



Lu₂Si₂O₇ : Ce纳米晶的溶胶-凝胶法合成和闪烁性能

李乾利, 胡亚华, 马玉彬, 黄世明, 顾牡, 张志军, 赵景泰

引用本文:

李乾利, 胡亚华, 马玉彬, 等. Lu₂Si₂O₇ : Ce纳米晶的溶胶-凝胶法合成和闪烁性能[J]. *发光学报*, 2020, 41(4): 364–370.

LI Qian-li, HU Ya-hua, MA Yu-bin, et al. Sol-gel Synthesis and Scintillation Properties of Lu₂Si₂O₇ : Ce Nanocrystalline[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(4): 364–370.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/fgxb20204104.0364>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

稀土离子(Eu³⁺, Tb³⁺, Ce³⁺)掺杂ZnAl₂O₄/SiO₂微晶玻璃的制备与发光性能

Preparation and Luminescence Properties of ZnAl₂O₄/SiO₂ : RE³⁺ (RE =Eu, Tb, Ce) Glass Ceramics by Sol-gel Method

发光学报. 2015, 36(4): 400–407 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153604.0400>

Ce³⁺/Eu²⁺共掺Ca₃Si₂O₄N₂荧光粉的光学特性

Photoluminescence Properties of Ce³⁺/Eu²⁺+Co-doped Ca₃Si₂O₄N₂ Phosphors

发光学报. 2013, 34(10): 1324–1327 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133410.1324>

Ln₂Sn₂O₇ : Er³⁺纳米晶的制备及发光性能研究

Preparation and Up-conversion Emissions of Er³⁺ + Doped Ln₂Sn₂O₇ Nanocrystals

发光学报. 2013, 34(11): 1451–1456 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133411.1451>

溶胶-凝胶法合成Sr₃MgSi₂O₈:Eu³⁺ 红色荧光粉及其发光性能

Synthesis of Sr₃ MgSi₂ O₈:Eu³⁺ Red Phosphor by Sol-gel Method and Its Luminescence Properties

发光学报. 2019, 40(5): 595–601 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194005.0595>

溶胶-凝胶法制备YAG:Ce,Yb纳米荧光粉及其发光性质研究

YAG:Ce,Yb Nano-phosphor Synthesized by Sol-gel Method and Its Luminescence Properties

发光学报. 2018, 39(8): 1051–1058 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183908.1051>

文章编号: 1000-7032(2020)04-0364-07

Lu₂Si₂O₇:Ce 纳米晶的溶胶-凝胶法合成和闪烁性能

李乾利¹, 胡亚华^{2*}, 马玉彬², 黄世明³, 顾 牡³, 张志军¹, 赵景泰¹

(1. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444;

2. 嘉兴学院南湖学院, 浙江 嘉兴 314001; 3. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 采用溶胶-凝胶法制备了 Lu₂Si₂O₇:Ce 纳米晶, 利用 X 射线衍射 (XRD)、扫描电镜 (SEM)、荧光光谱仪、X 射线激发发射谱仪对制备的 Lu₂Si₂O₇:Ce 纳米晶的晶相结构、微观形貌和光学性能进行了表征。结果表明, 溶胶-凝胶法制备的 Lu₂Si₂O₇:Ce 前驱体在煅烧温度为 1 000 °C 时开始晶化, 晶粒尺寸随着煅烧温度的升高而变大, 1 200 °C 煅烧 2 h 后的晶体颗粒均匀, 分散性最优, 平均晶粒尺寸约为 28.9 nm, 呈近球形; Lu₂Si₂O₇:Ce 纳米晶的紫外吸收谱存在峰位分别为 304 nm 和 350 nm 两个吸收峰, 源自于 Ce³⁺ 离子的 4f→5d 跃迁; 光致发射谱和 X 射线激发发射谱都表现为典型的非对称双峰结构, 归属于 Ce³⁺ 离子的 5d¹→²F_{5/2} 和 5d¹→²F_{7/2} 跃迁, Ce³⁺ 离子的最佳掺杂浓度约为 1%; 荧光衰减时间约为 37.2 ns, 可满足高时间分辨 X 射线探测需要。

关键词: 闪烁材料; Lu₂Si₂O₇:Ce 纳米晶; 溶胶-凝胶法; 荧光光谱; X 射线探测

中图分类号: O482.3

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20204104.0364

Sol-gel Synthesis and Scintillation Properties of Lu₂Si₂O₇:Ce Nanocrystalline

LI Qian-li¹, HU Ya-hua^{2*}, MA Yu-bin², HUANG Shi-ming³, GU Mu³, ZHANG Zhi-jun¹, ZHAO Jing-tai¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Jiaxing University Nanhu College, Jiaxing 314001, China;

