

Sm³⁺掺杂双钙钛矿结构 Sr₃Sn₂O₇ 的应力发光特性

王强科^{1,2}, 梁玉军², 涂 东^{1,3}

(1. 武汉大学物理科学与技术学院, 武汉 430064; 2. 中国地质大学(武汉)材料与化学学院, 武汉 430070;
3. 武汉大学苏州研究院, 江苏 苏州 215125)

摘 要: Sr₃Sn₂O₇:Sm³⁺ 是一种被广泛研究的应力发光材料, 但关于 Sm³⁺ 掺杂量的研究仍然存在缺失。本工作采用高温固相法制备 Sr_{3-x}Sn₂O₇:xSm³⁺。在 Sr₃Sn₂O₇ 中掺入少量 Sm³⁺ 后, 样品仍然保持着非中心对称的双钙钛矿结构。样品在受到紫外灯激励或应力施加之后, 能展现出稳定的光致发光、长余辉和应力发光性能, 且这三者的光谱显示出一致性。应力发光来源于 Sm³⁺ 的 ⁴G_{5/2} 激发态向 ⁶H_J (J=5/2, 7/2, 9/2) 基态的电子跃迁。通过调控 x 值对其发光性能进行优化, 在 x=0.020 时性能最好。Sm³⁺ 掺杂量的变化对应力发光性能的影响, 既对现有的相关工作进行了补充, 同时也能为未来的相关研究起到参考或指导的作用。

关键词: 锡锶氧化物; 三价钐离子; 双钙钛矿; 应力发光

中图分类号: 0482.31 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)12-3141-06
网络出版时间: 2022-11-14



Mechanoluminescent Properties of Sm³⁺ Doped Double Perovskite Sr₃Sn₂O₇

WANG Qiangke^{1,2}, LIANG Yujun², TU Dong^{1,3}

(1. School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430064, China; 2. Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences, Wuhan 430070, China; 3. Suzhou Research Institute of Wuhan University, Suzhou 215125, Jiangsu, China)

Abstract: Sr₃Sn₂O₇:Sm³⁺ is a widely studied mechanoluminescent material, but there is still a lack of research on the doping amount of Sm³⁺. In this paper, Sr_{3-x}Sn₂O₇:xSm³⁺ was prepared by a high-temperature solid-state method. A sample of Sr₃Sn₂O₇ with a small amount of Sm³⁺ still maintains a non-centrosymmetric double perovskite structure. The sample prepared has a stable photoluminescence, a long afterglow and mechanoluminescence after UV excitation or load application. The mechanoluminescence originates from the electron transition from the ⁴G_{5/2} excited state of Sm³⁺ to the ⁶H_J (J=5/2, 7/2, 9/2) ground state. The luminescence performance was optimized by adjusting the value of x, and the optimum performance was achieved when x = 0.020. This study can provide a guidance for the future related research.

Keywords: tin strontium oxide; trivalent samarium ion; double perovskite; mechanoluminescence

应力发光是指材料在受到外部机械应力时产生的发光现象^[1-4]。材料在受到外部应力时, 会发生弹性形变, 到塑性形变乃至断裂的过程。因此应力发光材料根据材料在受到外力作用时的不同状态, 可以分为弹性应力发光材料、塑性应力发光材料以及断裂应力发光材料^[5-6]。弹性应力发光材料由于具有应力发光强度与应力的在一定程度下呈线性关

系且具有可重复发光特性等优点, 引起了研究者的关注。目前, 弹性应力发光材料已经在应力传感器、应力分布成像、无损检测以及防伪、人造皮肤和人工智能等领域上展现出广阔的应用前景^[7-12]。

关于应力发光的早期记载是 1605 年 Bacon 在其著作《Advancement of Learning》所描述的方糖断裂时的光发射^[3]。1978 年, Chandra 提出了“应力发光”

收稿日期: 2022-05-17。 修订日期: 2022-07-27。

基金项目: 中国自然科学基金(11804255, 12074298); 江苏省自然科学基金(BK20190212)

第一作者: 王强科(1998—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 涂 东(1986—), 男, 博士, 研究员

Received date: 2022-05-17. Revised date: 2022-07-27.

First author: WANG Qiangke (1998—), male, Master candidate.

