

## 激光与光电子学进展

Sn<sup>2+</sup>掺杂透明硼硅酸盐玻璃的闪烁特性魏荣妃<sup>\*†</sup>, 汪丽<sup>†</sup>, 陆福民, 胡芳芳, 郭海<sup>\*\*</sup>

浙江师范大学物理系, 浙江 金华 321004

**摘要** 闪烁体具有吸收高能光子并将其转换成低能可见光子的能力,被广泛应用于无损检测、安全检查和医学成像等领域。针对传统闪烁晶体制备过程耗时且成本高的缺点,采用传统熔融淬冷法合成了 Sn<sup>2+</sup>掺杂的透明硼硅酸盐玻璃,并系统研究了该材料的透射光谱、激发光谱、紫外(UV)受激发射光谱、X射线激发发光(XEL)光谱以及衰减曲线。实验结果表明,适当的热处理能有效增强样品的 UV 激发和 XEL 强度,最佳样品的 XEL 强度为商用 Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> 晶体的 25.1%。此外,在不同功率 X 射线辐照下样品的透过率仅略有下降,且再次经过热处理可恢复为初始水平。制备的样品具有优异的紫外激发和 X 射线辐照荧光特性,在 X 射线成像等领域具有潜在的应用前景。

**关键词** 材料; 玻璃; 闪烁体; 荧光; X 射线

中图分类号 O433

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1516010

Scintillating Performance of Sn<sup>2+</sup>-Doped Transparent Borosilicate GlassWei Rongfei<sup>\*†</sup>, Wang Li<sup>†</sup>, Lu Fumin, Hu Fangfang, Guo Hai<sup>\*\*</sup>

Department of Physics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang, China

**Abstract** Scintillators that can absorb high-energy photons and convert them into low-energy visible photons are used extensively in fields, including nondestructive inspection, security inspection, and medical imaging. Aiming at the inadequacy of time-consuming and high cost in the preparation process of traditional scintillator crystals, Sn<sup>2+</sup>-doped borosilicate glasses are synthesized successfully through the traditional melt-quenching approach in this study. The transmission, excitation, and ultraviolet (UV) stimulated emission spectra, X-ray excited luminescence (XEL) spectra, and decay curves of the materials are systematically investigated. The experimental findings that correct heat treatment can efficiently improve the fluorescence intensity of UV and XEL of the sample, and the XEL intensity of the optimal sample reaches 25.1% of that of commercial Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> crystal. Furthermore, the transmittance of the sample decreases only moderately under various power X-ray excitation. In addition, it can be restored to the initial level after the thermal treatment again. The synthesized samples endow remarkable fluorescence properties of ultraviolet excitation and X-ray irradiation that have promising potential in X-ray imaging and other fields.

**Key words** materials; glass; scintillator; luminescence; X-ray

## 1 引言

X 射线具有的强穿透能力使其成为无损检测的理想光源<sup>[1-3]</sup>。闪烁体作为一种独特的发光材料,能吸收高能光子(如 X、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  射线)并将其转换为可见光子,在医学成像、辐射探测以及工业无损检测等方面发挥着不可替代的作用<sup>[4-8]</sup>。传统无机闪烁晶体材料(如

Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> (BGO)、CsI:Tl 和 Ce, Mg:LuAG)的优点是光产额大、能量分辨率高,但实验原料昂贵、合成工序复杂、生产周期长且难以获得大尺寸晶体等缺点阻碍了该材料的进一步发展<sup>[9-10]</sup>。

近年来,闪烁玻璃以其突出的特点引起了研究者的广泛关注。与闪烁晶体相比,闪烁玻璃具有制备方法简单、成本低廉、光学透过性好以及可实现大批量生产等

收稿日期: 2022-04-26; 修回日期: 2022-05-26; 录用日期: 2022-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(51802285, 11974315, 11804303, 51902178)、浙江省自然科学基金(LQ22A040011, LQ18A040004, LZ20E020002)

通信作者: \*rfwei@zjnu.edu.cn; \*\*ghh@zjnu.cn

† 共同第一作者

优点。此外,玻璃的可塑性强,为实现高分辨率成像提供了一定的条件<sup>[11-12]</sup>,但闪烁玻璃非晶态导致的低光产额以及闪烁响应不足、抗辐照能力较差等因素也制约了其发展<sup>[13-14]</sup>。因此,寻找和制备具有优异闪烁性能的新型闪烁体成为闪烁材料研究的重点。过渡金属  $\text{Sn}^{2+}$  掺杂的荧光玻璃具有宽带发射和高量子效率,被认为是太阳能电池涂层材料、荧光粉转换白光二极管基质的潜在候选材料<sup>[15]</sup>。 $\text{Sn}^{2+}$  作为  $\text{S} \rightarrow \text{P}$  能级跃迁的发光离子,寿命较短,在高能射线辐射探测领域有着广阔的应用前景<sup>[16]</sup>,但目前关于  $\text{Sn}^{2+}$  掺杂玻璃闪烁性能的研究较少。

