

文章编号: 1004-4353 (2024) 02-0015-08

近红外 $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ 荧光粉特性及能量传递

蒋尧庚, 田莲花

(延边大学 理学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 采用高温固相法制备了一种共掺 Cr^{3+} 和 Yb^{3+} 的 $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ 荧光粉. 通过 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜和光致发光光谱对荧光粉的物相纯度、化学组成和发光性能进行表征. 结果显示: 当以 Cr^{3+} 的 $^4\text{A}_2 \rightarrow ^4\text{T}_1$ 激发位置 (468 nm) 激发 Cr^{3+} 和 Yb^{3+} 共掺杂的 $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ 荧光粉时, $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ 荧光粉的发射光谱中同时出现了 Cr^{3+} 和 Yb^{3+} 的发射峰, 这表明在 $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ 基质中存在 $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的能量传递. 样品中 Yb^{3+} 的发射范围在 950 ~ 1100 nm, 与晶体硅 (c-Si) 太阳能电池的光谱响应区域相匹配. 提高 Cr^{3+} 的掺杂浓度, 不仅能够增强 Yb^{3+} 的发光强度, 而且样品在 207 °C 下的光强度为初始发光强度的 82.1%. 研究结果可为 $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ 荧光粉在 c-Si 太阳能电池光谱转换提高效率提供借鉴与参考.

关键词: 稀土离子; 近红外发光; 太阳能电池; 能量传递; 荧光粉

中图分类号: O482.31

文献标志码: A

Luminescence properties and energy transfer of near-infrared $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ phosphor

JIANG Yaogeng, TIAN Lianhua

(College of Science, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: In this paper, phosphor $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ co-doped with Cr^{3+} and Yb^{3+} was prepared by high temperature solid-phase method. X-ray diffractometer, scanning electron microscope and photoluminescence spectroscopy were used to characterize the physical phase purity, chemical composition and luminescence properties of the phosphor. The results show that the emission spectra of Cr^{3+} and Yb^{3+} co-doped $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ phosphor exhibits both of Cr^{3+} and Yb^{3+} emission peaks with excitation wavelength of 468 nm which is contributed to the $^4\text{A}_2 \rightarrow ^4\text{T}_1$ transition of Cr^{3+} , the emission peaks of Cr^{3+} and Yb^{3+} appeared in the $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ phosphor at the same time, which indicates that there is an energy transfer of $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ in the $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ host. The emission of Yb^{3+} in the phosphor is in the range of 950—1100 nm, which matches the spectral response region of crystalline silicon (C-Si) solar cells. The luminescence intensity of Yb^{3+} can be enhanced by increasing the doping concentration of Cr^{3+} , and the phosphor can still maintain 82.1% of the initial luminescence intensity at a temperature of 207 °C. The results of this study can provide a good reference for the study of strategy to improve the spectral conversion efficiency of $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ phosphor in C-Si solar cells.

Keywords: rare earth ions; near-infrared luminescence; solar cells; energy transfer; phosphor

0 引言

太阳能电池由于具有清洁、环保、可再生等优点, 目前已经成为新能源产业的重要发展方向. 其中, 硅基太阳能电池因其具有原材料丰富、技术相对成熟、转换效率高和可靠性好等特点, 目前已被广泛应

投稿日期: 2024-01-23

第一作者: 蒋尧庚 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为发光学.

通信作者: 田莲花 (1972—), 女, 博士, 教授, 研究方向为发光学.

用^[1]。但由于硅基太阳能电池的光谱响应区域与地球表面太阳辐射的光谱之间存在能量失配问题,因此导致其产生的大部分能量会出现损失(约 70%)^[2]。解决上述问题较为有效的方法是将具有转换发射的荧光粉整合到太阳能电池中,使太阳光谱中能量中占比较大的长短波的光被转换为能被 c-Si 太阳能电池有效吸收的近红外光,从而提升太阳能电池能量的转换效率^[3]。近年来,一些学者研究了近红外下转换荧光粉的发光,结果表明:荧光粉中许多过渡金属离子(Cr^{3+} 、 Mn^{4+} 、 Fe^{3+} 、 Ni^{2+} 等)和稀土离子(Yb^{3+} 、 Pr^{3+} 、 Er^{3+} 、 Nd^{3+} 等)被用于激活剂^[4-7]。但是,这些荧光粉仍然存在发光效率较低、热稳定性较差和发射波长较短等问题。