3. School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

* Corresponding Author, E-mail: yhhu@zjxu.edu.cn

Abstract: Cerium-doped lutetium pyrosilicate Lu₂Si₂O₇:Ce nanocrystalline was synthesized by the sol-gel method. The structure, morphologies and scintillation properties of Lu₂Si₂O₇:Ce nanocrystalline were characterized by X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope (SEM), photoluminescence and X-ray excited luminescence. The results indicate that Lu₂Si₂O₇:Ce starts to crystallize at about 1 000 °C and the crystallite size increases with the increasing calcining temperature. Well dispersed, homogeneous and near-spherical Lu₂Si₂O₇:Ce powder with an average grain size about 28.9 nm was obtained after sintering at 1 200 °C for 2 h. The excitation spectrum consists of two intense broad bands at 304 nm and 350 nm, which are corresponding to the 4f→5d transition of Ce³⁺ ions. The emission peak under 350 nm and X-ray excitation both exhibit a typical asymmetric peak, which are attribute to 5d¹→²F_{5/2} and 5d¹→²F_{7/2} transition of the Ce³⁺ ions. The optimized doping concentration of Ce³⁺ ion is about 1%. The decay time of the as-prepared Lu₂Si₂O₇:Ce phosphor is about 37.2 ns, which can satisfy the requirement of the X-ray detection with high time resolution.

收稿日期: 2020-01-03; 修订日期: 2020-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(11475128, 11675121, 11905122); 嘉兴市科技计划(2017AY13015)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(11475128, 11675121, 11905122); Jiaxing Science and Technology Project(2017AY13015)

Key words: scintillation materials; $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}$ nanocrystalline; sol-gel method; photoluminescence; X-ray detection

1 引言

近年来,X射线探测技术的快速发展对闪烁材料的光学性能都提出了很高的要求,也为闪烁材料的发展提供了广阔的发展空间^[1-4]。铈掺杂的焦硅酸镨($\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}$, LPS: Ce)具有密度高(6.23 g/cm^3)、光输出高($2.63 \times 10^8\text{ lx/MeV}$)、衰减时间快(38 ns)、能量分辨率高(10%)、没有余辉等特点,已经成为备受关注的新型闪烁材料之一^[5-8],它在核医学、安全监测和石油探井等方面有很好的应用前景^[9-12]。

根据不同应用情况的需要,合成的 LPS: Ce 材料包括粉体、晶体和陶瓷等形态^[13-15]。由于单晶的生长成本昂贵、工艺复杂、尺寸受限、 Ce^{3+} 离子掺杂易分布不均等原因,单晶的大规模使用受到一定程度的限制^[16]。多晶透明陶瓷闪烁体可以有效克服上述缺点,已经成为该材料的一个重要发展方向^[17]。粉体作为制备单晶和陶瓷的原料,高纯、超细和均匀的优质前期粉末,不仅有利于单晶的生长和性能的提高,而且也是获得透明陶瓷的关键。目前,合成 LPS: Ce 粉末的方法主要有高温固相反应法^[18-19]和溶胶-凝胶法^[15-16]。高温固相反应法存在反应温度高、粒径大、掺杂不均匀和难以成单一纯相等缺点。溶胶-凝胶法是合成各种纳米粉末颗粒的一种优良方法,它具有合成温度低、掺杂均匀、微结构可控、设备简单、成本低等优点^[20]。Jayaseelan 等首先通过溶胶-凝胶法在 Si_3N_4 基质上合成一层 LPS 陶瓷薄层作为环境障碍涂层^[21]。2011年,Niznansky 等采用溶胶-凝胶法制备的前驱体粉末成功获得 LPS: Ce 透明陶瓷^[22]。在国内,尹明小组讨论了溶胶-凝胶法制备的 Ce^{3+} 、 Tb^{3+} 离子共掺 LPS 纳米粉的能量传递过程^[15]。施鹰小组采用环氧丙烷(PPO)加速 Lu—Si—O 键的形成,降低了溶胶-凝胶法合成 LPS: Ce 的结晶温度为 $1\ 050\text{ }^\circ\text{C}$ ^[16]。然而,对于溶胶-凝胶法合成 LPS: Ce 的制备工艺、形貌特征、掺杂浓度和发光机理等还鲜有报道,有待进一步研究。