本文选用硼酸盐玻璃基质,通过调节  $\text{SnO}$  的摩尔分数合成了一系列  $\text{Sn}^{2+}$  掺杂的硼硅酸盐玻璃,并通过引入  $\text{B}_2\text{O}_3$  有效降低了熔融温度,使样品更容易制备<sup>[17]</sup>。系统研究了合成样品的光学性能和闪烁特性,并对 X 射线激发发光 (XEL) 光谱的原理进行了简要分析。通过适当的热处理有效提高了样品的紫外激发和 XEL 强度。实验结果表明,样品具有优异的抗辐照性能和可重复使用特性,验证了  $\text{Sn}^{2+}$  掺杂硼硅酸盐玻璃作为闪烁体候选材料以及应用于 X 射线成像等领域的可行性。

## 2 实验部分

### 2.1 样品制备

实验采用传统的熔融淬火法,成功合成组分为  $50\text{SiO}_2-14\text{B}_2\text{O}_3-10\text{Al}_2\text{O}_3-3\text{Na}_2\text{CO}_3-8\text{MgO}-8\text{ZnO}-3.5\text{ZrO}_2-3.5\text{Gd}_2\text{O}_3-x\text{SnO}$  ( $x=50, 14, 10, 3, 8, 8, 3.5, 3.5, x$  分别为对应组分所占的摩尔分数,  $x=0.2, 0.5, 1, 2, 3$ ) 的硼硅酸盐玻璃。原材料中的  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  纯度为 99.99%, 其余原材料均为分析纯试剂。首先,称取总质量约 20 g 的药品,将混合物在研钵中充分研磨 40 min,将其装入  $\text{Al}_2\text{O}_3$

坩埚中,并转移至升降炉(温度为  $1450^\circ\text{C}$ )烧结 1 h。然后,将熔体倒在预热至  $300^\circ\text{C}$  的电铜板上,并用另一块铜片快速覆盖到熔体上使其定型,待其自然冷却至室温形成玻璃(标记为  $\text{G}_x\text{SnO}$ )。为了进一步提高样品的紫外激发和 XEL 强度,对  $\text{G}_1\text{SnO}$  样品进行切割,分别在  $400^\circ\text{C}$  和  $450^\circ\text{C}$  下热处理 5 h ( $400^\circ\text{C}$  和  $450^\circ\text{C}$  下可以保证样品的非晶形态并释放内应力),并将对应样品分别命名为  $\text{G}_1\text{SnO}400$  和  $\text{G}_1\text{SnO}450$ 。为方便后续处理与表征研究,将所有样品的厚度抛光至 2 mm。

### 2.2 表征

使用日立 U-3900 分光光度计测量了样品在 200~800 nm 范围内的透过率。利用 FS-5 型荧光光谱仪测试了样品的激发和发射谱(光源为氙灯,功率为 150 W),同时可获得样品的衰减曲线(光源为微秒灯  $\mu\text{F}900$ )和 303~573 K 范围内的温度依赖性发射谱(光源为氙灯,外接热控制器)。使用 Rigaku MiniFlex/600 衍射仪(探测器的衍射角范围为  $10^\circ \sim 80^\circ$ ,步长为  $0.02^\circ$ )探测样品的 X 射线衍射 (XRD) 图谱,辐射源为  $\text{Cu K}_\alpha$  射线。XEL 光谱用 Zolix OmniFluo960-X 射线闪烁荧光光谱仪测试(工作电流为 200 mA)。

## 3 结果与讨论

图 1(a) 为  $\text{G}_x\text{SnO}$  ( $x=0.2, 0.5, 1, 2, 3$ ) 样品的紫外-可见透射光谱。可以发现,所有样品在可见光区域的透过率均超过 80%,具有良好的透明度。随着  $\text{Sn}^{2+}$  摩尔分数的增加,紫外吸收边稍有红移。在  $\text{Sn}^{2+}$  的激发光谱中,所有样品都显示出了位于 230~360 nm 范围的宽带吸收峰,峰位为 312 nm,归属于  $\text{Sn}^{2+}$  的  $^1\text{S}_0 \rightarrow ^1\text{P}_1$  跃迁<sup>[18]</sup>,如图 1(b) 所示。其中,  $\lambda_{\text{em}}$  为发射波长。在

