

Sc₂O₃:Eu 及 ScOOH:Eu 粉体的可控制备及发光性能研究

刘杰,付虎辉,谢文峰,张琪,李霄,刘敏*

(上海应用技术大学材料科学与工程学院,上海 201418)

摘要:通过添加表面活性剂 PEG-1000 并优化 NaAc 的用量及反应温度,以水热法制备了 γ -ScOOH:5% Eu、 γ -ScOOH+ α -ScOOH:5% Eu、 α -ScOOH:5% Eu 及 Sc₂O₃:5% Eu 片状、棒状和花状形貌粉体。结果表明,在 254 nm 的光激发下,所有样品发射出了 615 nm 的红光,其中,Sc₂O₃:Eu 粉体具有最强的红光发射,这是因为 ScOOH 中有较多的羟基,其声子能量高(约 1 550 cm⁻¹),导致更多的光子能量损失,从而导致发光减弱;同时,高温煅烧提高了 Sc₂O₃:Eu 的结晶性,进一步增强了发光。

关键词: ScOOH; 水热法; 发光; Sc₂O₃; 粉体

中图分类号: TQ133.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)11-0142-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.11.026

Controllable synthesis and luminescent properties of Sc₂O₃:Eu and ScOOH:Eu powders

LIU Jie, FU Hu-hui, XIE Wen-feng, ZHANG Qi, LI Xiao, LIU Min*

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: Through incorporating PEG-1000 surfactant, and optimizing NaAc dosage and reaction temperature, γ -ScOOH:5% Eu, γ -ScOOH+ α -ScOOH:5% Eu, α -ScOOH:5% Eu, and Sc₂O₃:5% Eu powders with plate-like, rod-like, and flower-like morphologies are successfully synthesized via a hydrothermal method. The results indicate that under 254 nm light excitation, all samples emit red light at 615 nm. Among them, Sc₂O₃:Eu powder exhibits the strongest red emission, which is attributed to the higher hydroxyl content in ScOOH, which leads to greater phonon energy (approximately 1 550 cm⁻¹), resulting in increased photon energy loss and consequently weaker luminescence. Additionally, high-temperature calcination improves the crystallinity of Sc₂O₃:Eu, further enhancing its luminescent property.

Key words: ScOOH; hydrothermal method; luminescence; Sc₂O₃; powder

钪(Sc)和钇(Y)及镧系同属于稀土元素族,在元素周期表中位于碱土金属和过渡金属交汇处,赋予了钪及其化合物优异的物理和化学性能。如在 Al^[1]、Mg^[2] 和 Ti^[3] 基的合金中,Sc 通常被用来改善合金的电子和机械性能。最近的研究表明,立方相 ScF₃ 在 10~1100 K 范围具有较大的负热膨胀系数^[4]。此外,Sc₂O₃ 具有高折射率、高带隙(5.7 eV)和高熔点(2753 K)等优点,因而被广泛用于反射镜、屏蔽、保护层和偏振器^[5]、石榴石激光器中的掺杂剂^[6]、高功率脉冲紫外激光的基质材料、高导电性 ZrO₂ 基固体电解质的稳定剂^[7]、Si₃N₄ 陶瓷的烧结助剂^[8] 以及高分辨率高亮度阴极射线管等^[9]。

Y₂O₃:Eu 具有强烈的紫外和阴极射线激发发光

能力,被广泛用作低压荧光灯、阴极射线管和等离子体显示面板的红色荧光粉^[10-15]。然而,其红光质量不高限制了 Y₂O₃:Eu 荧光粉的商业应用。而 Sc₂O₃ 和 Y₂O₃ 具有类似的晶体结构和电子结构,都在固态激光器等光电子领域得到广泛应用^[16-17]。他们同属立方晶系,Sc₂O₃ 的晶胞参数($a=9.836$ Å)比 Y₂O₃($a=10.601$ Å)略小。不同于 Y₂O₃:Eu 中的 Eu 原子晶格占位(24c 位),Sc₂O₃:Eu 中 Eu 原子在晶格中占据 16d 位,意味着 Sc₂O₃:Eu 的 Eu 原子处于更强的晶体场分裂中,有更高的发光效率。此外,纳米材料的发光性能与其形貌、颗粒尺寸以及晶面取向密切相关^[18-20],然而,Sc₂O₃ 及 ScOOH 粉体的晶相和形貌调控鲜见报道。

收稿日期:2024-02-16;修回日期:2024-09-18

基金项目:国家自然科学基金(22101180);国家重点研发计划(2016YFA0400904)