E-mail: 20161001379@cug.edu.cn

Correspondent author: TU Dong (1986—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: tu-dong@whu.edu.cn

这一专业术语用来描述材料在受到外界机械刺激所产生的光发射现象^[6]。直到 1999 年, Xu 等成功开发了性能优异的 ZnS:Mn^{2+} ^[13] 和 $\text{SrAl}_2\text{O}_4\text{:Eu}^{2+}$ ^[14] 这 2 种性能优异的应力发光材料, 并提出应力发光粉体与有机弹性体复合进行实际应用以及一系列应力发光性能的表征方法, 这极大的推动了应力发光材料的研究发展。在过去的 20 多年里, 人们在应力发光领域上取得许多成就: 一方面, 应力发光材料的发光颜色实现了从紫外波段到近红外光的全谱覆盖; 另一方面, 应力发光材料的应用从应力传感器扩展到了生物科学以及人工智能等领域^[3, 5, 15]。

图 1 为 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$ 的晶体结构。由图 1 可见, $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$ 的空间群是 Cmcm , 属于斜方晶系。 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$ 的单位晶胞分子数是 4, 在晶胞中存在 3 种类型的多面体, 分别为 1 个 Sr 原子与 7 个氧原子配位形成的 $[\text{SrO}_7]$ 九面体、1 个 Sr 原子与 9 个氧原子配位形成的 $[\text{SrO}_9]$ 十三面体以及一个 Sn 原子与 6 个氧原子配位形成的 $[\text{SnO}_6]$ 八面体。其中, $[\text{SrO}_7]$ 与 $[\text{SrO}_9]$ 的比例是 1:2。这些多面体沿 a 轴方向堆积, 其中 2 种 Sr 原子的交替堆积使其呈现出 1 个层状结构。单位晶胞中每种 Sr 原子都堆积了 2 层, 因此, $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$ 呈现出双钙钛矿结构, 这对于实现应力发光是非常有利的。此前, Sunao 等^[16]对 $\text{Sr}_{n+1}\text{Sn}_n\text{O}_{3n+1}$ ($n=1, 2, \infty$) 这种层状钙钛矿结构的材料进行过相关研究, 证明了 $n=2$ 时的双层钙钛矿结构表现出了最佳的应力发光性能。Tu 等^[17]报道了 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7\text{:Nd}^{3+}$ 具有近红外压电致应力发光性能。Tu 等^[18]报道了 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7\text{:Sm}^{3+}$ 在氮气气氛下烧结的应力发光性能具有最好的稳定性。Li 等^[19]报道了用 Si 或 Ge 取代 Sn 能有效提高 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7\text{:Sm}^{3+}$ 的应力发光强度。

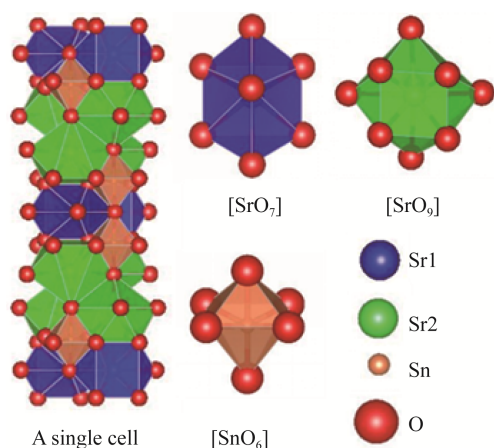


图 1 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$ 的晶体结构

Fig. 1 Crystal structure of $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$

本研究通过在 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$ 引入不同浓度的 Sm^{3+} , 寻找合适的 Sm^{3+} 掺杂浓度, 并对其晶体结构, 光致发光性能, 长余辉性能以及应力发光性能进行了详细研究。

1 实验

1.1 样品制备

$\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7\text{:}x\text{Sm}^{3+}$ [x (为化学计量比, 摩尔) = 0.002, 0.010, 0.020, 0.050] 荧光粉粉体采用传统高温固相法合成。原料采用 SrCO_3 [w (质量分数) $\geq 97.00\%$], SnO_2 ($w \geq 99.50\%$), Sm_2O_3 ($w \geq 99.99\%$) 等均为化学纯的化学试剂。根据目标产物的化学计量比计算每种所需原料的质量, 然后用电子天平称取相应原料, 置于玛瑙研钵中, 研磨 30 min, 使原料混合均匀。然后将混合原料放入坩埚中, 置于马弗炉内, 在 800°C 条件下预烧结 2 h, 待冷却后, 取出来用研钵再次研磨。随后将混合粉料装入坩埚中置于高温管式炉内, 在 1400°C 条件下烧结 5 h, 待冷却至室温后, 再次充分研磨即得 $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7\text{:}x\text{Sm}^{3+}$ 荧光粉粉体样品。