研究显示:稀土离子 Yb^{3+} 具有简单的能级结构(只有 2 个能级,分别是基态 $^2\text{F}_{7/2}$ 和激发态 $^2\text{F}_{5/2}$),且基态和激发态之间的带隙差较小(位于基态的电子可以在较小的能量激发下直接被激发到激发态),所以其可以产生 1000 nm 左右的典型发射^[8]。过渡金属离子 Cr^{3+} 在近紫外和可见光谱范围内,由于具有较宽的吸收带(归因于其自旋允许的 $^4\text{A}_2 \rightarrow ^4\text{T}_2$ 和 $^4\text{A}_2 \rightarrow ^4\text{T}_1$ 跃迁),因此可作为敏化剂来提升荧光粉的激发效率^[9]。由于单掺 Yb^{3+} 的荧光粉的 $4f-4f$ 跃迁被禁阻,因此该荧光粉难以有效地吸收紫外—可见光。2014 年, Xu 等^[10]首次研究了 $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}:\text{Cr}^{3+}$ 荧光粉,发现其具有近红外长余辉宽带发射(650 ~ 950 nm)特性。随后,其他学者对 $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}:\text{Cr}^{3+}$ 荧光粉做进一步研究。结果表明, $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}:\text{Cr}^{3+}$ 荧光粉的较宽发射带与 Yb^{3+} 的激发位置高度匹配,通过共掺杂 Cr^{3+} 和 Yb^{3+} 可能会弥补单掺 Yb^{3+} 的不足^[11-14]。基于上述研究,本文采用传统的高温固相法合成了一种 $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}:\text{Cr}^{3+}$, Yb^{3+} 新型荧光粉(以下简称 $\text{SGO}:\text{Cr}^{3+}$, Yb^{3+}),并通过对其荧光光谱和荧光寿命进行测量,验证了该荧光粉中存在 Cr^{3+} 和 Yb^{3+} 间的能量传递。

1 实验

1.1 荧光粉制备

1) 实验原料: SrCO_3 、 Ga_2O_3 、 Cr_2O_3 、 Yb_2O_3 , 均为阿拉丁公司生产(质量分数为 99.99%)。采用高温固相法,合成系列 $\text{SrGa}_{11.97}\text{O}_{19}: 0.03\text{Yb}^{3+}$, $\text{SrGa}_{11.89-x}\text{O}_{19}: 0.11\text{Cr}^{3+}$, $x\text{Yb}^{3+}$ ($x=0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.07$) 荧光粉。

2) 制备过程: 按照化学计量比称量原料后,将所有原料放在玛瑙研钵中研磨 30 min(形成均匀的粉末);将混合物在 1000 °C 的环境加热 4 h;冷却至室温,再次研磨 10 min,而后在 1400 °C 的环境气氛中加热 6 h;冷却至室温后再次研磨 15 min,所得粉末即为 $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}: \text{Cr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}/\text{Cr}^{3+}$, Yb^{3+} 荧光粉。

1.2 样品表征

样品的 X 射线衍射(XRD)图谱,利用粉末衍射仪(D/max-2200/PC,日本 Rigaku 公司)测得,辐射源为 $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$)。样品的元素映射图,利用场发射扫描电子显微镜(SU-8010 型,日本日立公司)测得。样品的光致发光光谱(PL)、光致发光激发光谱(PLE)、衰减曲线和变温发光光谱,利用 FLS-1000 光谱仪(英国爱丁堡仪器公司)和 450 W 氙灯测得。

2 结果与讨论

2.1 材料与合成

$\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ 为六方结构,空间群为 $P 63/mmc$,晶格参数为 $a=b=5.7940 \text{ \AA}$, $c=22.8160 \text{ \AA}$ 。另外,在 $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ 的晶格中,锶原子具有 12 配位,镓原子则具有 4 配位、5 配位和 6 配位^[15]。由于 Cr^{3+} (0.615 \AA)、 Yb^{3+} (0.868 \AA) 和 Ga^{3+} (0.620 \AA , CN=6) 具有相似的离子半径,且过渡金属离子在大多数氧化物晶体中具有 6 配位^[16],因此在 SGO 基质中掺杂 Cr^{3+} 和 Yb^{3+} 后,这些离子更倾向于占据 6 配位镓的格位。