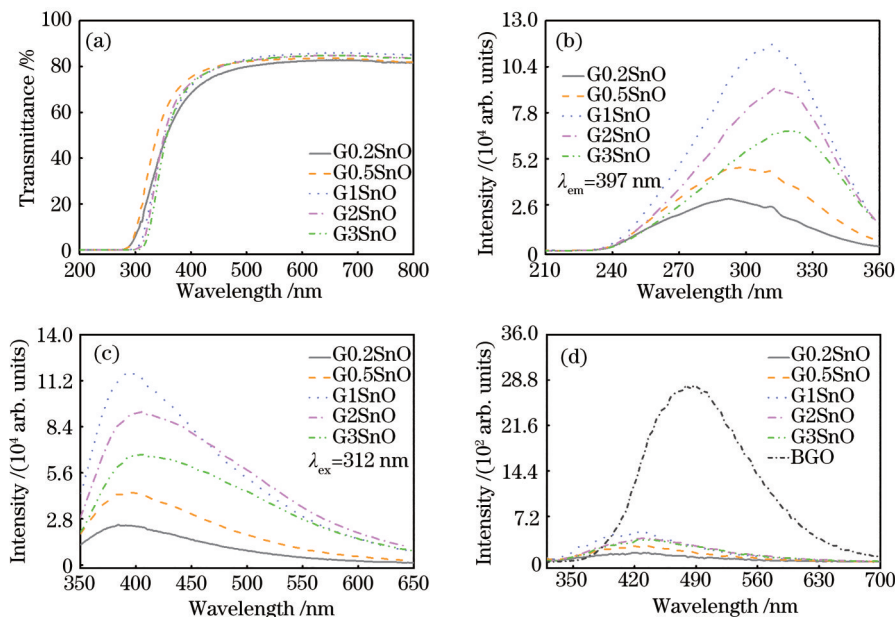


图 1 不同  $\text{G}_x\text{SnO}$  样品的发射图谱。(a)透射光谱;(b)激发光谱;(c)312 nm UV 激发的光谱;(d)X 射线辐照的发射光谱  
Fig. 1 Emission spectra of different  $\text{G}_x\text{SnO}$  samples. (a) Transmission spectra; (b) excitation spectra; (c) spectra obtained by 312 nm UV excitation; (d) emission spectra obtained by X-ray irradiation

312 nm 紫外光激发下,样品发射出明亮的蓝紫光,其发射谱中心位于 397 nm 处,对应  $\text{Sn}^{2+}$  的  $^3\text{P}_1 \rightarrow ^1\text{S}_0$  能级跃迁<sup>[19]</sup>,如图 1(c)所示。其中,  $\lambda_{\text{ex}}$  为激发波长。此外,样品的荧光强度随 SnO 摩尔分数的增加不断增强。当 SnO 的摩尔分数为 1% 时,强度达到最大值,之后进一步增大 SnO 的摩尔分数会使荧光强度逐渐降低。从激发光谱和发射光谱中可以发现,SnO 摩尔分数的增加会使激发和发射峰位均发生红移。原因可能是随着 SnO 摩尔分数的增加,  $\text{Sn}^{2+}-\text{Sn}^{2+}$  之间的距离减小,  $\text{Sn}^{2+}$  的激发态与基态间距减小<sup>[20]</sup>。

为了探索样品作为闪烁体的潜力,测试了 X 射线(电压为 35 kV,电流为 200 mA)激发下  $\text{G}_x\text{SnO}$  ( $x=0.2, 0.5, 1, 2, 3$ ) 样品的发射谱,如图 1(d)所示。可以发现,所有样品在 X 射线辐射下的发射光谱与紫外激发下的光谱形状没有明显差异,且所有样品的发射带都在 397 nm 处达到峰值。样品的闪烁积分强度随着  $\text{Sn}^{2+}$  含量的增加而增强,在 SnO 的摩尔分数为 1% 时达到最大值。相同条件下  $\text{G}_x\text{SnO}$  与商用 BGO 闪烁体的性能如表 1 所示。可以发现,最佳样品 G1SnO 的积分强度为 BGO 的 18.20%,这表明  $\text{Sn}^{2+}$  掺杂硼硅酸盐玻璃有望作为闪烁体的候选材料。