作者简介:刘杰(1999-),男,硕士生,研究方向为稀土掺杂上转换发光纳米材料,prodigal9524@163.com;刘敏(1981-),女,博士,副教授,研究方向为稀土掺杂上转换发光纳米材料,通讯联系人,liumin1106@ustc.edu.cn。

因此,笔者采用水热法成功制备了 $\text{ScOOH}:\text{Eu}$ 和 $\text{Sc}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ 粉体。通过添加表面活性剂 PEG-1000、优化 NaAc 的用量及反应温度制备了 $\gamma\text{-ScOOH}:\text{5\% Eu}$ 、 $\gamma\text{-ScOOH}+\alpha\text{-ScOOH}:\text{5\% Eu}$ 、 $\alpha\text{-ScOOH}:\text{5\% Eu}$ 及 $\text{Sc}_2\text{O}_3:\text{5\% Eu}$ 片状、棒状和花状形貌粉体。并对其结晶性进行了研究。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

硝酸钪($\text{Sc}(\text{NO}_3)_3$)、三水合醋酸钠($\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$)、六亚甲基四胺($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$)、聚乙二醇 1000(PEG-1000)、去离子水(H_2O)、无水乙醇($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$),所有试剂均为分析纯。

利用热重分析仪(STA499C,德国 Netzsch 公司)测定样品的热稳定性;利用日本 RIGAKU 公司生产的 DMAX2500 粉末衍射仪($\text{Cu K}\alpha$, $\lambda=0.154\text{ nm}$,扫描范围 $10\sim 70^\circ$,扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$)测定样品的纯度;利用日本 JEOL 公司生产的 JSM-6700F 型扫描电镜(SEM)表征样品的尺寸大小和形貌;利用日本 JEOL 公司生产的 JEM-2010 透射电镜(TEM)表征样品的尺寸大小、厚度和形貌;利用英国 Edinburgh 公司生产的 FLS1000 型稳态/瞬态荧光光谱仪表征样品的发光性能。

1.2 实验流程

首先称取 2 mmol $\text{Sc}(\text{NO}_3)_3$ 和 3 mmol NaAc,加入 25 mL 去离子水,搅拌溶解得到澄清溶液。然后加入 0.5 g 表面活性剂聚乙二醇(PEG-1000)和 1.0 g 沉淀剂六亚甲基四胺($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$),继续搅拌 30 min,混合均匀后,将混合溶液转移到 50 mL 反应釜中,在 $100\sim 200^\circ\text{C}$ 下恒温反应 12 h。反应完成后,用去离子水和乙醇洗涤产物几次,最后在 50°C 的烘箱内干燥 12 h,研磨得到中间产物 $\alpha/\gamma\text{-ScOOH}$ 。进一步将样品在 600°C 下煅烧 3 h,得到 Sc_2O_3 粉体。

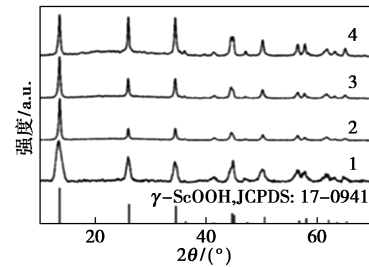
2 结果与分析

2.1 中间产物 ScOOH 的制备

2.1.1 NaAc 添加量和 PEG-1000 的影响

加入 0.5 g PEG-1000 和 0、3、5、10 mmol NaAc 在 100°C 下反应 12 h 制备的中间产物的 XRD 图谱如图 1 所示。从图 1 中可以看出,NaAc 的添加量对中间产物物相没有影响。其衍射峰均与标准 PDF 卡片 JCPDS 17-0941 一致,表明中间产物为 $\gamma\text{-ScOOH}$ 。当 2θ 为 13.6° 、 26.1° 和 34.5° 时,其分别对应于 $\gamma\text{-ScOOH}$ 样品(020)、(120)和(031)晶面的

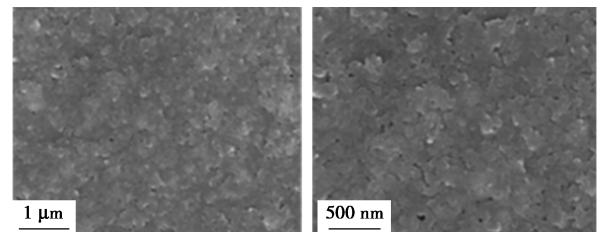
衍射。随着 NaAc 添加量的增加,衍射峰变强,半峰宽变窄,显示 NaAc 的添加对 $\gamma\text{-ScOOH}$ 结晶有利。