本文采用溶胶-凝胶法制备了 LPS: Ce 纳米晶粉体,并对其结晶性、形貌特征和闪烁性能进行了表征,讨论了煅烧温度、掺杂浓度等对 LPS: Ce 纳

米晶性能的影响。

2 实验

实验原料为硝酸镨($\text{Lu}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、硝酸亚铈($\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、正硅酸四乙酯($\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$, TEOS)和无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, EtOH)。硝酸镨购于上海帝阳化工有限公司,其他原料均购于国药集团化学试剂有限公司。所有原料均为分析纯,使用前未做进一步的纯化。

采用溶胶-凝胶法制备 LPS: Ce 纳米晶。首先,将一定化学计量比的硝酸镨和硝酸亚铈溶解到无水乙醇溶剂中,在室温搅拌下形成透明溶液;然后,依次缓慢加入所需比例的正硅酸四乙酯和去离子水;待所配溶液陈化静置 24 h 后,将其搅拌蒸发获得干凝胶前驱体;最后,干凝胶前驱体经过 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 预煅烧和研磨后,再经过 $900 \sim 1\ 300\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温煅烧 2 h 即获得所需的样品粉末。

样品的结晶性能采用辽宁丹东方圆仪器厂生产的 DX-2700 型 X 射线衍射仪(Cu 靶的 $\text{K}\alpha$ 线, $\lambda = 0.154\ 2\text{ nm}$)进行表征;微观形貌表征由荷兰飞利浦公司的 Philips XL30 FEG 型扫描电子显微镜(Scanning electron microscopy, SEM)完成;激发和发射谱使用英国 Perkin Elmer 公司的 LS55 型荧光/磷光/发光分光光度仪测量;光致发光的时间衰减曲线在英国 Edinburgh Instruments 公司的 FL920 型稳态/瞬态荧光光谱仪上获得;X 射线激发发射谱用自行研制的 X 射线激发发射谱仪测得。

3 结果与讨论

3.1 结晶性

图 1 给出了不同退火温度下合成的粉末样品的 XRD 谱。由图 1 可知, $900\text{ }^\circ\text{C}$ 以下的 XRD 谱为弥散的曲线,这说明样品还处于无定形态,尚未开始晶化;当温度升到 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 时,样品的衍射谱上出现了强度比较弱的尖峰,说明该温度下的样品已经开始晶化;随着温度逐渐升高到 $1\ 300\text{ }^\circ\text{C}$,衍射峰越来越尖锐,强度更强,表明样品晶化过程随着温度升高而逐渐加强,晶粒也逐渐长大,结晶性更好。经过比对 XRD 图谱,衍射峰位与 LPS 的国际标准卡片号(JCPDS 35-0326)的结果一致,由

此可确定所制备的样品为 LPS 结晶粉末。

根据所得的 XRD 谱图结果,利用 Sherrer 公式 $D=0.89\lambda/(B\cos\theta)$ 可以计算出 1 000 ~ 1 300 °C 煅烧合成的 LPS: Ce 粉末样品的晶粒尺寸。其中 λ 为 X 射线波长, B 为扣除仪器展宽的衍射峰半高宽, θ 为衍射角度。由于 LPS 在 (021) 晶面有最强的特征峰,以该峰为基础计算晶粒尺寸。表 1 给出了 1 000 ~ 1 300 °C 煅烧后 LPS: Ce 样品的平均晶粒尺寸分别为 12.8, 21.5, 28.9, 32.5 nm。所得结果进一步表明,利用溶胶-凝胶法制备的 LPS: Ce 粉末样品为纳米晶颗粒,晶粒尺寸随着温度升高逐渐变大。

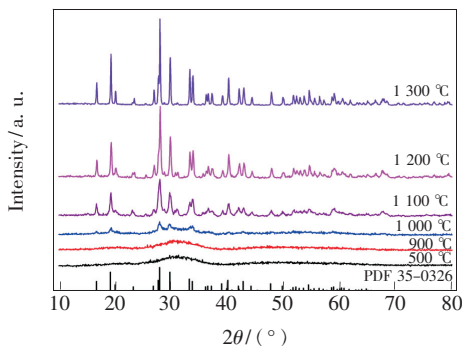


图 1 不同温度煅烧 2 h 得到的 LPS: Ce 粉末样品的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of powders sintered at different temperature for 2 h

