집중하고 있다. 예를 들면, Ahmed 등 [6]은 마그네트론 스퍼터링 방법으로 ITO 박막을 성장한 후에 1 h 동안 250~550°C에서 열처리를 수행하였다. 250°C에서 열처리했을 때 35.05 nm이었던 결정 입자의 크기가 550°C에서 열처리했을 때 51.62 nm로 증가함을 발표하였다. Wang [7]은 펄스 레이저 증착법을 사용하여 ZnS:Mn 박막을 성장한 후에 300~500°C에서 열처리를 수행하여 열처리 온도가 증가함에 따라 주황색 발광 파장의 세기가 증가함을 보고하였다. Liu 등 [8]은 졸겔법과 스핀 코팅법을 사용하여 VO₂ 박막을 제조하였는데, 열처리 온도가 450°C에서 650°C로 증가함에 따라 박막의 결정 구조가 비정질 상태에서 VO₂ 상(phase)을 거쳐서, V₂O₅와 VO₂의 혼재된 상으로 변환됨을 관측하였다.

본 연구에서는 라디오파 마그네트론 스퍼터링(radio-frequency magnetron sputtering) 방법을 사용하여 석영 기판 위에 SrWO₄:Sm³⁺ 박막을 성장시킨 다음 열처리 온도를 실험 변수로 선택하여 제조한 박막의 구조, 표면, 발광 특성을 조사하였다. 고상반응법(solid-state reaction method)과 유압 프레스를 사용하여 증착할 스퍼터링 타겟을 제작하였고, 박막 증착 후에 열처리 온도를 변화시킴에 따른 박막의 결정 구조, 발광 스펙트럼의 파장과 세기, 색 좌표, 결정 입자의 크기와 두께를 조사하였다. 특히, 최대의 적색 발광 세기를 방출하는 최적의 열처리 온도를 결정하였고, 열처리 온도에 따른 결정 입자의 크기, 발광 스펙트럼의 세기, 투과율과 밴드갭 에너지의 상호 관계를 체계적으로 조사하였다.

2. 실험

라디오파 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 석영 기판 위에 Sm³⁺ 이온이 도핑된 SrWO₄ (SrWO₄:Sm³⁺) 형광체 박막을 증착 온도 300°C에서 성장한 후에, 서로 다른 열

처리 온도(800, 900, 1,000°C)에서 열처리를 수행하였다. 스퍼터링 타겟은 초기 화학 물질 SrCO₃ (순도: 99.9%, Sigma-Aldrich), WO₃ (99.9%), Sm₂O₃ (99.9%)을 사용하여 밀링(milling)과 건조 작업을 거쳐서 1,000°C에서 5 시간 소결하여 화학 반응식 (1)과 같이 제조하였다.



여기서 Sm₂O₃의 함량(x)은 x = 5 mol%로 선택하였다. 유압 프레스를 사용하여 합성한 분말 시료에 20 MPa의 압력을 가하여 최종적으로 5 mol%의 Sm³⁺ 이온이 도핑된 직경 25 mm와 두께 15 mm의 SrWO₄:Sm³⁺ 원형 세라믹 타겟을 제작하였다. 기판은 석영을 선택하여 1 cm × 1 cm의 크기로 절단하여 아세톤, 에탄올, 증류수 순서대로 초음파 세척을 실시하고 공기로 습기를 제거하고 시편 고정대에 장착하였다. 스퍼터링 챔버의 진공도는 터보 분자 펌프를 사용하여 4×10⁻⁵ Torr로 배기하였고, 스퍼터링 가스로는 아르곤 가스를 40 sccm 주입하여 진공도를 30 mTorr로 유지했으며, 균일한 두께의 박막을 얻기 위하여 모터로 시편 고정대를 10회전/min의 속도로 회전시키면서 증착하였다. 타겟과 기판 사이의 간격은 5 cm로 고정하였으며, 기판 온도 300°C에서 3시간 동안 파워 40 W에서 박막을 증착한 후에 세라믹 분말 합성시에 선택한 열처리 온도를 기초로 하여 800, 900, 1,000°C에서 열처리를 수행하여 열처리 온도가 박막의 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