在闪烁体中,X 射线高能光子可以与样品通过光电

表 1  $\text{G}_x\text{SnO}$  样品与 BGO 的闪烁性能

Table 1 Scintillation properties of  $\text{G}_x\text{SnO}$  samples and BGO unit: %

Glass sample	G0.2SnO	G0.5SnO	G1SnO	G2SnO	G3SnO
XEL properties	7.90	11.15	18.20	14.85	13.63

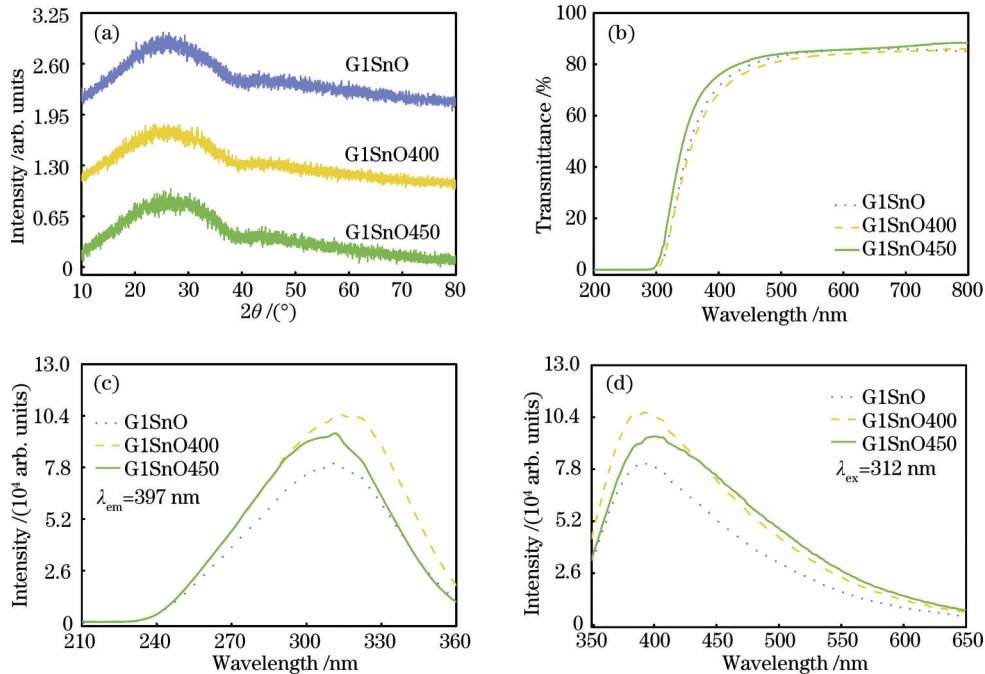


图 3 不同样品的发射谱。(a)XRD;(b)透射光谱;(c)激发光谱;(d)312 nm UV 的发射光谱

Fig. 3 Emission spectra of different samples. (a) XRD; (b) transmission spectra; (c) excitation spectra; (d) emission spectra of 312 nm UV light

效应相互作用产生大量热化的电子和空穴,经历俄歇效应后形成大量的二次电子。随后,这些二次电子被传输到发光中心( $\text{Sn}^{2+}$ )附近,  $\text{Sn}^{2+}$  吸收二次电子的能量后被激发到激发态,最后辐射弛豫到基态发射出可见光<sup>[21-22]</sup>。

图 2 为 G1SnO 样品在 312 nm 激发下监测 397 nm 发射的荧光衰减曲线,其平均寿命( $\tau$ )<sup>[23-25]</sup>可表示为

$$\tau = \frac{\int I(t) dt}{\int I'(t) dt}, \quad (1)$$

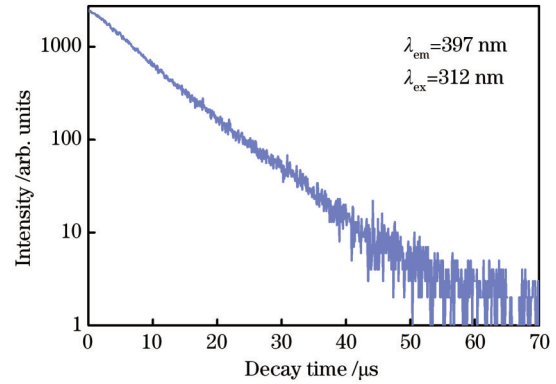


图 2 G1SnO 样品的衰减曲线

Fig. 2 Decay curve of the G1SnO sample

式中,  $I(t)$  为  $\text{Sn}^{2+}$  在  $t$  时刻的发光强度。计算得到 G1SnO 的衰减寿命为 7.6  $\mu\text{s}$ ,较短的寿命表明该样品有望作为闪烁体材料应用于实时成像等领域。