表 1 不同温度煅烧 2 h 得到的样品粉末的晶粒尺寸

Tab. 1 Grain sizes of powders sintered at different temperature for 2 h

$T/^\circ\text{C}$	Grain size/nm
1 000	12.8
1 100	21.5
1 200	28.9
1 300	32.5

3.2 形貌分析

为了更加直观地观察不同温度下 LPS: Ce 纳米晶的晶粒尺寸变化,图 2 给出了不同温度煅烧 2 h 后得到的 LPS: Ce 纳米晶的 SEM 照片。由图可知,1 000 °C 时 LPS: Ce 纳米晶的颗粒尺寸明显最小,此时样品粉末刚开始结晶;当温度升高到 1 100 °C 时,LPS: Ce 纳米晶颗粒尺寸明显变大,但颗粒间存在明显的团聚现象,晶粒发育还有待于进一步完善;温度为 1 200 °C 时,LPS: Ce 纳米晶

颗粒进一步变大,呈近球形,大小接近 28.9 nm,此时晶粒比较均匀,分散性也最好;当温度升高到 1 300 °C 时,晶粒尺寸最大,但 LPS: Ce 纳米晶颗粒分散性变差,出现了硬团聚现象。因此,从形貌特征上来说,1 200 °C 煅烧后的 LPS: Ce 纳米晶颗粒均匀性和分散性最好,呈近球形,平均晶粒尺寸大约为 28.9 nm。

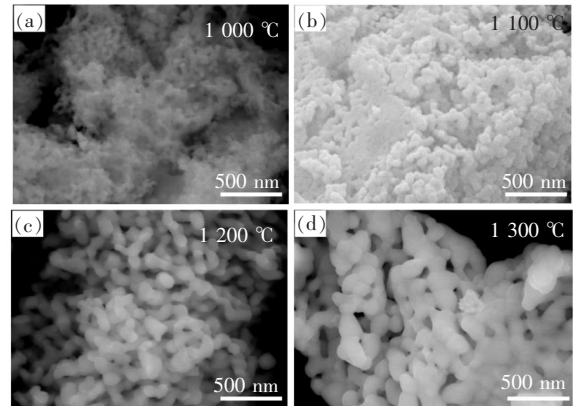


图 2 不同温度煅烧 2 h 后制备的 LPS: Ce 纳米晶的 SEM 图

Fig. 2 SEM images of LPS: Ce nanocrystalline sintered at different temperature for 2 h

3.3 光学性能

煅烧温度会直接影响纳米晶颗粒的结晶性、氧空位以及缺陷等问题,从而影响样品的发光强度^[23-24]。图 3 (a) 给出了 LPS: Ce 纳米晶经过 1 000 ~ 1 300 °C 退火后的激发和发射光谱。由图可知,随着煅烧温度升高,激发和发射峰强度逐渐增加,这是因为煅烧温度升高,LPS: Ce 纳米晶的结晶性变好,激发和发射峰强度也随之增强,这个结果与 XRD 图谱是一致的。如图 3 (b) 所示,积分不同温度下发射光谱强度,可以更直观地看到发射光强度随温度的变化关系。温度从 1 000 °C 开始升高到 1 100 °C 时,发光强度开始慢慢增大。从前面的 XRD 图谱和 SEM 照片可知,此时的样品还处于晶化的初始阶段,结晶还未完全,所以光谱强度增加较慢。当温度从 1 100 °C 变化到 1 200 °C 时,发光强度迅速增加,这说明在该温度范围,样品迅速晶化,达到比较好的结晶状态。当温度达到 1 300 °C 时,光谱强度虽有增强,但增强幅度趋缓,这可能是:一方面,当温度高于 1 200 °C 时,LPS: Ce 纳米晶的晶化已经趋于完全;另一方面,当温度高于 1 000 °C 时,Ce³⁺ 离子在空气气氛下会被氧化成 Ce⁴⁺ 离子,降低了发光效率。综

上所述, 经过 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 高温煅烧 2 h 后的 LPS: Ce 纳米晶既能达到较大的发光强度, 纳米晶颗粒又具有较好的均匀性和分散性, 因而也将更有利于制备致密性和透明性较好的 LPS: Ce 陶瓷材料。