图 1 为 PDF 号 04-007-4917 标准卡和所制备样品的 XRD 图谱. 对比二者, 可知样品的 XRD 图谱与标准图谱相匹配, 没有出现明显的杂峰. 结果说明, 掺杂 Cr^{3+} 和 Yb^{3+} 后, SGO 基质的晶体结构并未发生明显改变.

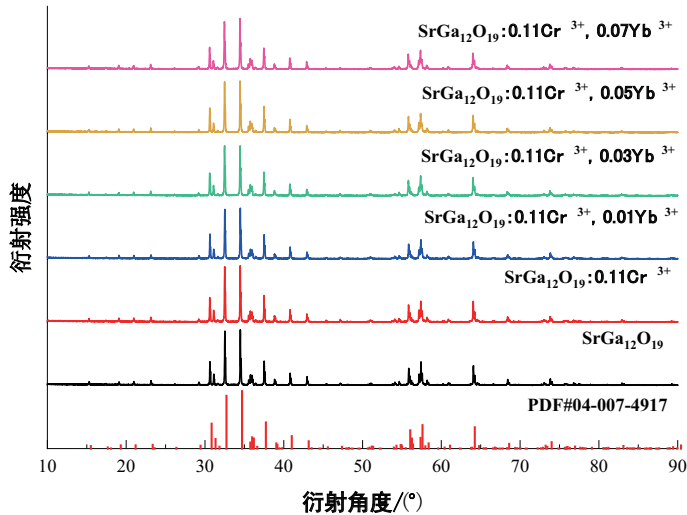


图 1 SGO 基质和 $\text{SGO}:0.11\text{Cr}^{3+}, x\text{Yb}^{3+}(x)$ 的 XRD 图谱

$\text{SGO}:0.11\text{Cr}^{3+}, 0.03\text{Yb}^{3+}$ 的 SEM 图及其元素映射图, 见图 2. 由图可以看出, 样品由多边形的不规则颗粒组成, 表面光滑, 且 Sr、Ga、O、Cr 和 Yb 等元素在样品中均匀分布.