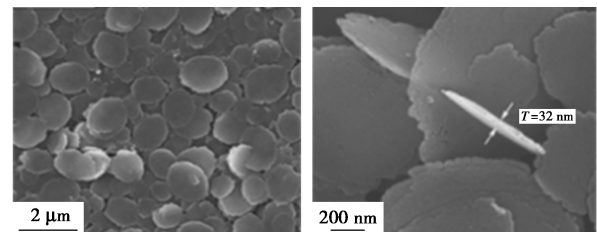
1—0 mmol NaAc; 2—3 mmol NaAc; 3—5 mmol NaAc;
4—10 mmol NaAc

图 1 加入 PEG-1000 及不同 NaAc 量反应制备的 ScOOH 样品的 XRD 图谱

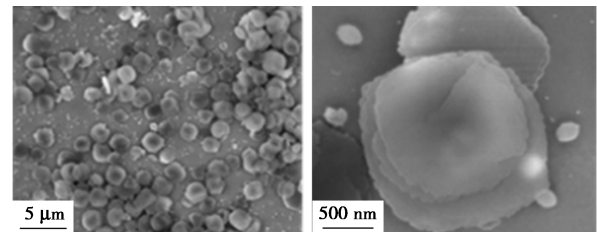
样品的 SEM 图如图 2 所示。从图 2 中可以看



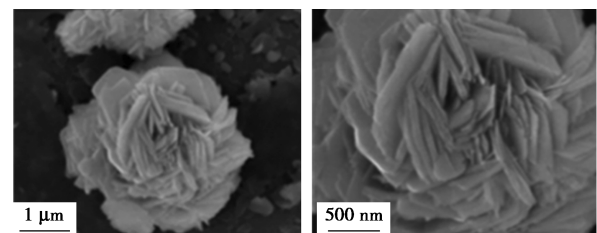
(a) 0 mmol NaAc



(b) 3 mmol NaAc



(c) 5 mmol NaAc



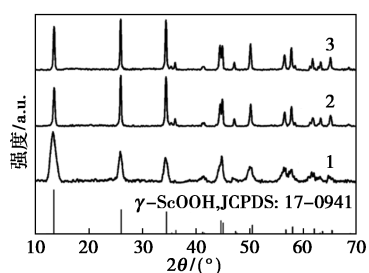
(d) 10 mmol NaAc

图 2 加入 PEG-1000 以及不同 NaAc 量反应制备的 ScOOH 样品的 SEM 图

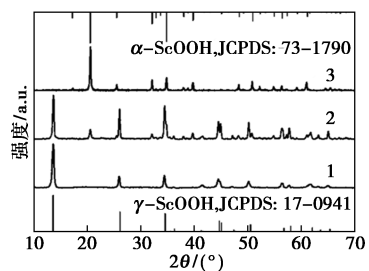
出,当不添加 NaAc 时,样品没有展现规整的形貌,晶粒发育不完善,这与图 1 的 XRD 表征结果一致;当 NaAc 添加量为 3 mmol 时,样品为典型的圆片状,颗粒厚度约 32 nm,直径为 1~2 μm;进一步增加 NaAc 添加量为 5 mmol,样品为片状颗粒堆叠成的圆台状,颗粒的大小变化不大;当 NaAc 添加量达 10 mmol 时,样品形貌为片状颗粒组装成的花状结构,其直径约 3.8 μm。

2.1.2 反应温度的影响

未加 NaAc 和 PEG-1000 时中间产物的 XRD 图谱如图 3(a) 所示。从图 3(a) 中可以看出,当水热反应温度为 100、150℃ 和 200℃ 时,中间产物的衍射峰均与标准 PDF 卡片 JCPDS 17-0941 一致,表明中间产物为 γ -ScOOH。随着水热反应温度的提高,衍射峰变得狭窄尖锐,说明产物结晶性变好。加入 0.5 g PEG-1000 和 3 mmol NaAc 的中间产物的 XRD 图谱如图 3(b) 所示。从图 3(b) 中可以看出,当水热反应温度为 100℃ 时, γ -ScOOH 中间产物成功制备。与未加入 NaAc 和 PEG-1000 的样品比,其峰更狭窄尖锐,说明样品结晶性更好。当反应温度增加到 150℃,产物为 α -ScOOH 和 γ -ScOOH 的混合相(JCPDS 17-0941, JCPDS 73-1790)。进一步增加温度到 200℃,中间产物完全由 γ -ScOOH 相转变为 α -ScOOH 相(JCPDS 73-1790)。