박막의 결정 구조는 Cu-K_α 복사선(파장: 0.15406 nm)을 사용하는 X-선 회절장치(Ultima IV, Rigaku)로 조사하였고, 박막의 흡수율과 투과율은 자외선-가시광 분광광도계(Lambda 365, PerkinElmer)를 사용하여 측정하였으며, 박막의 미세 표면 형상과 두께는 전계형 주사전자현미경(FE-SEM: S-4800, Hitachi)을 사용하여 촬영하였다. 박막의 흡광과 발광 스펙트럼은 형광광도계(fluorescence spectrometer: FS-2, Scinco)를 사용하여 상온에서 측정하였으며, Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) 1931 색좌표를 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 서로 다른 열처리 온도로 제조한 SrWO₄:Sm³⁺ 박막에서 측정된 X-선 회절 패턴을 나타낸 것이다. 800, 900, 1,000°C에서 열처리한 박막의 경우에 회절각 27.78°에서 가장 강한 회절 세기를 갖는 SrWO₄ (112)면에서 발생한 주 회절 피크와 상대적으로 회절 세기가 약한 18.08°

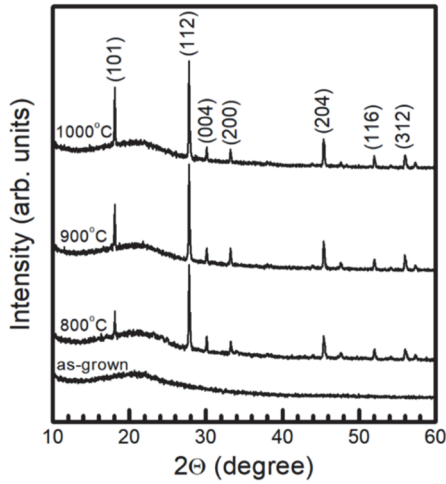


Fig. 1. XRD patterns of $\text{SrWO}_4:\text{Sm}^{3+}$ thin films annealed at various annealing temperatures.

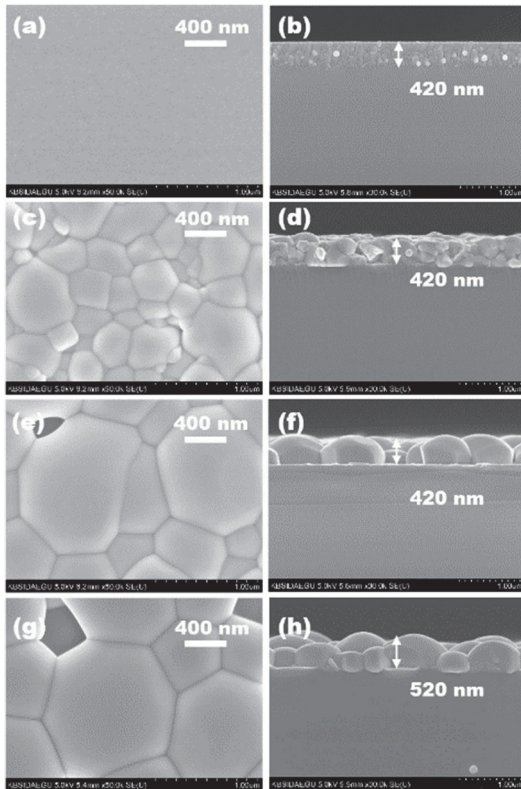


Fig. 2. FE-SEM surface and cross-sectional images of $\text{SrWO}_4:\text{Sm}^{3+}$ thin films annealed at various annealing temperatures: (a) and (b) as-grown, (c) and (d) 800°C, (e) and (f) 900°C, and (g) and (h) 1,000°C.