为了进一步提高样品的紫外激发和 XEL。将 G1SnO 样品切割成三块,取其中两块分别在 400  $^{\circ}\text{C}$  和 450  $^{\circ}\text{C}$  温度下热处理 5 h。图 3(a)为 G1SnO、G1SnO400

和 G1SnO450 样品的 XRD 图谱。其中,  $2\theta$  为衍射角, 即入射 X 射线的延长线与反射 X 射线的夹角。弥漫的馒头峰(比较弥散的峰型)表明经过热处理的样品并未形成纳米晶(仍然是玻璃相), 即样品的非晶态特征没有发生变化。图 3(b) 为样品的透射率, 可以发现, 热处理前后样品的透过率基本没有发生变化。图 3(c) 和图 3(d) 分别为 G1SnO、G1SnO400 和 G1SnO450 样品的激发谱和发射谱。可以发现, 相比 G1SnO 样品, G1SnO400 和 G1SnO450 样品的荧光强度经过热处理后有显著增强, 最佳热处理温度为 400 °C。原因可能是热处理过程能在一定程度上降低玻璃的无序度, 无辐射跃迁减小<sup>[26]</sup>。

图 4 为 G1SnO、G1SnO400 和 G1SnO450 样品的 XEL 光谱。可以发现, 经过 400 °C 温度、5 h 的热处理, 样品的闪烁发光强度可增强至 BGO 的 25.1%。这表明可通过适当热处理有效增强样品的闪烁特性。不同

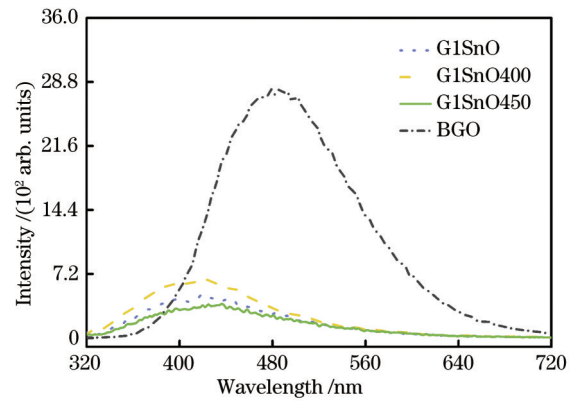


图 4 不同样品的 XEL 光谱

Fig. 4 XEL spectra of different samples

方法制备的闪烁玻璃辐照发光效率如表 2 所示。可以发现, 相比其他闪烁玻璃, 实验制备的样品具有较高的辐照发光效率。

表 2 不同闪烁玻璃的 XEL

Table 2 XEL of different scintillation glasses

Material	Material	XEL / %	Ref.
BGO	single crystal	100.0	[27]
70TeO <sub>2</sub> -20ZnO-2Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -8Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	glass	6.0	[28]
28.875B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -8.25GeO <sub>2</sub> -45.375TeO <sub>2</sub> -10Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -7.5Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	glass	9.1	[29]
10CaO-25Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -10SiO <sub>2</sub> -54.75B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0.25Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	glass	25.0	[30]
50SiO <sub>2</sub> -14B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -10Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -3Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -8MgO-8ZnO-3.5ZrO <sub>2</sub> -3.5Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -1SnO(G1SnO400)	glass	25.1	ours

为了研究样品的抗辐射性能, 测试了 G1SnO400 样品在不同功率辐照下的 XEL 光谱及透射光谱, 结果如图 5 所示。可以发现: 随着入射功率的不断增大, G1SnO400 样品的 XEL 强度持续增强, 且在测试范围内并未达到饱和, 这表明制备的样品在 X 射线检测方面具有很强的灵敏度; 经历 X 射线辐照后, 样品透射率只在 300~550 nm 范围内稍有下降, 这表明样品具有良好的抗辐照性能。透过率下降的原因可能是 X 射线