在表征应力发光性能前, 需要将用高温固相法制备得到的粉体材料与有机弹性体复合, 制成应力发光样品圆片。具体步骤为: 首先在直径为 25 mm、厚度为 10 mm 的塑料模具内表面涂 1 层凡士林, 然后称取 0.5 g 荧光粉样品于模具内, 将环氧树脂与固化剂按照质量比为 2.5:1 的比例配制树脂混合液; 然后称量 0.5 g 树脂混合液于塑料模具中; 将塑料模具中的树脂混合液与荧光粉样品搅拌均匀; 然后往塑料模具中加入 4.5 g 树脂混合液; 最后将模具放入 60°C 的烘箱中保温 4 h, 脱模即得到应力发光样品圆片。为了保证样品的稳定性, 样品在黑暗的条件下, 于室温下保存 24 h, 再进行应力发光测试。

1.2 样品表征

用 D8-Advance 型 X 射线粉末衍射仪分析产物物相组成, 测试条件: Cu 靶, 管电压 40 kV, 管电流 30 mA。此外, 对于 $\text{Sr}_{2.98}\text{Sn}_2\text{O}_7\text{:}0.020\text{Sm}^{3+}$ 的样品, 对其进行了 XRD 慢扫, 慢扫速率为 $1^\circ/\text{min}$, 然后利用 FullProf 软件对其 XRD 谱进行了结构精修。用场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM, SU8010, Hitachi, Japan) 获得了 $\text{Sr}_{2.98}\text{Sn}_2\text{O}_7\text{:}0.020\text{Sm}^{3+}$ 的扫描电子显微镜 (SEM) 照片。为了了解样品 ($x=0.020$) 中各元素的含量, 在 FE-SEM 上附加的 EDAX Genesis 上测试了 EDS 能谱和元素映射图像。利用荧光光谱仪 (FP-8600, 日本 JASCO Co., Japan), 配备 150 W Xe

灯,采集了样品的光致激发(PLE)光谱、光致发射(PL)光谱、余辉发射光谱(AG)和余辉衰减曲线。应力发光强度的测量采用实验室搭建的系统,包括 1 台万能测试机(AGS-X10kN, Shimadzu Corp., Japan)和 1 个光电倍增管(C13796, Hamamatsu Photonics, Japan)。应力发光光谱(ML)由光纤光谱仪(QE Pro, Ocean Optics)检测。

2 结果与讨论

2.1 晶体结构与元素组成分析

图 2 为 $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7:x\text{Sm}^{3+}$ 的 XRD 谱。由图 2a 可以看出,所有样品的 XRD 谱均与标准 JCPDS 卡片 25-0914 保持一致,这说明, Sm^{3+} 掺杂进入 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$

后,样品仍然保持着原来的双钙钛矿结构。由图 2b 可见, XRD 谱的实测结果与理论结果十分吻合,这进一步说明了 Sm^{3+} 引入后,样品仍然是纯相, Sm^{3+} 成功掺杂进入了 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$ 晶格中。此外,由于 Sm^{3+} 的离子半径(0.096 nm)与 Sr^{2+} 的离子半径(0.113 nm)相近, Sm^{3+} 会优先占据晶格中 Sr^{2+} 的位置^[20]。

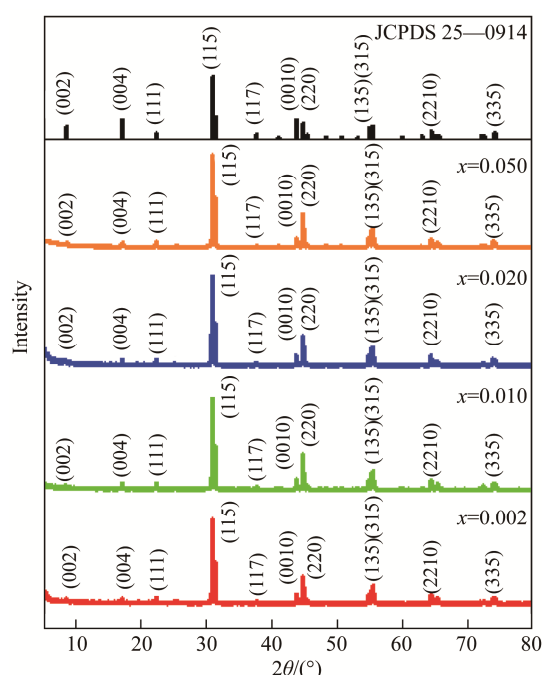
图 3 为 $\text{Sr}_{2.980}\text{Sn}_2\text{O}_7:0.020\text{Sm}^{3+}$ 的微观形貌和元素组成分析结果。由图 3a 可以看出,样品尺寸在 10 μm 左右。由图 3b~图 3e 可以看出,样品中元素分布与 SEM 照片保持一致,且 Sm^{3+} 也被观测到,进一步证明 Sm^{3+} 成功掺杂进入到了 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$ 中。