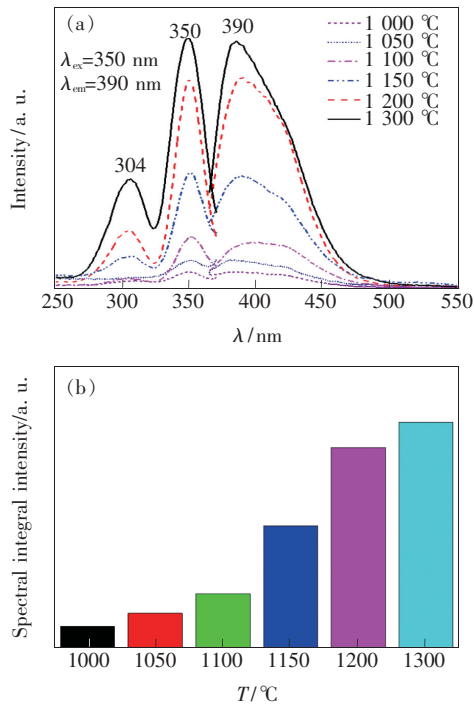


图 3 不同煅烧温度下获得的 LPS: Ce 纳米晶的激发和发射谱 (a) 与发光强度 (b)

Fig. 3 Excitation and emission spectra (a) and spectral intensity (b) of LPS: Ce nanocrystalline calcined at different temperature

为了获得 Ce^{3+} 离子的最佳掺杂浓度, 合成了不同 Ce^{3+} 离子掺杂量的 LPS: Ce 纳米晶粉末。图 4 (a) 为经过 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 煅烧 2 h 后获得的不同 Ce^{3+} 离子掺杂浓度的激发和发射谱。由图可知, 随着 Ce^{3+} 离子掺杂量从 0.5% 提高到 1%, LPS: Ce 纳米晶的激发发射谱强度逐渐增强; 当 Ce^{3+} 掺杂量继续增加至 1.5% 时, LPS: Ce 纳米晶的激发发射谱强度开始减弱, 这是因为 Ce^{3+} 离子浓度增加, 发生了浓度猝灭的缘故。图 4 (b) 是对不同 Ce^{3+} 离子掺杂量下的发射光谱强度进行了积分, 由图 4 (b) 可进一步确认 Ce^{3+} 离子掺杂量的最优浓度约为 1%。

将 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 煅烧 2 h 后获得的 LPS: 1% Ce 纳米晶的紫外激发和发射谱进行分峰拟合, 如图 5 所示。图中的激发谱由峰位分别为 304 nm 和 350 nm 的两个强吸收峰组成, 对应于 Ce^{3+} 离子最外层的 4f 电子从基态跃迁到激发态 5d 态的 $4f \rightarrow 5d$

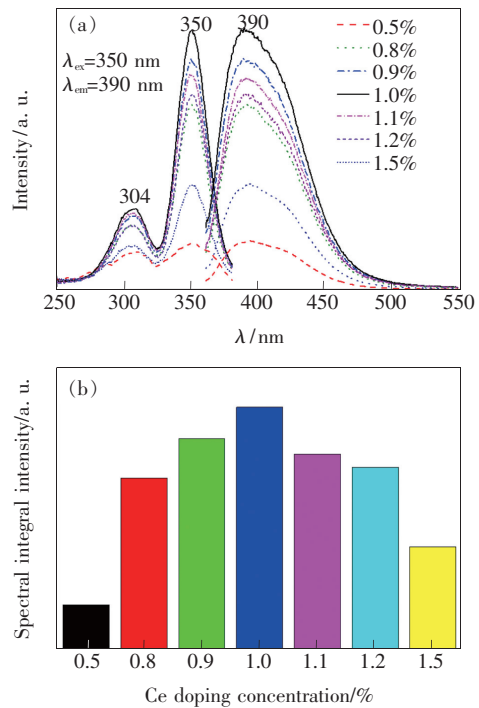


图 4 不同 Ce^{3+} 离子掺杂浓度的 LPS: Ce 纳米晶的激发和发射谱 (a) 与发光强度 (b)

Fig. 4 Excitation and emission spectra (a) and spectral intensity (b) of LPS: Ce nanocrystalline doped with different Ce^{3+} concentration

跃迁, 由于 Ce^{3+} 离子的激发态 5d 电子组态在晶体场作用下产生了劈裂^[25], 4f 电子从基态跃迁到这些 5d 亚能级的多级电子跃迁导致观察到两个强吸收峰^[16]。在 350 nm 波长激发下, 其发射峰为非对称结构, 是一个典型的双峰结构, 这是因为 5d 电子跃迁到 4f 能级时, 4f 能级由于自旋轨道耦合分裂成 $^2\text{F}_{5/2}$ 和 $^2\text{F}_{7/2}$ 两个成分。利用双峰拟合后可得发射谱的两个子峰峰位分别为 381 nm 和 406 nm, 归属于 Ce^{3+} 离子的 $5d^1 \rightarrow ^2\text{F}_{5/2}$ 和 $5d^1 \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$ 跃迁^[8]。