辐照样品时, 电离辐射产生的自由载流子被玻璃中的缺陷中心捕获, 形成一种特殊的带电荷点缺陷结构(色心), 色心在可见光区域存在吸收<sup>[31-32]</sup>。同时, 随着 X 射线入射功率的增加, 色心浓度升高, 导致透过率有轻微下降。对受损样品在 400 °C 温度下继续热处理 5 h, 样品的 XEL 强度和透过率均能恢复为初始状态。原因可能是热处理减少了玻璃中的缺陷, 从而消除了色心, 证明了样品具有可重复使用性<sup>[33]</sup>。

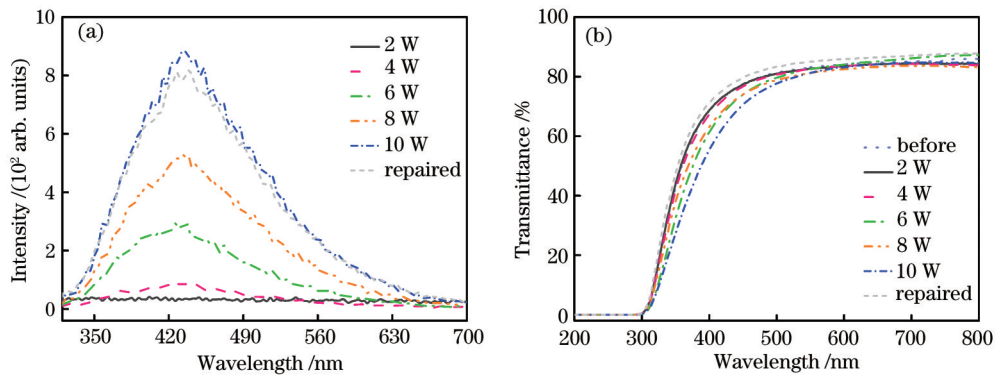


图 5 不同 X 射线功率辐照下的 XEL 光谱与透射光谱。(a) G1SnO400 样品的 XEL 光谱; (b) 辐照前后及恢复后样品的透射光谱

Fig. 5 XEL and transmission spectra under different X-ray power irradiation. (a) XEL spectra of G1SnO400 sample;

(b) transmission spectra before and after X-ray irradiation and after repaired

图 6(a) 为 G1SnO400 样品在紫外激发下温度为 303、333、363、393、423、453、483、513、543、573 K 时的发射光谱。可以发现,随着温度的升高,样品的发射峰位及峰形基本不变,发光强度则呈单调下降趋势。

图 6(b) 为相应积分强度随温度的变化关系。可以发现,在 423 K 时 G1SnO400 样品的发光强度约为室温时的 68%,证明了样品具有优良的热稳定性。

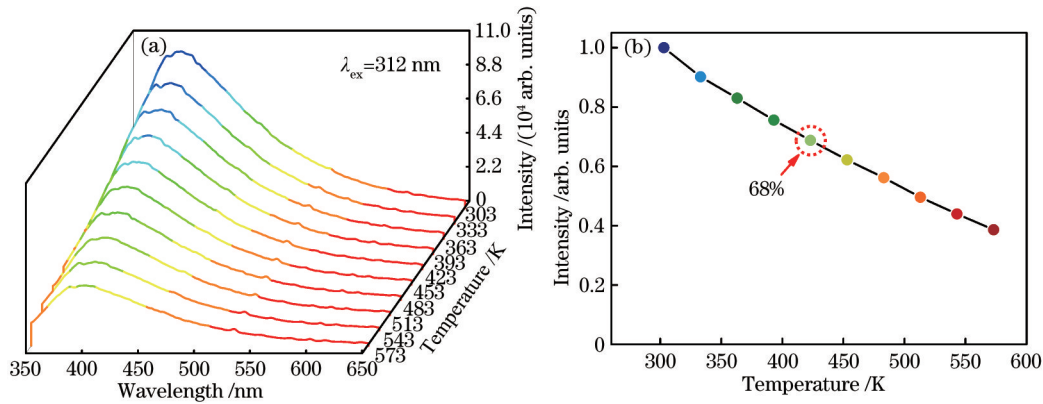


图 6 不同温度下 G1SnO400 样品的光谱。(a) 变温光谱;(b) 温度依赖积分强度

Fig. 6 Spectra of G1SnO400 samples at different temperatures. (a) Variable temperature spectra; (b) temperature-dependent integrated intensity