2.2 光致发光性能

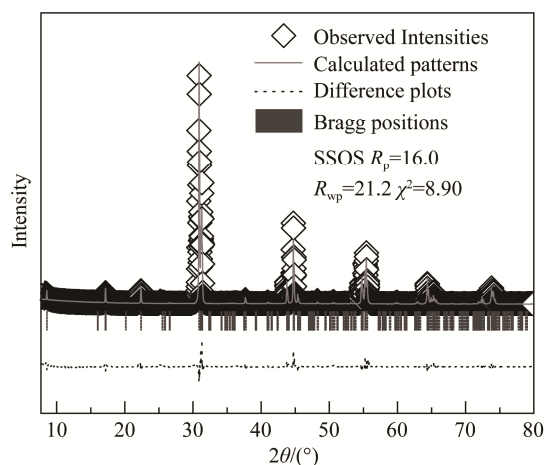
图 4 为 $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7:x\text{Sm}^{3+}$ ($x=0.002, 0.010, 0.020, 0.050$) 的光致发光与长余辉性能。由图 4a 可以看出,样品在 220 nm 到 280 nm 之间存在 1 个宽激发带,激发峰位于 250~260 nm 之间,其中, 220~240 nm 是源于 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$ 的本征吸收, 240~280 nm 是源于 Sm^{3+} 的特征吸收。由图 4b 可见,属于 Sm^{3+} 的 5 个特征发射峰,分别位于 572、582、611、624 nm 和 666 nm,其发光颜色是橙红色,这意味着 Sm^{3+} 是发光中心,其中 572 nm 和 582 nm、611 nm 和 624 nm、666 nm 的发射峰分别源于 Sm^{3+} 的 $^4G_{5/2}$ 激发态到 ^6H_J ($J=5/2, 7/2, 9/2$) 基态的电子跃迁^[22]。此外,随 Sm^{3+} 掺杂量的变化,发光强度呈现出先上升后下降的趋势,这说明在 $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7:x\text{Sm}^{3+}$ 中存在浓度猝灭效应,在本次研究中, $\text{Sr}_{2.980}\text{Sn}_2\text{O}_7:0.020\text{Sm}^{3+}$ 具有最佳的发光强度。图 4c 记录了在 254 nm 激励 5 min 后 624 nm 处的发射波长的强度随时间衰减曲线。从图中可以看到,在去除激发源后,所有样品均能展现长余辉性能,但是在 180 s 后样品的余辉已经十分微弱了。因此,在关闭激发源 180 s 后再测试应力发光性能,可以极大的减弱长余辉对应力发光的影响。

2.3 应力发光性能分析

图 5 为 $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7:x\text{Sm}^{3+}$ ($x=0.002, 0.010, 0.020, 0.050$) 的应力发光性能测试结果。由图 5a 和图 5b 分别显示了 $\text{Sr}_{2.98}\text{Sn}_2\text{O}_7:0.02\text{Sm}^{3+}$ 的应力发光强度与应力随时间的变化曲线。从这两个图可以看出,应力发光强度与施加的应力的变化是一致的,每施加 1 次循环应力,都能表现出 1 个对应的应力发光强度信号。由图 5c 可见,随着应力的增大,发光强度呈现出增大的趋势,然而,在较小的应力下,发光强度没有表现出明显的增大,且在应力增大到一定程度时发光强度不再增加。此外,随着 Sm^{3+} 掺杂量的增加,应力发光强度呈先增强后减弱的趋势,且



(a) XRD patterns of $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7:x\text{Sm}^{3+}$ ($x=0.002, 0.010, 0.020, 0.050$)