30.10°, 33.20°, 45.36°, 52.00°, 56.00°에 중심을 갖는 SrWO_4 (101), (004), (200), (204), (116), (312)면에서 발생한 회절 피크로 구성되었다. 상기의 회절 피크는 ICDD

PDF #00-008-0490와 일치하는 정방 정계(tetragonal system)의 결정 구조를 나타내었다. 열처리를 수행하지 않은 막 성장한(as-grown) 박막은 비정질의 형태를 보였으나, 800°C에서 열처리를 수행하자 결정성을 나타내기 시작하였다. 열처리 온도가 800°C에서 1,000°C로 증가함에 따라 주 회절 피크 (112)의 세기가 순차적으로 증가하고, 반치폭의 크기가 감소하는 경향을 보이므로 박막의 결정성은 열처리 온도가 증가함에 따라 향상됨을 알 수 있다. 1,000°C에서 열처리를 한 박막의 반치폭은 최소였으며, 그 값은 0.14°이었다. 잘 알려진 Scherrer의 식을 사용하여 계산한 평균 결정 입자의 크기는 800~1,000°C에서 열처리를 한 박막의 경우에 53~65 nm였다 [9].

그림 2는 서로 다른 열처리 온도에서 제조한 $\text{SrWO}_4:\text{Sm}^{3+}$ 박막에서 석영 기판 위에 형성된 결정 입자의 표면 형상과 크기, 단면 모습을 FE-SEM으로 촬영한 것이다. 그림 2(a)와 (b)에서 보듯이, 열처리를 수행하지 않은 막 성장한 박막의 경우에 입자의 형상은 나안으로 분간할 수 없을 정도로 작은 입자들이 형성되었으며, 박막의 두께는 420 nm이었다. 결정 입자들이 석영 기판 위에 한 층씩 쌓여서 수직 기둥 모양을 형성함을 볼 수 있다. 그림 2(c)와 (d)는 800°C에서 열처리한 박막의 표면 형상과 단면 모습을 각각 보여 주고 있는데, 평균 400 nm의 크기를 갖는 다각형 형태의 입자들이 형성되었으며, 박막의 두께는 막 성장한 박막의 두께와 동일한 420 nm이었다. 그림 2(e)와 (f)에서 보듯이, 900°C에서 열처리한 박막의 경우에 결정 입자의 크기는 현저히 증가하여 평균 1 μm 인 육각형 형태의 입자와 400 nm 크기의 다각형 입자들이 서로 연결되어 있으며, 박막의 두께는 430 nm이었다. 그림 2(g)와 (h)는 열처리 온도 1,000°C에서 제조된 박막의 모습을 나타내는데, 입자의 크기는 전체적으로 증가하여 평균 입자의 크기가 1.2 μm 인 육각형 형태로 나타났으며, 박막의 두께도 520 nm로 증가하였다.

그림 3은 자외선-가시광 분광광도계를 사용하여 측정한 서로 다른 온도에서 열처리한 $\text{SrWO}_4:\text{Sm}^{3+}$ 박막의 흡수율(absorbance)과 투과율(transmittance, 삽입 그림) 스펙트럼을 나타낸 것이다. 막 성장한 $\text{SrWO}_4:\text{Sm}^{3+}$ 박막과 800, 900, 1,000°C에서 열처리를 수행한 박막의 흡수단(absorption edge)은 각각 273, 238, 417, 421 nm에서 발생하였다. 광학 흡수율 A 와 투과율 $T(\%)$ 사이의 관계식, $T(\%) = 10^{2-A}$ 을 사용하여 투과율을 계산할 수 있는데, 막 성장한 박막과 성장 후에 800, 900, 1,000°C에서 열처리를 수행한 박막의 투과율은 파장 영역 500~1,100 nm에서 각각 92.0, 72.0, 58.1, 44.2%였다. 열처리 온도가 증가함에 따라 투과율이 감소하는 결과는 Negi 등이 스퍼터링 방