1— γ , 100℃; 2— γ , 150℃; 3— γ , 200℃
(a) 未加入 NaAc 和 PEG-1000

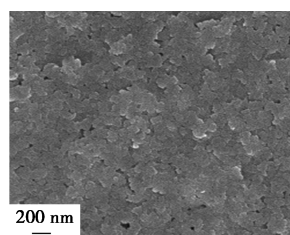


1— γ , 100℃; 2— α + γ , 150℃; 3— α , 200℃
(b) 加入 0.5 g PEG-1000 和 3 mmol NaAc

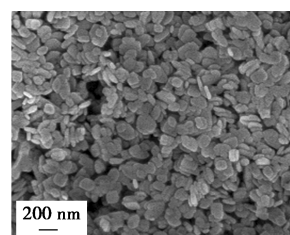
图 3 不同反应温度下制备样品的 XRD 图谱

未加入 CH_3COONa 和 PEG-1000 及加入 3 mmol

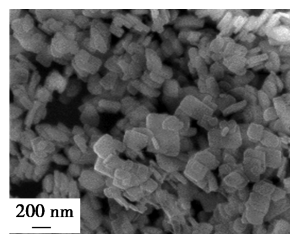
NaAc 和 0.5 g PEG-1000 制备的 ScOOH 的 SEM 图如图 4 所示。从图 4(a)、图 4(b) 和图 4(c) 中可以看出,100℃ 下制备的样品结晶性较差,样品分散不均一,形貌为片状颗粒;反应温度增加至 150℃ 时,样品为清晰的片状纳米颗粒,大小均匀,约为 100 nm,结晶性相比 100℃ 有明显改善;反应温度增加至 200℃,颗粒仍为片状,尺寸分布不均匀。从图 3(b) 和图 4(b)、图 4(e) 和图 4(h)、图 4(i) 中可以看出,随着 CH_3COONa 和 PEG-1000 的加入,颗粒物相和形貌均有明显变化。从图 4(d) 和图 4(g) 中可以看出, γ -ScOOH 为均匀分散的微米片,其大小约 1 μm。HRTEM 图片显示其晶面间距为 0.34 nm,对应 γ -ScOOH 的(120)晶面。从图 4(e) 和图 4(f) 中可以看出,当水热反应温度增加至 150℃,产物转变为 α -ScOOH 和 γ -ScOOH 的混合晶相,形貌也随之转变为片状和棒状的混合,这和 α -ScOOH 和 γ -ScOOH 的晶体结构有关。进一步增加水热温度至 200℃,中间产物转变为 α -ScOOH 纯相,图 4(f) 显示样品为均一的棒状形貌,棒状末端的 HRTEM 图 4(i) 显示其晶面间距为 0.35 nm,对应 α -ScOOH 的(120)晶面。当不添加 NaAc、反应温度为 100~200℃ 时,中间产物均为 γ -ScOOH 相,随着反应温度的升高,片状形貌变得规整,颗粒长大,结晶性变好。表明不添加 NaAc 时,温度不改变中间产物的晶相和形貌,只影响颗粒大小和结晶性。当加入 PEG-1000 和不同量 NaAc 时,反应温度的增加导致 γ -ScOOH \rightarrow γ -ScOOH + α -ScOOH \rightarrow α -ScOOH 的物



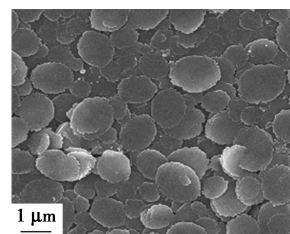
(a) 未加入 CH_3COONa 和 PEG-1000 制备的 ScOOH 在 100℃ 下的 SEM 图片