(b) The structure refinement of $\text{Sr}_{2.980}\text{Sn}_2\text{O}_7:0.020\text{Sm}^{3+}$

图 2 $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7:x\text{Sm}^{3+}$ 的 XRD 分析结果
Fig. 2 XRD analysis results of $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7:x\text{Sm}^{3+}$

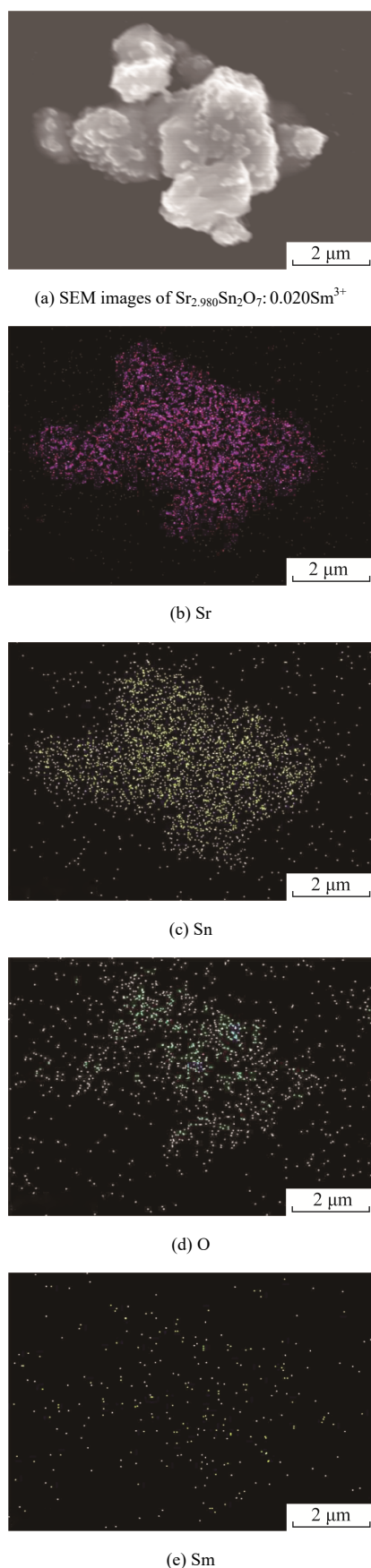


图3 $\text{Sr}_{2.980}\text{Sn}_2\text{O}_7:0.020\text{Sm}^{3+}$ 的微观形貌及元素映射图片
Fig. 3 Micromorphology and elemental mapping of $\text{Sr}_{2.980}\text{Sn}_2\text{O}_7:0.020\text{Sm}^{3+}$