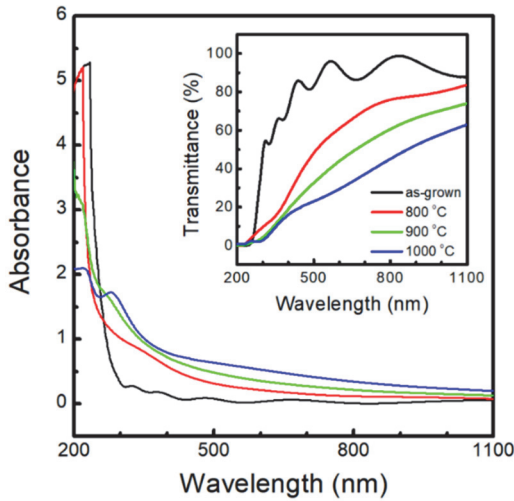


Fig. 3. Absorbance and transmittance (inset) spectra of SrWO₄:Sm³⁺ thin films annealed at various annealing temperatures.

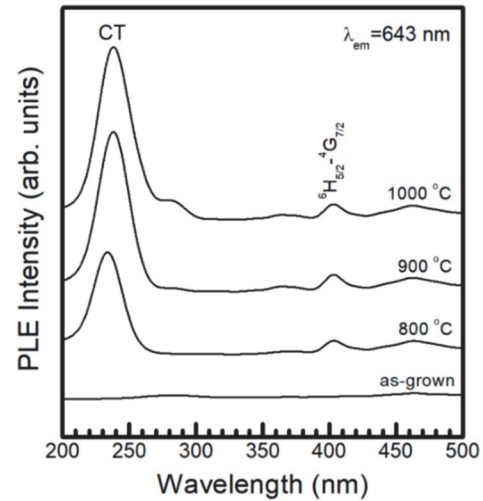


Fig. 5. Excitation spectra of SrWO₄:Sm³⁺ thin films annealed at various annealing temperatures.

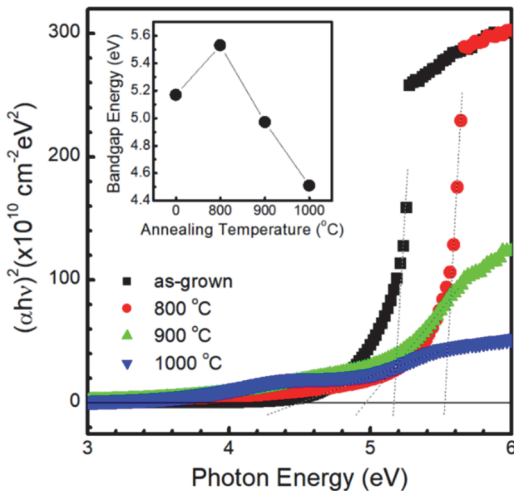


Fig. 4. Optical band gap energy of SrWO₄:Sm³⁺ thin films annealed at various annealing temperatures.

법으로 성장시킨 MgTiO₃ 박막에서 측정한 결과와 일치하였다 [10]. 본 연구에서 1,000°C에서 열처리한 박막의 투과율이 최소값을 나타낸 것은 그림 2(h)의 FE-SEM의 사진에서 보듯이 열처리 온도가 증가함에 따른 박막의 두께가 증가한 요인으로 판단할 수 있다.