(b) 未加入 CH_3COONa 和 PEG-1000 制备的 ScOOH 在 150℃ 下的 SEM 图片



(c) 未加入 CH_3COONa 和 PEG-1000 制备的 ScOOH 在 200℃ 下的 SEM 图片



(d) 加入 3 mmol NaAc 和 0.5 g PEG-1000 制备的 ScOOH 在 100℃ 下的 SEM 图片

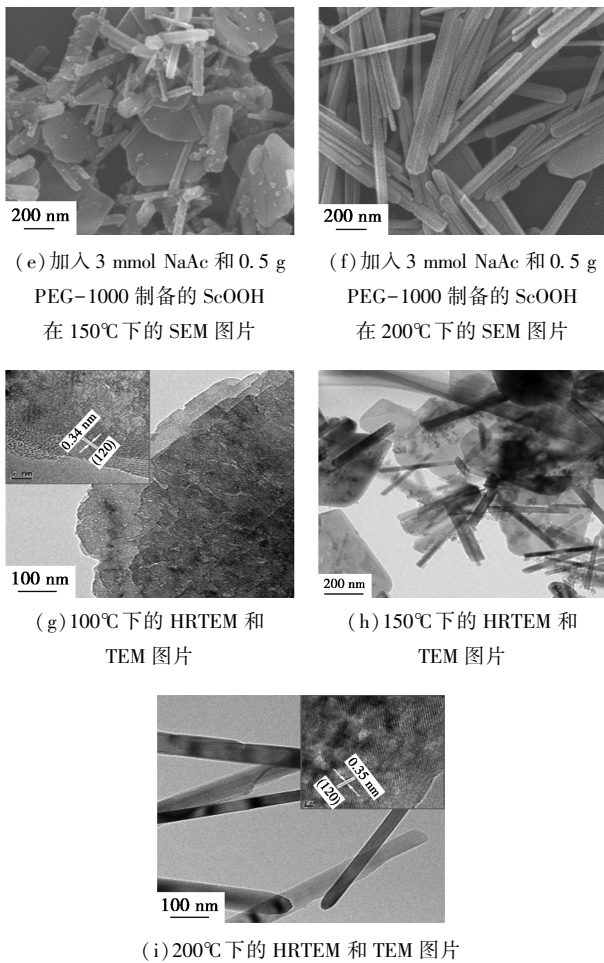


图4 未加入 CH_3COONa 和 PEG-1000 及加入 3 mmol NaAc 和 0.5 g PEG-1000 制备的 ScOOH 的 SEM 图

相转变,颗粒形貌也从片状转变为棒状,这与 α -ScOOH 和 γ -ScOOH 的晶体结构有关。PEG-1000 作为表面活性剂选择性吸附在样品的某一个晶面,从而促进物相和形貌的改变。

2.2 微米级 Sc_2O_3 样品的制备

高温煅烧 ScOOH 制备 Sc_2O_3 的流程:将制备的中间产物 γ/α -ScOOH 用管式炉在惰性气体的氛围中进行煅烧即可制备得到最终产物立方相 Sc_2O_3 样品,煅烧温度为 600°C ,反应时间为 3 h。

在利用 Netzsch STA449C 型仪器进行 TG-DTA 分析过程中,样品在氮气气氛中以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率从 30°C 上升到 900°C ,中间产物 ScOOH 的 TG-DTA 曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看到, γ -ScOOH 样品、 γ -ScOOH 和 α -ScOOH 的混合晶相样品、 α -ScOOH 样品和 α -ScOOH:5% Eu 样品在 450°C 以下分别失重 12.6%、11.8%、11.5% 和 12.3%,对应于 α/γ -ScOOH 到 Sc_2O_3 的转变,与之

对应的 DTA 曲线显示均分别存在 407°C 、 384°C 、 413°C 和 409°C 的唯一尖锐的吸热峰。

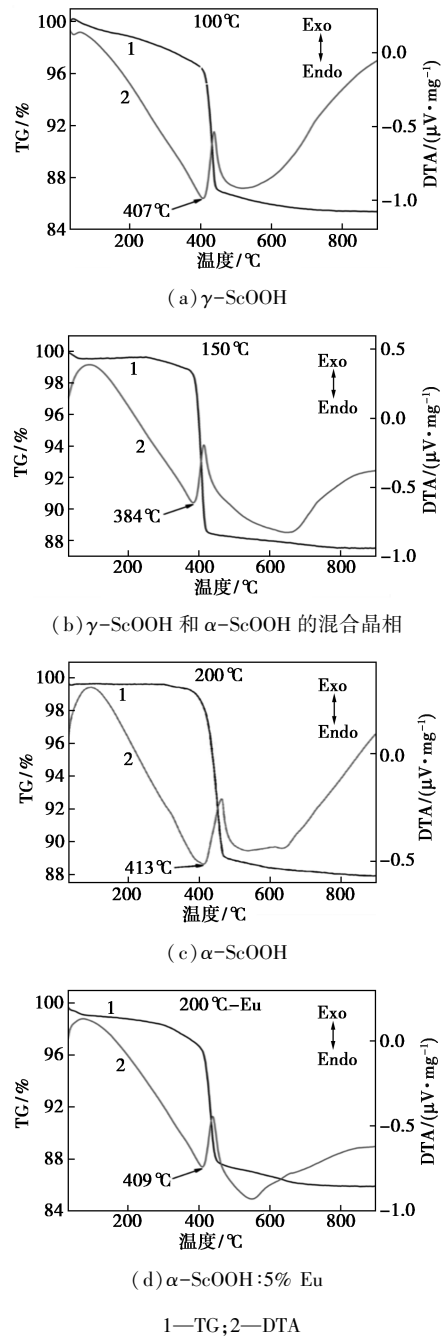
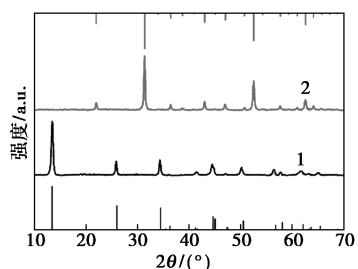