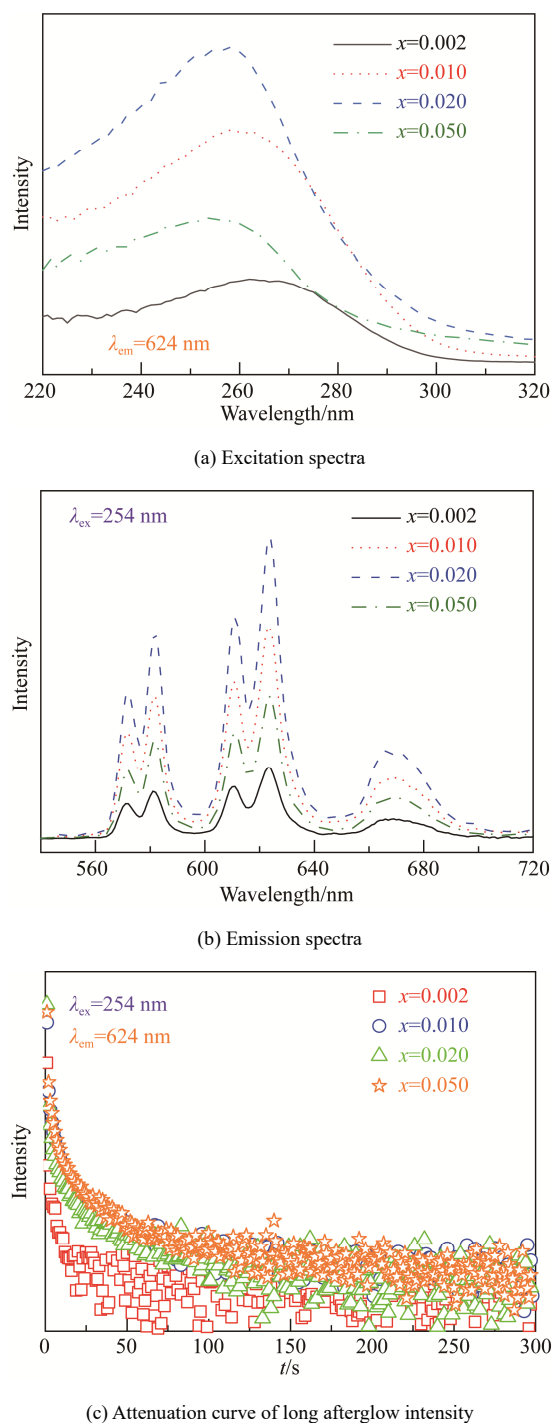
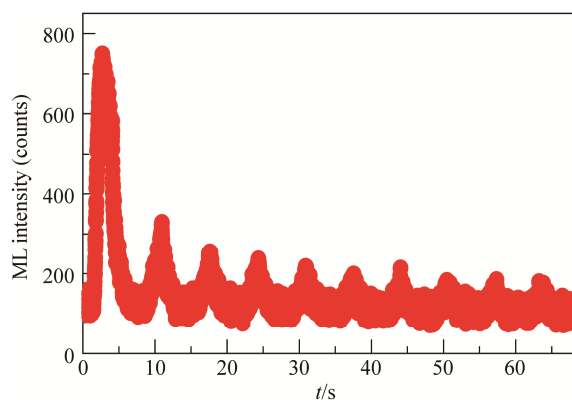
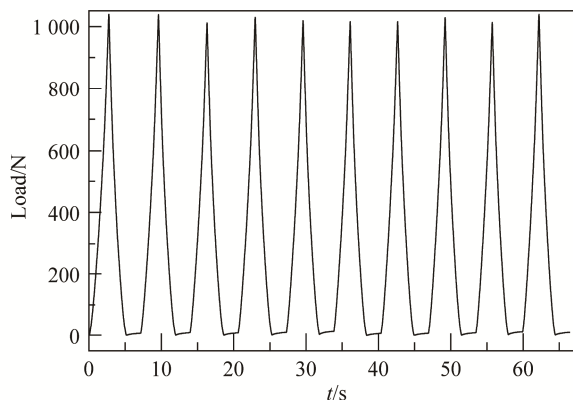
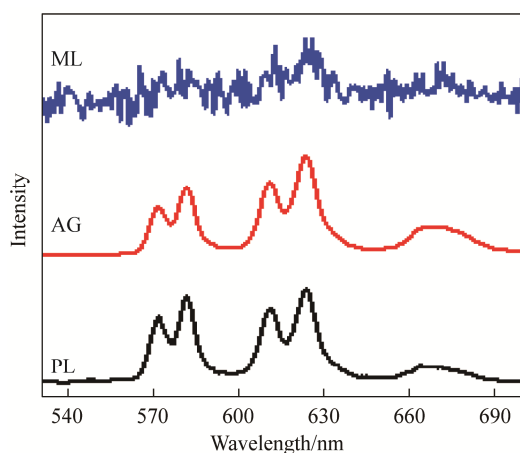
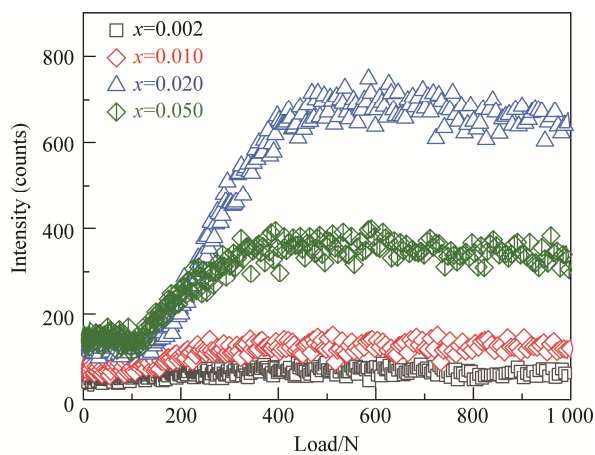
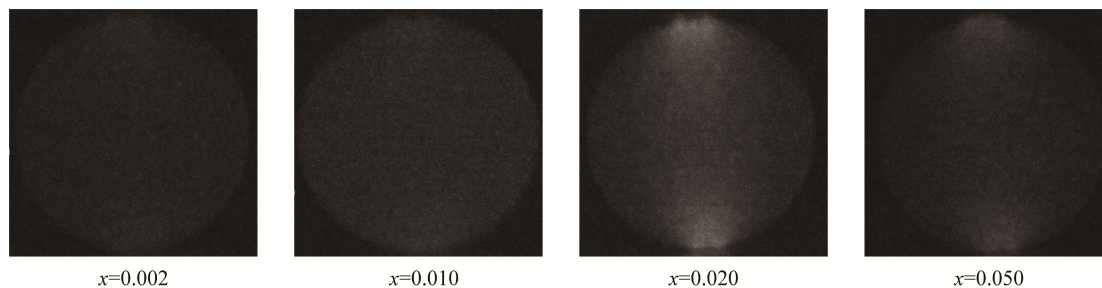