SrWO₄:Sm³⁺ 박막의 밴드갭 에너지 E_g 는 흡수 계수 (absorption coefficient)의 제곱 $(\alpha h\nu)^2$ 과 광자 에너지 $h\nu$ 의 관계식으로 나타낸 Tauc의 모델, $(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$ 을 사용하여 계산할 수 있다 [11]. 밴드갭 에너지는 광자 에너지를 x 축, 흡수 계수의 제곱을 y 축으로 설

정하여 측정된 데이터를 표시하였을 때, 데이터가 급속하게 증가하는 부분을 가장 잘 맞추는 직선을 그어서 y 축의 값이 0이 될 때에 x 축의 값으로 정의한다. 그림 4는 서로 다른 온도에서 열처리한 SrWO₄:Sm³⁺ 박막의 광학 밴드갭 에너지를 나타낸 것이다. 막 성장한 SrWO₄:Sm³⁺ 박막의 밴드갭 에너지는 5.17 eV였으며, 열처리 온도가 800°C에서 1,000°C로 증가함에 따라 밴드갭 에너지는 5.53 eV에서 4.51 eV로 점차적으로 감소하였다. 열처리 온도 증가에 따른 밴드갭 에너지의 감소에 영향을 끼치는 것은 기판 상부에 형성되는 결정 입자의 균일성과 크기, 박막의 결정성, 투과율, 도핑하는 활성제 이온의 농도와 관련되는데, 이러한 요인 중에서, FE-SEM의 사진에서 보듯이 서로 다른 온도에서 열처리한 박막은 결정 입자의 크기에 현저한 차이를 보이기 때문에 석영 기판 상부에 형성되는 입자의 크기가 박막의 밴드갭 에너지에 영향을 미치는 요인으로 사료된다.

그림 5는 서로 다른 온도에서 열처리한 SrWO₄:Sm³⁺ 박막의 흡광(photoluminescence excitation) 스펙트럼을 나타낸 것이다. 막 성장하여 열처리를 수행하지 않은 박막의 경우에는 흡광 스펙트럼이 검출되지 않았다. 열처리 온도 800°C에서 제조한 박막의 흡광 스펙트럼은 방출 파장 643 nm로 제어하였을 때 234 nm에 최대 흡광 세기를 가지면서 200~270 nm의 넓은 파장 영역에 걸쳐서 나타나는데, 이것은 Sm³⁺ 양이온과 O²⁻ 음이온들 사이의 전하 전달 (charge transfer, CT) 밴드에 의한 흡광 스펙트럼이다 [12]. CT에 의한 흡광 스펙트럼과 비교하여 흡광 세기가 6.4배 약한 Sm³⁺ 이온의 $^6H_{5/2} \rightarrow ^4G_{7/2}$ 전이에 의하여 403

nm에 피크를 갖는 흡광 스펙트럼이 관측되었다 [13]. 열처리 온도가 900°C와 1,000°C로 증가함에 따라 흡광 파장은 4 nm 장파장 쪽으로 이동하면서 흡광 스펙트럼의 세기는 순차적으로 증가하여 열처리 온도 1,000°C에서 최대값을 보였다. 열처리 온도 1,000°C에서 CT에 의한 흡광 스펙트럼의 세기는 800°C에서의 흡광 세기에 비하여 1.8배 증가하였다.