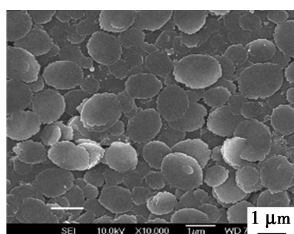
图5 中间产物 ScOOH 的 TG-DTA 曲线

为了获得 Sc_2O_3 粉体,将 ScOOH-3-100 和 ScOOH-3-200 样品在 600°C 下煅烧,其煅烧前后的 XRD 图和 SEM 图如图 6 所示。从图 6 中可以看出, XRD 图谱显示的 2 个样品煅烧后均获得了 Sc_2O_3 纯相(JCPDS 84-1880)。煅烧前后的样品形貌无明显变化,保持了 ScOOH-3-100 和 ScOOH-3-200 的片状和棒状形貌,颗粒大小变化不大,分散性良好,在高温的热驱动下,煅烧后样品的结晶性变好。

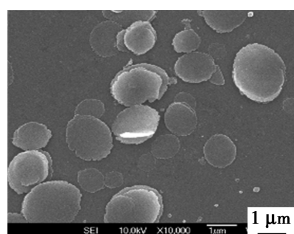


1—煅烧前 γ -ScOOH; 2—煅烧后 Sc_2O_3

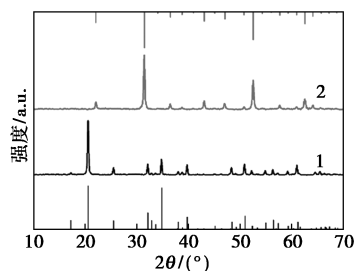
(a) ScOOH-3-100 在 600℃ 下的 XRD 图谱



(b) ScOOH-3-100 在 600℃ 下煅烧前的 SEM 图片

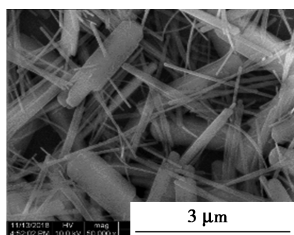


(c) ScOOH-3-100 在 600℃ 下煅烧后的 SEM 图片

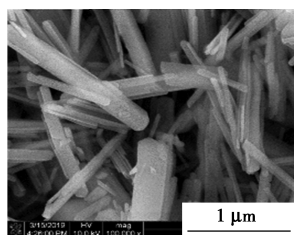


1—煅烧前 α -ScOOH; 2—煅烧后 Sc_2O_3

(d) ScOOH-3-200 在 600℃ 下的 XRD 图谱



(e) ScOOH-3-200 在 600℃ 下煅烧前的 SEM 图片

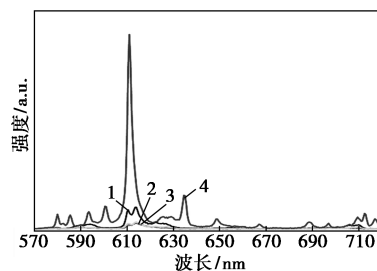


(f) ScOOH-3-200 在 600℃ 下煅烧后的 SEM 图片

图 6 ScOOH-3-100 和 ScOOH-3-200 在 600℃ 下煅烧前后的物相及微观结构变化图

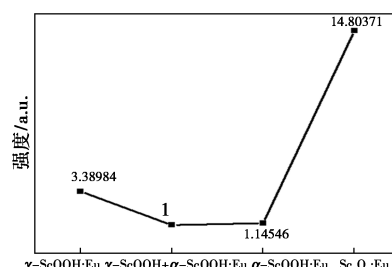
γ -ScOOH : 5% Eu、 γ -ScOOH + α -ScOOH : 5% Eu、 α -ScOOH : 5% Eu 及 Sc_2O_3 : 5% Eu 的发光图谱及红光发射强度因子变化曲线如图 7 所示。从图 7 (a) 中可以看出, 在 254 nm 的光激发下, 所有样品在 615 nm 处有最强的红光发射峰, 对应于 Eu^{3+} 的 $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ 磁偶极跃迁。 γ -ScOOH : 5% Eu、 γ -ScOOH + α -ScOOH : 5% Eu、 α -ScOOH : 5% Eu 及 Sc_2O_3 : 5% Eu 的发光强度依次增强。为了对样品的发光强度进行定量比较, 对 γ -ScOOH : 5% Eu 的红光发射进