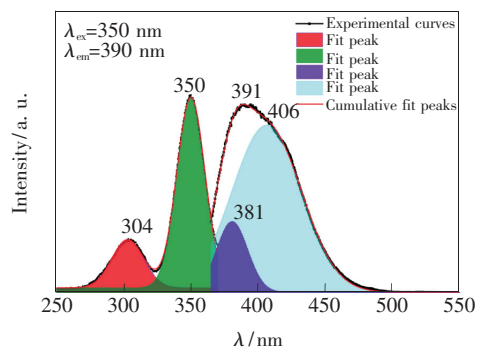


图 5 LPS: Ce 纳米晶的激发和发射光谱

Fig. 5 Excitation and emission photoluminescence spectra of LPS: Ce nanocrystalline

LPS: Ce 纳米晶的衰减时间采用单光子计数法进行了测量。紫外光激发后的发光衰减时间曲线如图 6 所示,测试的激发光波长为 350 nm,监测波长为 390 nm。采用单指数公式 $x = x_0 + A\exp(-t/\tau)$ 拟合后可得其衰减时间为 37.2 ns,这个结果与 LPS: Ce 晶体在紫外光和 γ 射线激发下的衰减时间基本一致^[9]。

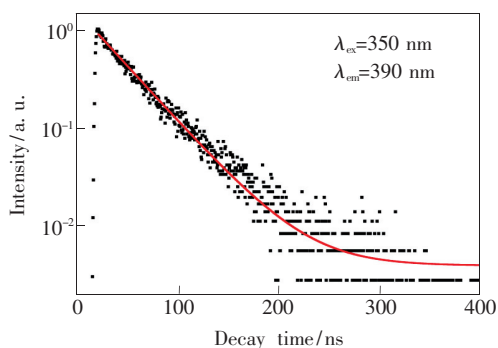


图 6 LPS: Ce 纳米晶的衰减时间

Fig. 6 Decay time of LPS: Ce nanocrystalline

LPS: Ce 纳米晶的 X 射线激发发射谱与紫外激发发射谱非常相似。如图 7 所示, X 射线激发下的发射光谱仍然表现为非对称的双峰结构。

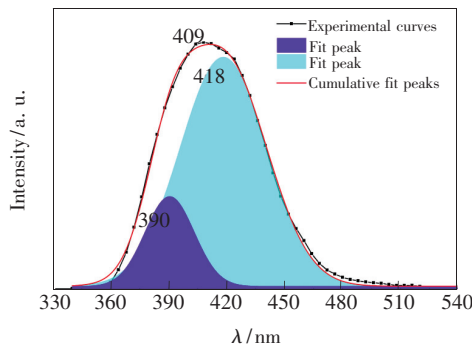


图 7 X 射线激发 LPS: Ce 纳米晶的发射光谱

Fig. 7 Emission spectra of LPS: Ce nanocrystalline excited by X-ray

拟合该发光峰后可得两个子峰峰位分别为 390 nm 和 417 nm,虽然激发源不同,但这两个发光峰同样归因于 Ce^{3+} 离子的 $5d^1 \rightarrow ^2F_{5/2}$ 和 $5d^1 \rightarrow ^2F_{7/2}$ 跃迁^[26]。