SrWO₄:Sm³⁺ 박막의 발광 스펙트럼은 최대 흡광 세기를 갖는 234 nm을 여기 파장으로 선택하여 측정하였다. 그림 6은 서로 다른 열처리 온도에서 제조한 SrWO₄:Sm³⁺ 박막의 발광(photoluminescence) 스펙트럼을 나타낸 것이다. 막 성장한 박막의 경우에 발광 스펙트럼은 검출되지 않았으나, 800°C, 900°C, 1,000°C에서 열처리한 박막의 경우에는 Sm³⁺ 이온에 의한 전형적인 네 종류의 발광 피크가 관측되었다. Sm³⁺ 이온의 ⁴G_{5/2}→⁶H_{5/2} 전이에 의한 561 nm에 피크를 갖는 황색 발광, ⁴G_{5/2}→⁶H_{7/2} 전이에 의한 599 nm에 피크를 갖는 주황색 발광, ⁴G_{5/2}→⁶H_{9/2} 전이에 의한 643 nm에 피크를 갖는 적색 발광, ⁴G_{5/2}→⁶H_{11/2} 전이에 의한 702 nm에 피크를 갖는 적외선 발광 스펙트럼이 나타났다 [14]. 상기의 발광 스펙트럼들 중에서, ⁴G_{5/2}→⁶H_{9/2} (643 nm) 전이에 의한 적색 발광의 세기가 최대였고, ⁴G_{5/2}→⁶H_{11/2} (702 nm) 전이에 의한 적외선 발광 스펙트럼의 세기는 매우 미약하였다. 상기의 결과는 마그네트론 스퍼터링으로 증착한 BaMoO₄:Sm³⁺ 박막에서 측정된 결과와 일치하였다 [15]. ⁴G_{5/2}→⁶H_{5/2} (561 nm) 전이는 선택 규칙(selection rule) $\Delta J = 0$ 를 만족하는 자기 쌍극자 전이(magnetic dipole transition)이며, SrWO₄ 모체 격자 내에서 발광 센터로 역할을 하는 Sm³⁺ 이온 주변의 화학적 환경과 대칭성에 거의 영향을 받지 않는다 [16]. 여기서 $\Delta J = 0$ 은 총 각운동량 양자 수(total angular momentum quantum number)의 차이를 나타낸다. 이와는 달리, ⁴G_{5/2}→⁶H_{9/2} (643 nm) 전이는 선택 규칙 $\Delta J = 2$ 를 만족하는 전기 쌍극자 전이(electric dipole transition)만 허용되고 발광 스펙트럼의 세기는 발광 센터 Sm³⁺ 이온의 주변 환경에 매우 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다 [17]. ⁴G_{5/2}→⁶H_{7/2} (599 nm) 전이는 일부는 자기 쌍극자 전이를 하고 일부는 전기 쌍극자 전이를 수행하며, ⁴G_{5/2}→⁶H_{11/2} (702 nm) 전이는 전기 쌍극자 전이를 수행한다 [18]. Sm³⁺ 이온의 ⁴G_{5/2}→⁶H_{9/2} (643 nm) 전기 쌍극자 전이와 ⁴G_{5/2}→⁶H_{5/2} (561 nm) 자기 쌍극자 전이에 의한 두 발광 세기의 비(ratio)는 SrWO₄ 모체 결정 내에서 빛을 방출하는 활성제 Sm³⁺ 이온을 둘러싼 국부적인 환경의 비대칭성(asymmetry)을 조사하는 수단으로 이용되고 있다. 만일 두 발광 세기의 비가 1보다 크면, Sm³⁺ 이온의 비대

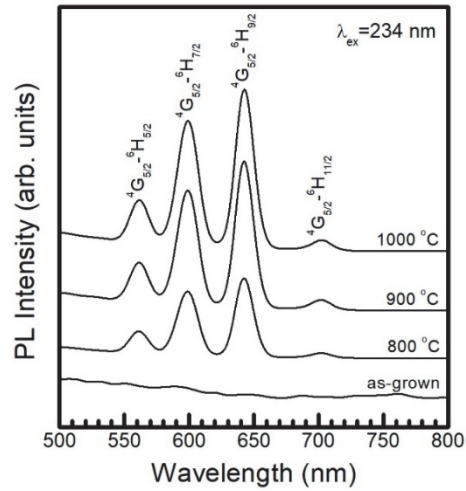


Fig. 6. Emission spectra of SrWO₄:Sm³⁺ thin films annealed at various annealing temperatures.

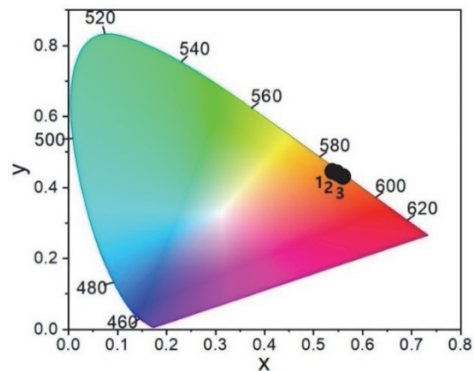


Fig. 7. CIE chromaticity diagram of SrWO₄:Sm³⁺ thin films annealed at various annealing temperatures. The color coordinates of the thin films annealed at 800, 900, and 1,000°C are labeled as 1, 2, and 3 respectively.