行归一化处理(即 γ -ScOOH : 5% Eu 的红光发射强度为 1)。从图 7(b) 中可以看出, 归一化处理后, γ -ScOOH : 5% Eu、 γ -ScOOH + α -ScOOH : 5% Eu、 α -ScOOH : 5% Eu 及 Sc_2O_3 : 5% Eu 的红光发射强度分别为 3.4、1、1.1 和 14.8。与 3 个 ScOOH : 5% Eu 样品比, Sc_2O_3 : 5% Eu 显示了明显的发光增强。这是因为 ScOOH 中有较多的羟基, 其声子能量高(约 1550 cm^{-1}), 易导致更多的光子能量损失, 从而导致发光减弱。同时, 高温煅烧提高了 Sc_2O_3 : Eu 的结晶性, 进一步增强了发光。



1— γ -ScOOH : 5% Eu; 2— γ -ScOOH + α -ScOOH : 5% Eu; 3— α -ScOOH : 5% Eu; 4— Sc_2O_3 : 5% Eu

(a) 发射光谱



(b) 红光发射强度因子变化曲线

图 7 γ -ScOOH : 5% Eu、 γ -ScOOH + α -ScOOH : 5% Eu、 α -ScOOH : 5% Eu 和 Sc_2O_3 : 5% Eu 的发射光谱及其发光强度因子对比

3 总结

采用水热法成功制备了 ScOOH : Eu 中间产物及 Sc_2O_3 : Eu 粉体。通过添加表面活性剂 PEG-1000、优化 NaAc 的用量及反应温度制备了不同晶相组成及形貌的 ScOOH : Eu 和微米级 Sc_2O_3 : Eu, 并对其下转换发光性能进行了表征。结果表明, 当不添加 PEG-1000 和 NaAc、反应温度为 100 ~ 200℃ 时, 中间产物均为 γ -ScOOH 相, 随着反应温度的升高, 片状形貌变得规整同时伴随着颗粒长大、结晶性变好。表明不添加 EG-1000 和 NaAc 时, 反应温度对其颗粒大小和结晶性影响较大; 当加入 PEG-1000 和不同量 NaAc 时, 反应温度的增加导致

ScOOH 的物相转变, 颗粒形貌也从片状逐渐转变为棒状; 进一步地, 将 ScOOH 中间产物进行煅烧, 得到立方相 Sc_2O_3 产物, 其形貌在煅烧前后不发生改变; 在 254 nm 的光激发下, 所有样品都在 615 nm 处展示了最强的红光发射峰, 对应于 Eu^{3+} 的 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ 磁偶极跃迁。 $\text{Sc}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ 的红光发射强度为 $\gamma\text{-ScOOH}:\text{Eu}$ 的 14.8 倍, 这是因为 ScOOH 中有较多声子能量高 (约 $1\ 550\ \text{cm}^{-1}$) 的羟基, 更多的光子能量损失导致了发光减弱, 同时, 高温煅烧提高了 $\text{Sc}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ 的结晶性, 进一步增强了发光。