4 结 论

采用溶胶-凝胶法制备了 LPS: Ce 纳米晶。凝胶前驱体在煅烧温度达到 1 000 $^{\circ}C$ 时开始晶化,温度达到 1 200 $^{\circ}C$ 时晶粒发育基本完成, LPS: Ce 纳米晶的均匀性和分散性最好,呈近球形,平均晶粒尺寸约为 28.9 nm。发光强度随着煅烧温度的升高而增强,但当温度从 1 200 $^{\circ}C$ 升高到 1 300 $^{\circ}C$ 时,光强虽有所增加,但增强变化趋缓,并且 LPS: Ce 纳米晶的晶粒会出现了硬团聚。因此,选择 1 200 $^{\circ}C$ 高温煅烧 2 h 后制备的 LPS: Ce 纳米晶,将有利于制备致密性好、透明性高和发光性能强的高性能透明闪烁陶瓷。优化 1 200 $^{\circ}C$ 温度下煅烧 2 h 后制备的 LPS: Ce 纳米晶的 Ce^{3+} 离子掺杂浓度,可得发射光强最大时 Ce^{3+} 离子掺杂浓度约为 1%。LPS: Ce 纳米晶的紫外吸收谱表现出波长分别为 304 nm 和 350 nm 两个吸收峰,对应于 Ce^{3+} 离子最外层的 4f 电子从基态跃迁到激发态的 $4f \rightarrow 5d$ 跃迁。发射光谱表现为典型的非对称双峰结构,这两个峰位分别为 381 nm 和 406 nm 的子峰对应于 Ce^{3+} 离子的 $5d^1 \rightarrow ^2F_{5/2}$ 和 $5d^1 \rightarrow ^2F_{7/2}$ 跃迁。监测波长为 390 nm 的发射光的衰减时间为 37.2 ns,表现出纳秒级的衰减时间。X 射线激发下的发射峰亦表现出非对称的双峰结构,源于 Ce^{3+} 离子的 $5d^1 \rightarrow ^2F_{5/2}$ 和 $5d^1 \rightarrow ^2F_{7/2}$ 跃迁。本文的研究工作将会促进 LPS: Ce 纳米晶在高时间分辨 X 射线探测和成像领域的应用。

参 考 文 献:

- [1] LUO Z P, MOCH J G, JOHNSON S S, *et al.*. A review on X-ray detection using nanomaterials [J]. *Curr. Nanosci.*, 2017, 13(4): 364-372.
- [2] NIKL M, YOSHIKAWA A, VEDDA A, *et al.*. Development of novel scintillator crystals [J]. *J. Cryst. Growth*, 2006, 292(2): 416-421.
- [3] 侯晴, 陈建玉, 齐红基, 等. Yb: YAG 超快闪烁晶体研究进展与展望 [J]. *发光学报*, 2016, 37(11): 1323-1331.
HOU Q, CHEN J Y, QI H J, *et al.*. Research progress and prospect of Yb-doped YAG ultrafast scintillation crystal [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(11): 1323-1331. (in Chinese)
- [4] HU Y S, QIN Z, MA Y, *et al.*. Characterization of fiber radiation dosimeters with different embedded scintillator materials