图4 $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7: x\text{Sm}^{3+}$ 的光致发光与长余辉性能
Fig. 4 Photoluminescence and long afterglow properties of $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7: x\text{Sm}^{3+}$

在 $x=0.020$ 时达到最大。由图 5d 可以看出, $\text{Sr}_{2.980}\text{Sn}_2\text{O}_7:0.020\text{Sm}^{3+}$ 的 PL、AG 以及 ML 的发光峰位可以完全对应, 说明 PL、AG 以及 ML 的发光峰都是源于 Sm^{3+} 的电子跃迁。此外, 在余辉消失后样品仍能产生应力发光性能, 这是由于 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$ 具有这种双钙钛矿结构材料具有压电性, 掺入 Sm^{3+} 作为发光中心后就能产生压电致应力发光。由图 5e 可以

(a) Mechanoluminescence intensity change curve of $\text{Sr}_{2.98}\text{Sn}_2\text{O}_7:0.020\text{Sm}^{3+}$ (b) Stress change curve of $\text{Sr}_{2.98}\text{Sn}_2\text{O}_7:0.020\text{Sm}^{3+}$ (c) Mechanoluminescence intensity of $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7:x\text{Sm}^{3+}$ under stresses ranging from 0 to 1000 N(d) Photoluminescence (PL), long afterglow (AG) and mechanoluminescence (ML) spectra of $\text{Sr}_{2.98}\text{Sn}_2\text{O}_7:0.020\text{Sm}^{3+}$ (e) Mechanoluminescence photographs of $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7:x\text{Sm}^{3+}$ 图 5 $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7:x\text{Sm}^{3+}$ 的应力发光性能
Fig. 5 Mechanoluminescence properties of $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7:x\text{Sm}^{3+}$

看出, 由于圆片样品的上下 2 端是与力学万能测试机接触的位置, 该处的在压应力下的应变最大, 因此该区域应力发光强度也最大。

3 结论

在 $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$ 中掺入少量 Sm^{3+} 不会引起晶体结构的显著变化, 仍然保持着双钙钛矿的非中心对称结构。荧光粉能展现出稳定的光致发光、长余辉和应力

发光特性, 其发射光谱位于 560~680 nm 之间, 发光颜色是橙红色。荧光粉的应力发光与光致发光强度随 Sm^{3+} 掺杂量的变化一致, 均在 $x=0.020$ 时达到最大。

$\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_2\text{O}_7:x\text{Sm}^{3+}$ 的应力发光、光致发光和长余辉发光都是源于 Sm^{3+} 的 $^4G_{5/2}$ 激发态向 ^6H_J ($J=5/2, 7/2, 9/2$) 基态的电子跃迁, 该应力发光材料具有可重复利用, 以及在一定应力范围内发光强度与应力大小呈线性关系等适合用于应力传感器的特质。

参考文献:

- [1] FENG A, SMET P F. A review of mechanoluminescence in inorganic solids: compounds, mechanisms, models and applications[J]. *Materials*, 2018, 484(11): 1–56.
- [2] PENG Dengfeng, CHEN Bing, WANG Feng. Recent advances in doped mechanoluminescent phosphors[J]. *ChemPlusChem*, 2015, 80: 1209–1215.
- [3] XIONG Puxian, PENG Mingying, YANG Zhongmin. Near infrared mechanoluminescence crystals: A review[J]. *iScience*, 2021, 101944(24): 1–14.
- [4] MA Zhidong, ZHOU Jinyu, ZHANG Jiachi, et al. Mechanics-induced triple-mode anticounterfeiting and moving tactile sensing by simultaneously utilizing instantaneous and persistent mechanoluminescence[J]. *Mater Horiz*, 2019, 6: 2003–2008.
- [5] ZHUANG Yixi, XIE Rongjun. Mechanoluminescence rebrightening the prospects of stress sensing: A review[J]. *Adv Mater*, 2021, 2005925(33): 1–33.
- [6] ZHANG Juncheng, WANG Xusheng, MARRIOTT G, et al. Trap-controlled mechanoluminescent materials[J]. *Progr Mater Sci*, 2019, 103: 678–742.
- [7] ZHANG Juncheng, GAO Nan, LI Lei, et al. Discovering and dissecting mechanically excited luminescence of Mn^{2+} activators *via* matrix microstructure evolution[J]. *Adv Funct Mater*, 2021, 2100221(31): 1–9.
- [8] WANG Chunfeng, PENG Dengfeng, et al. Mechanoluminescence materials for advanced artificial skin[J]. *Sci Bull*, 2020, 65: 1147–1149.
- [9] ZHANG Juncheng, XUE Xuyan, YI Fei, et al. Ultra-long-delay sustainable and short-term-friction stable mechanoluminescence in Mn^{2+} -activated $\text{NaCa}_2\text{GeO}_4\text{F}$ with centrosymmetric structure[J]. *Chem Eng J*, 2021, 126798(406): 1–9.
- [10] YANG Yunling, YANG Xuechun, YUAN Jiayong, et al. Time-Resolved bright red to cyan color tunable mechanoluminescence from $\text{CaZnOS}:\text{Bi}^{3+}$, Mn^{2+} for anti-counterfeiting device and stress sensor[J]. *Adv Opt Mater*, 2021, 2100668(9): 1–12.
- [11] FAN Yuting, YANG Yunling, Li Ting, et al. Enhanced mechanically induced red-light emitting novel mechanoluminescence materials for ultrasonic visualization and monitoring applications[J]. *J Mater Chem C*, 2021, 9: 5868–5875.
- [12] XIONG Puxian, HUANG Bolong, PENG Dengfeng, et al. Self-recoverable mechanically induced instant luminescence from Cr^{3+} -doped LiGa_5O_8 [J]. *Adv Funct Mater*, 2021, 2010685(31): 1–11.
- [13] XU Chaonan, WATANABE T, AKIYAMA M, et al. Direct view of stress distribution in solid by mechanoluminescence[J]. *Appl Phys Lett*, 1999, 74: 2414–2416.
- [14] XU Chaonan, WATANABE T, AKIYAMA M, et al. Artificial skin to sense mechanical stress by visible light emission[J]. *Appl Phys Lett*, 1999, 74: 1236–1238.
- [15] 杨秀霞, 涂东. 近红外应力发光材料研究进展[J]. *发光学报*, 2021, 42(2): 119–131.
- YANG Xiuxia, TU Dong. Chin J Lumin (in Chinese), 2021, 42(2): 119–131.
- [16] KAMIMURA S, YAMADA H, XU C. Strong reddish-orange light emission from stress-activated $\text{Sr}_{n+1}\text{Sn}_n\text{O}_{3n+1}$ ($n=1, 2, \infty$) with perovskite-related structures[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 091113(101): 1–4.
- [17] TU Dong, XU Chaonan, KAMIMURA S, et al. Ferroelectric $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7:\text{Nd}^{3+}$: A new multipiezo material with ultrasensitive and sustainable near-infrared piezoluminescence[J]. *Adv Mater*, 2020, 1908083(32): 1–9.
- [18] TU Dong, HAMABE R, XU Chaonan. Sustainable mechanoluminescence by designing a novel pinning trap in crystals[J]. *J Phys Chem C*, 2018, 122(41): 23307–23311.
- [19] LI Jun, XU Chaonan, TU Dong, et al. Tailoring bandgap and trap distribution *via* Si or Ge substitution for Sn to improve mechanoluminescence in $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7:\text{Sm}^{3+}$ layered perovskite oxide[J]. *Acta Mater*, 2018, 145: 462–469.
- [20] LEI Bingfu, MAN Shiqing, LIU Yingliang, et al. Luminescence properties of Sm^{3+} -doped $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7$ phosphor[J]. *Mater Chem Phys*, 2010, 124: 912–915.