参考文献

- [1] Marquis E A, Seidman D N. Coarsening kinetics of nanoscale Al_3Sc precipitates in an Al-Mg-Sc alloy [J]. *Acta Materialia*, 2005, 53 (15): 4259–4268.
- [2] von Buch F, Lietzau J, Mordike B L, *et al.* Development of Mg-Sc-Mn alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, 263 (1): 1–7.
- [3] Sehrioglu A, Sayir A, Dynys F. Microstructure-property relationships in liquid phase-sintered high-temperature bismuth scandium oxide-lead titanate piezoceramics [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, 91(9): 2910–2916.
- [4] Hu L, Chen J, Sanson A, *et al.* New insights into the negative thermal expansion: Direct experimental evidence for the “Guitar-String” effect in cubic ScF_3 [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, 138(27): 8320–8323.
- [5] Grosso D, Sermon P A. Scandium oxide nanoparticles produced from sol-gel chemistry [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2000, 10(2): 359–363.
- [6] Gruber J B, Hills M E, Seltzer M D, *et al.* Analysis of the optical spectra of trivalent holmium in yttrium scandium gallium garnet [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 72(11): 5253–5264.
- [7] Badwal S P S, Ciacchi F T, Milosevic D. Scandia-zirconia electrolytes for intermediate temperature solid oxide fuel cell operation [J]. *Solid State Ionics*, 2000, 136/137: 91–99.
- [8] Cheong D S, Sanders W A. High-temperature deformation and microstructural analysis for silicon nitride-scandium (III) oxide [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1992, 75(12): 3331–3336.
- [9] Uda E, Nakamura O, Matsumoto S, *et al.* Emission and life characteristics of thin film top-layer scandate cathode and diffusion of Sc_2O_3 and W [J]. *Applied Surface Science*, 1999, 146(1): 31–38.
- [10] Rao R P. Preparation and characterization of fine-grain yttrium-based phosphors by sol-gel process [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1996, 143(1): 189–197.
- [11] Chen X, Liu N, Mei G, *et al.* Recycling Y and Eu from waste fluorescent powder and high temperature solid-state synthesis of $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ phosphors [J]. *Minerals*, 2017, 7(3): 44–49.
- [12] Chi L S, Liu R S, Lee B J. Synthesis of $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}$, Bi red phosphors by homogeneous coprecipitation and their photoluminescence behaviors [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2005, 152(8): 93–98.
- [13] Joffin N, Caillier B, Dexpert-Ghys J, *et al.* Elaboration by spray pyrolysis and characterization in the VUV range of phosphor particles with spherical shape and micronic size [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, 38(17): 3261–3268.
- [14] Rao R P. Growth and characterization of $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ phosphor films by sol-gel process [J]. *Solid State Communications*, 1996, 99(6): 439–443.
- [15] Vlasenko A B, Dorokhina A M, Bakhmetyev V V, *et al.* Hydrothermal synthesis and characterization of nano-sized phosphors based on rare-earth activated yttrium compounds for photodynamic therapy [J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2023, 108(2): 274–291.
- [16] Brenier A, Boulon G. New criteria to choose the best Yb^{3+} -doped laser crystals [J]. *Europhysics Letters*, 2001, 55(5): 647–652.
- [17] Ronda C R. Recent achievements in research on phosphors for lamps and displays [J]. *Journal of Luminescence*, 1997, 72/74: 49–54.
- [18] 尹志民, 潘清, 姜峰. 铈和含铈合金 [M]. 湖南: 中南大学出版社, 2007: 1–60.
- [19] 李凤生. 超细粉体技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 5–100.
- [20] Tissue B M. Synthesis and luminescence of lanthanide ions in nanoscale insulating hosts [J]. *Chemistry of Materials*, 1998, 10(10): 2837–2845. ■
- [14] Li L, Fu L, Li M, *et al.* B-doped and $\text{La}_4\text{NiLiO}_8$ -coated Ni-rich cathode with enhanced structural and interfacial stability for lithium-ion batteries [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2022, 71: 588–594.
- [15] Tan L, Wu Q, Liu Z, *et al.* Ti-substituted O3-type layered oxide cathode material with high-voltage stability for sodium-ion batteries [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 622: 1037–1044.
- [16] Chen S, Zhang X, Xia M, *et al.* Issues and challenges of layered lithium nickel cobalt manganese oxides for lithium-ion batteries [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2021, 895: 115412.
- [17] Ding F, Zhao C, Zhou D, *et al.* A novel Ni-rich O3- $\text{Na}[\text{Ni}_{0.60}\text{Fe}_{0.25}\text{Mn}_{0.15}]\text{O}_2$ cathode for Na-ion batteries [J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 30: 420–430.
- [18] 付芳. 钠离子电池层状正极材料 $\text{Na}_{0.67}\text{Mn}_{0.67}\text{Ni}_{0.13}\text{Fe}_{0.13}\text{O}_2$ 的制备及性能研究 [J]. *广东化工*, 2022, 49(12): 1–4.
- [19] Lee M H, Kang Y J, Sun Y K, *et al.* Synthetic optimization of $[\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}]\text{O}_2$ via co-precipitation [J]. *Electrochimica Acta*, 2004, 50(4): 939–948.
- [20] 王接喜, 李新海, 王志兴, 等. 快速共沉淀过程 pH 值对 $\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}(\text{OH})_2$ 及 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 性能的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(9): 2175–2181. ■

(上接第 141 页)