## 4 结 论

通过高温熔融淬冷法制备了一系列 Sn<sup>2+</sup> 掺杂硼硅酸盐玻璃。实验结果表明:该样品具有优异的紫外激发和 X 射线辐射荧光特性,经过适当的热处理能有效增强样品的荧光强度;X 射线激发下,样品的发射强度可达到商用 BGO 的 25.1%;不同功率 X 射线辐照后样品的透过率并未下降很多,且辐照后的样品再次经过热处理,其闪烁性能和透过率均可恢复至原始水平。该样品具有良好的抗辐射性能和可重复使用性,表明 Sn<sup>2+</sup> 掺杂硼硅酸盐玻璃在工业和医学 X 射线成像中具有一定的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 安康, 李汶芳, 段晓礁, 等. 光纤耦合 GAGG\_Ce 型 X 射线探测器高分辨成像[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0111001.  
An K, Li W F, Duan X J, et al. Fiber-coupled GAGG\_Ce X-ray detector for high-resolution imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0111001.
- [2] 胡景东, 梁丽红, 刘雪梅, 等. 射线数字成像透照厚度与灰度模型研究[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 1034001.  
Hu J D, Liang L H, Liu X M, et al. Research on penetrated thickness and gray model of radiographic digital imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1034001.
- [3] 胡哲, 洪春霞, 滑文强, 等. 上海光源硬 X 射线光束在线监测[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1534001.  
Hu Z, Hong C X, Hua W Q, et al. Online monitoring of hard X-ray beam at SSRF[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1534001.
- [4] Han K, Sakhatskyi K, Jin J C, et al. Seed-crystal-induced cold sintering toward metal halide transparent ceramic scintillators[J]. Advanced Materials, 2022, 34(17): 2110420.
- [5] Ma J J, Zhu W J, Lei L, et al. Highly efficient NaGdF<sub>4</sub>:Ce/Tb nanoscintillator with reduced afterglow and light scattering for high-resolution X-ray imaging[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(37): 44596-44603.
- [6] Zhou Q, Ren J W, Xiao J W, et al. Highly efficient copper halide scintillators for high-performance and dynamic X-ray imaging[J]. Nanoscale, 2021, 13(47): 19894-19902.
- [7] 龚建伟, 陈兵. 间接式 X 射线探测器的核心器件及其耦合方式[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7): 0700003.  
Gong J W, Chen B. Core devices and coupling modes of indirect X-ray detectors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(7): 0700003.
- [8] 陈建文, 高鸿奕, 谢红兰, 等. X 射线探测技术[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(1): 24-30.  
Chen J W, Gao H Y, Xie H L, et al. X-ray detectors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2003, 40(1): 24-30.
- [9] Han L L, Zhang H, Ning Y Y, et al. Environmentally stable one-dimensional copper halide based ultra-flexible composite film for low-cost X-ray imaging screens[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430: 132826.
- [10] Li N, Xu Z W, Xiao Y R, et al. Flexible, high scintillation yield Cu<sub>3</sub>Cu<sub>2</sub>I<sub>5</sub> film made of ball-milled powder for high spatial resolution X-ray imaging[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(5): 2102232.
- [11] He D B, Yu C L, Cheng J M, et al. Effect of Tb<sup>3+</sup> concentration and sensitization of Ce<sup>3+</sup> on luminescence properties of terbium doped phosphate scintillating glass [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(5): 1906-1909.
- [12] Chen S Y Z, Wen Z X, Peng X S, et al. Transparent heavily Eu<sup>3+</sup>-doped borosilicate glass for X-ray detection [J]. Ceramics International, 2022, 48(1): 947-952.
- [13] 魏荣妃, 陈尾平, 彭秀莎, 等. Tb<sup>3+</sup> 掺杂含 Gd<sub>4.67</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>O