칭성이 증가하여 Sm³⁺ 이온이 비반전 대칭 자리(non-inversion symmetry site)에 위치하며, 두 발광 세기의 비가 1보다 작으면, 비대칭성은 감소하고, Sm³⁺ 이온은 반전 대칭 자리(inversion symmetry site)에 위치하는 것으로 보고되고 있다 [19]. 본 연구의 경우에 800, 900, 1,000°C에서 열처리한 SrWO₄:Sm³⁺ 박막의 두 발광 세기의 비는 각각 2.93, 3.09, 3.15였다. 이 결과는 Sm³⁺ 이온이 SrWO₄ 모체 결정 내에서 비반전 대칭 자리에 위치하고 있음을 의미한다. 열처리 온도가 800°C에서 1,000°C로 증가함에 따라 모든 발광 스펙트럼의 세기는 증가하였으며, Sm³⁺ 이온의 ⁴G_{5/2}→⁶H_{9/2} (643 nm) 전기 쌍극자 전이에 의한 적색 발광의 세기는 열처리 온도 800°C에서보다 1,000°C로 열처리한 경우에 약 2.1배 증가하였다. 높은 열

처리 온도에서 발광 스펙트럼의 세기가 증가한 것은 그림 2(g)의 FE-SEM의 사진에서 보는 바와 같이 열처리 온도가 증가함에 따라 결정 입자의 크기가 현저히 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

그림 7은 파장 234 nm로 여기시켰을 때 서로 다른 온도에서 열처리한 SrWO₄:Sm³⁺ 박막에서 발광하는 빛의 CIE 1931 색 좌표를 나타낸 것이다. 800°C에서 열처리한 박막의 색 좌표는 (0.543, 0.445)으로 치자색(orange yellow)이었다. 열처리 온도를 900°C와 1,000°C로 증가함에 따라 적색 발광(643 nm)의 세기가 증가하여 SrWO₄:Sm³⁺ 박막은 주황색을 나타내는 색 좌표 (0.549, 0.440)와 (0.553, 0.437)로 각각 이동하였다.

4. 결론

막 성장한 SrWO₄:Sm³⁺ 박막과 열처리 온도를 800, 900, 1,000°C로 변화시키면서 제조한 SrWO₄:Sm³⁺ 박막의 구조, 입자의 크기와 표면 형상, 흡수율과 투과율, 밴드갭 에너지, 발광과 흡광 스펙트럼, 색 좌표의 변화를 조사하였다. 막 성장한 박막은 비정질 성질을 보였으나, 열처리를 수행한 모든 박막은 주 회절 피크 (112)를 갖는 정방 정계의 결정 구조를 나타내었다. 800°C에서 열처리한 박막의 경우에 평균 400 nm의 크기를 갖는 다각형 형태의 입자들이 형성되었으며 두께는 420 nm였다. 열처리한 SrWO₄:Sm³⁺ 박막의 주 흡광 스펙트럼은 Sm³⁺ 양이온과 O²⁻ 음이온들 사이의 전하 전달 밴드에 의해 234 nm에서 발생하였으며, 주 발광 스펙트럼은 Sm³⁺ 이온의 ⁴G_{5/2}→⁶H_{9/2} 전기 쌍극자 전이에 의한 643 nm의 적색 발광이었다. 열처리 온도가 증가함에 따라 박막의 발광 세기는 증가하였으며, 석영 기판 위에 형성되는 결정 입자의 크기도 증가하였다. 상기의 결과를 통하여 SrWO₄:Sm³⁺ 박막의 적색 발광의 세기는 열처리 온도를 변화시킴으로써 제어할 수 있음을 제시한다.