- for radiotherapy applications [J]. *Sens. Actuators A:Phys.*, 2018,269:188-195.
- [5] 严成锋,赵广军,杭寅,等. 稀土焦硅酸盐 $\text{Re}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ 闪烁晶体的研究进展 [J]. 人工晶体学报, 2005,34(1):144-148.
- YAN C F,ZHAO G J,HANG Y, *et al.*. Research progress in inorganic scintillation crystal $\text{Re}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2005,34(1):144-148. (in Chinese)
- [6] PIDOL L,VIANA B,KAHN-HARARI A, *et al.*. Scintillation and thermoluminescence properties of $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$: Ce^{3+} crystals [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2005,537(1-2):256-260.
- [7] FENG H,DING D Z,LI H Y, *et al.*. Cerium concentration and temperature dependence of the luminescence of $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$:Ce scintillator [J]. *J. Alloys Compd.*, 2011,509(9):3855-3858.
- [8] YAN C F,ZHAO G Z,HANG Y, *et al.*. Comparison of cerium-doped $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ and Lu_2SiO_5 scintillators [J]. *J. Cryst. Growth*, 2005,281(2-4):411-415.
- [9] 李焕英,秦来顺,姚冬敏,等. $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$:Ce 晶体的闪烁性能 [J]. 发光学报, 2006,27(5):729-734.
- LI H Y,QIN L S,YAO D M, *et al.*. Scintillation properties of $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$:Ce crystal [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2006,27(5):729-734. (in Chinese)
- [10] YAN C F,ZHAO G Z,HANG Y, *et al.*. Czochralski growth and crystal structure of cerium-doped $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ scintillator [J]. *Mater. Lett. Growth*, 2006,60(16):1960-1963.
- [11] LU Q,LIU Q,ZHUANG J D, *et al.*. Ce^{3+} -doped $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ luminescent fibers derived from electrospinning: facile preparation and flexible fiber molding [J]. *J. Mater. Sci.*, 2013,48(24):8471-8482.
- [12] PIDOL L,KAHN-HARARI A,VIANA B, *et al.*. Czochralski growth and physical properties of cerium-doped lutetium pyrosilicate scintillators Ce^{3+} : $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ [J]. *J. Cryst. Growth*, 2005,275(1-2):e899-e904.
- [13] EGODAWATTE S,ZHANG E,POSEY T J, *et al.*. Synthesis of scintillating Ce^{3+} -doped $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ nanoparticles using the salt-supported high temperature (SSHT) method; solid state chemistry at the nanoscale [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2019,2(4):1857-1865.
- [14] HORIAI T, KUROSAWA S, MURAKAMI R, *et al.*. Crystal growth and optical properties of Gd admixed Ce-doped $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ single crystals [J]. *J. Cryst. Growth*, 2017,468:391-394.
- [15] LI Y, YOU B G, ZHANG W P, *et al.*. Luminescent properties of β - $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$: RE^{3+} ($\text{RE} = \text{Ce}, \text{Tb}$) nanoparticles by sol-gel method [J]. *J. Rare Earths*, 2008,26(3):455-458.
- [16] FAN L C, XU J, SHI Y, *et al.*. Lower temperature synthesis of cerium-doped polycrystalline lutetium pyrosilicate powders by a novel sol-gel processing [J]. *Sci. China Technol. Sci.*, 2014,57(8):1610-1615.
- [17] 王林香,祝恒江,尹氏. Lu_2O_3 : Eu^{3+} 纳米粉末及透明陶瓷的制备及其发光性能 [J]. 发光学报, 2011,32(9):913-919.
- WANG L X,ZHU H J,YIN M. Fabrication and luminescent properties of Eu^{3+} -doped Lu_2O_3 nanopowders and transparent ceramics [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011,32(9):913-919. (in Chinese)
- [18] TRIPATHI H S,SARIN V K. Synthesis and densification of lutetium pyrosilicate from lutetia and silica [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2007,42(2):197-202.
- [19] SOKOLNICKI J,GUZIK M. Synthesis and photoluminescence of nanocrystalline lutetium pyrosilicate doped with Ce^{3+} [J]. *Opt. Mater.*, 2009,31(6):826-830.
- [20] NEDELEC J C. Sol-gel processing of nanostructured inorganic scintillating materials [J]. *J. Nanomater.*, 2007,2007(1):9-1-8.
- [21] JAYASEELAN D D,UENO S,OHJI T, *et al.*. Sol-gel synthesis and coating of nanocrystalline $\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ on Si_3N_4 substrate [J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2004,84(1):192-195.
- [22] NIZNANSKY D,BEGNAMINI A,VEJPRAVOVA-POLTIEROVA J V, *et al.*. Doped Lutetium silicates scintillators prepared by sol-gel method. The effect of stoichiometry on phase relations and luminescent properties [J]. *IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng.*, 2011,18(10):102020-1-4.
- [23] PILANIA G,YADAV S K,NIKL M, *et al.*. Role of multiple charge states of Ce in the scintillation of ABO_3 perovskites [J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2018,10(2):024026-1-17.
- [24] PEJCHAL J,BARTA J,BABIN V, *et al.*. Influence of Mg-codoping, non-stoichiometry and Ga-admixture on LuAG:Ce

scintillation properties [J]. *Opt. Mater.*, 2018,86:213-232.

- [25] 梁宏斌,田梓峰,钟玖平,等. Ce^{3+} 离子激活的(氟)磷酸盐基质发光材料的光谱特性 [J]. *发光学报*, 2011,32(5):411-416.

LIANG H B, TIAN Z F, ZHONG J P, *et al.*. Luminescence of Ce^{3+} activated (fluoro-) phosphates under VUV-UV and X-ray excitation [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011,32(5):411-416. (in Chinese)

- [26] 任国浩,李焕英,陆晟,等. 焦硅酸镨($\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}$)闪烁晶体的生长与发光性能研究 [J]. *人工晶体学报*, 2007,36(5):967-970.

REN G H, LI H Y, LU S, *et al.*. Growth and luminescence properties of lutetium pyrosilicate ($\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}$) scintillation crystals [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2007,36(5):967-970. (in Chinese)



李乾利(1989 -),男,河南周口人,博士后,2018年于同济大学获得博士学位,主要从事像素化结构超快闪烁材料的研究。

E-mail: liqianliwin@shu.edu.cn



胡亚华(1979 -),男,安徽歙县人,博士,讲师,2019年于同济大学获得博士学位,主要从事稀土发光材料的研究。

E-mail: yhhu@zjxu.edu.cn