- 纳米晶微晶玻璃的闪烁性能[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(2): 265-269.
- Wei R F, Chen W P, Peng X S, et al. Scintillating property of Tb<sup>3+</sup> doped bulk dense glass ceramics containing Gd<sub>4.67</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>O nanocrystals[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(2): 265-269.
- [14] Zhang Y, Ding N, Zheng T, et al. Effects of Ce<sup>3+</sup> sensitizer on the luminescent properties of Tb<sup>3+</sup>-activated silicate oxyfluoride scintillating glass under UV and X-ray excitation[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2016, 441: 74-78.
- [15] Mao W, Xie W Q, Li P P, et al. Double relaxation emission of Sn<sup>2+</sup> activator in tin fluorophosphate glass for optoelectronic device applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 399: 125270.
- [16] Masai H, Suzuki Y, Yanagida T, et al. Luminescence of Sn<sup>2+</sup> center in ZnO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses melted in air and Ar conditions[J]. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 2015, 88(8): 1047-1053.
- [17] Zhang L B, Sun Q, Wang J T, et al. Effect of SrO content on microstructure of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO-BaO-SrO low-melting glass frit and joining performance of sodalime glass substrates[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 872: 159707.
- [18] 蒋小波, 邹雅, 韩帅, 等. Sn<sup>2+</sup> 掺杂高 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 硼硅酸盐玻璃的辐照发光性能[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0816002.
- Jiang X B, Zou Y, Han S, et al. Radioluminescence properties of Sn<sup>2+</sup>-doped borosilicate glass with high Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0816002.
- [19] Yang K, Zheng S P, Jiang X B, et al. Luminescence and scintillation of high silica glass containing SnO[J]. Materials Letters, 2017, 204: 5-7.
- [20] Wei R F, Ma C G, Wei Y L, et al. Tunable white luminescence and energy transfer in novel Cu<sup>+</sup>, Sm<sup>3+</sup> co-doped borosilicate glasses for W-LEDs[J]. Optics Express, 2012, 20(28): 29743-29750.
- [21] Qiu Z H, Wang S H, Wang W Q, et al. Polymer composites entrapped Ce-doped LiYF<sub>4</sub> microcrystals for high-sensitivity X-ray scintillation and imaging[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(26): 29835-29843.
- [22] Wang X, Shi H F, Ma H L, et al. Organic phosphors with bright triplet excitons for efficient X-ray-excited luminescence[J]. Nature Photonics, 2021, 15(3): 187-192.
- [23] Chen W P, Cao J K, Hu F F, et al. Highly efficient Na<sub>5</sub>Gd<sub>3</sub>F<sub>32</sub>: Tb<sup>3+</sup> glass ceramic as nanocomposite scintillator for X-ray imaging[J]. Optical Materials Express, 2017, 8(1): 41-49.
- [24] Teng L M, Zhang W N, Chen W P, et al. Highly efficient luminescence in bulk transparent Sr<sub>2</sub>GdF<sub>7</sub>: Tb<sup>3+</sup> glass ceramic for potential X-ray detection[J]. Ceramics International, 2020, 46(8): 10718-10722.
- [25] 胡芳芳, 龚海林, 王杰, 等. NaY<sub>2</sub>F<sub>7</sub>: Eu<sup>3+</sup>/Eu<sup>2+</sup> 透明微晶玻璃的结构和光谱性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(15): 1516020.
- Hu F F, Gong H L, Wang J, et al. Structure and spectral properties of NaY<sub>2</sub>F<sub>7</sub>: Eu<sup>3+</sup>/Eu<sup>2+</sup> transparent glass-ceramics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(15): 1516020.
- [26] Yang B, Pan W C, Wu H D, et al. Heteroepitaxial passivation of Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> wafers with suppressed ionic migration for X-ray imaging[J]. Nature Communications, 2019, 10: 1989.
- [27] Yoneyama A, Baba R, Kawamoto M. Quantitative analysis of the physical properties of CsI, GAGG, LuAG, CWO, YAG, BGO, and GOS scintillators using 10-, 20- and 34-keV monochromated synchrotron radiation[J]. Optical Materials Express, 2021, 11(2): 398-411.
- [28] Zhao J T, Huang L H, Liang T Y, et al. Luminescent properties of Eu<sup>3+</sup> doped heavy tellurite scintillating glasses[J]. Journal of Luminescence, 2019, 205: 342-345.
- [29] Han T T, Sun X Y, Lai X Q, et al. Role of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on tailoring structural and optical properties of Tb<sup>3+</sup>-activated borogermanate-tellurite glasses[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2021, 189: 109734.
- [30] Wantana N, Kaewjaeng S, Kothan S, et al. Energy transfer from Gd<sup>3+</sup> to Sm<sup>3+</sup> and luminescence characteristics of CaO-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> scintillating glasses[J]. Journal of Luminescence, 2017, 181: 382-386.
- [31] Griscom D L. Trapped-electron centers in pure and doped glassy silica: a review and synthesis[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2011, 357(8/9): 1945-1962.
- [32] Griscom D L. A minireview of the natures of radiation-induced point defects in pure and doped silica glasses and their visible/near-IR absorption bands, with emphasis on self-trapped holes and how they can be controlled[J]. Physics Research International, 2013, 2013: 379041.
- [33] Hu T, Ning L X, Gao Y, et al. Glass crystallization making red phosphor for high-power warm white lighting [J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 56.