ORCID

Shinho Cho

<https://orcid.org/0000-0002-2849-188X>

REFERENCES

- [1] M. El Jouad, El M. Bouabdalli, S. Touhtouh, M. Addou, N. Ollier, and B. Sahraoui, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, **91**, 10501 (2020). doi: <https://doi.org/10.1051/epjap/2020200133>
- [2] K. Binnemans, *Coord. Chem. Rev.*, **295**, 1 (2015). doi: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2015.02.015>
- [3] L. Y. Zhou, J. S. Wei, F. Z. Gong, J. L. Huang, and L. H. Yi, *J. Solid State Chem.*, **181**, 1337 (2008). doi: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2008.03.005>
- [4] Y. Tian, Y. Liu, R. Hua, L. Na, and B. Chen, *Mater. Res. Bull.*, **47**, 59 (2012). doi: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2011.10.007>
- [5] C. M. Dodson and R. Zia, *Phys. Rev. B*, **86**, 125102 (2012). doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.125102>
- [6] N. M. Ahmed, F. A. Sabah, H. I. Abdulgafour, A. Alsadig, A. Sulieman, and M. Alkhoaryef, *Results Phys.*, **13**, 102159 (2019). doi: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102159>
- [7] C. Wang, *J. Mod. Opt.*, **68**, 771 (2021). doi: <https://doi.org/10.1080/09500340.2021.1946183>
- [8] Y. Liu, J. Liu, Y. Li, D. Wang, L. Ren, and K. Zou, *Opt. Mater. Express*, **6**, 1552 (2016). doi: <https://doi.org/10.1364/OME.6.001552>
- [9] P. Kumar and G. K. Rao, *Mater. Res. Express*, **7**, 016428 (2020). doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6932>
- [10] D. Negi, R. Shyam, and S. R. Nelammarri, *Mater. Lett.*, **11**, 100088 (2021). doi: <https://doi.org/10.1016/j.mlblux.2021.100088>
- [11] P. R. Jubu, O. S. Obaseki, A. Nathan-Abutu, F. K. Yam, Y. Yusof, and M. B. Ochang, *Results Opt.*, **9**, 100273 (2022). doi: <https://doi.org/10.1016/j.rio.2022.100273>
- [12] X. Gu, R. Fu, W. Jiang, P. Zhang, Y. Tang, and A. Coşgun, *J. Rare Earths*, **33**, 954 (2015). doi: [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(14\)60511-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60511-1)
- [13] O. Ravi, C. M. Reddy, L. Manoj, and B.D.P. Raju, *J. Mol. Struct.*, **1029**, 53 (2012). doi: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2012.06.059>
- [14] Z. W. Zhang, X. H. Shen, Y. J. Ren, W. L. Hou, W. G. Zhang, and D. J. Wang, *Opt. Laser Technol.*, **56**, 348 (2014). doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.09.006>
- [15] S. Cho, *J. Korean Phys. Soc.*, **76**, 745 (2020). doi: <https://doi.org/10.3938/jkps.76.745>
- [16] C. P. Reddy, V. Naresh, B. C. Babu, and S. Buddhudu, *Adv. Mater. Phys. Chem.*, **4**, 165 (2014). doi: <https://doi.org/10.4236/ampc.2014.49019>
- [17] Z. Yang, Y. Han, Y. Song, Y. Zhao, and P. Liu, *J. Rare Earths*, **30**, 1199 (2012). doi: [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(12\)60205-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(12)60205-1)
- [18] S. Zhou, D. Lin, Y. Su, L. Zhang, and W. Liu, *J. Adv. Ceram.*, **10**, 98 (2021). doi: <https://doi.org/10.1007/s40145-020-0423-4>
- [19] Q. Xu, D. Xu, and J. Sun, *Opt. Mater.*, **42**, 210 (2015). doi: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2014.12.035>