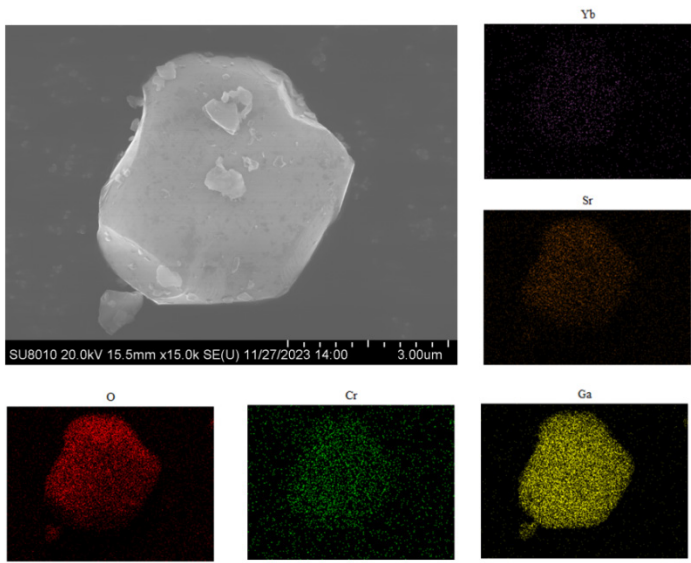


图 2 $\text{SGO}:0.11\text{Cr}^{3+}, 0.03\text{Yb}^{3+}$ 的 SEM 图和元素映射图

2.2 光致发光性能

图 3 为 $\text{SGO}:0.11\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{SGO}:0.03\text{Yb}^{3+}$ 和 $\text{SGO}:0.11\text{Cr}^{3+}, 0.03\text{Yb}^{3+}$ 在室温下的激发光谱 (黑色) 和发射光谱 (红色). 由图 3 (a) 可以看出: 对于单掺 Cr^{3+} 的样品, 在其激发光谱中有 3 个激发带, 分别归属于基质吸收、 Cr^{3+} 离子的 $^4\text{A}_2 \rightarrow ^4\text{T}_1$ 跃迁和 $^4\text{A}_2 \rightarrow ^4\text{T}_2$ 跃迁. 当激发波长为 468 nm 时, 样品在 600—950 nm 处出现了 1 个的宽发射带, 归属于 Cr^{3+} 的 $^4\text{T}_2 \rightarrow ^4\text{A}_2$ 跃迁^[17]. 由图 3 (b) 可以看出: 在单掺 Yb^{3+} 样品的激发光谱中有 3 个激发峰, 分别位于 894、938 和 979 nm (属于 Yb^{3+} 的特征激发位置), 这些峰归属于样品 Yb^{3+} 离子自旋禁阻的 $^2\text{F}_{7/2} \rightarrow ^2\text{F}_{5/2}$ 跃迁. 在 894 nm 波长的激发下, 样品在 1002 nm 和 1085 nm 处分别有 1 个发射带, 该发射带归属于样品自旋禁阻的 $^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$ 跃迁^[18-19]. 由图 3 (c) 可以看出, 对于共掺 Cr^{3+} 和

Yb^{3+} 的样品, 当以 Yb^{3+} 的 1002 nm 的发射波为监测波长时, 其激发光谱除了存在 Yb^{3+} 的激发峰之外, 还出现了 Cr^{3+} 的激发峰. 当以 Cr^{3+} 的 468 nm 激发位置为激发波长时, 其发射光谱除了存在 Cr^{3+} 的发射峰之外, 还出现了 Yb^{3+} 的发射峰, 且 Cr^{3+} 的发射带和 Yb^{3+} 离子的激发带出现了部分重叠, 见图 3 (a) 和图 3 (b). 以上结果表明, Cr^{3+} 和 Yb^{3+} 共掺到 SGO 基质后, 发生了 $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的能量传递.

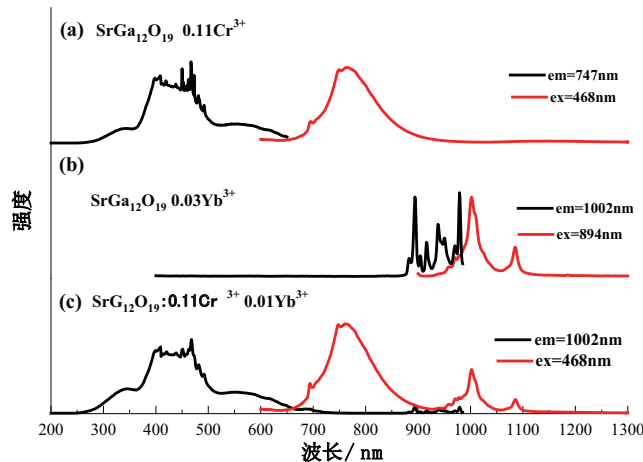


图 3 SGO:0.11Cr³⁺、SGO:0.03Yb³⁺、SGO:0.11Cr³⁺, 0.03Yb³⁺ 的激发(黑)和发射(红)光谱

为进一步验证在 $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}:\text{Cr}^{3+}$, Yb^{3+} 样品中存在 Cr^{3+} 到 Yb^{3+} 的能量传递, 本文分析了 $\text{SrGa}_{11.89-x}\text{O}_{19}:\text{0.11Cr}^{3+}$, $x\text{Yb}^{3+}$ (0.01, 0.03, 0.05, 0.07) 系列样品的激发、发射光谱. 样品的激发光谱, 见图 4. 由图 4 (a) 可以看出, 当以 Yb^{3+} 的 1002 nm 的发射波为监测波长时, 样品的激发效果随着 Yb^{3+} 的掺杂浓度的提高而逐渐增强. 由图 4 (b) 可以看出: 随着样品中 Yb^{3+} 掺杂浓度的提高, Cr^{3+} 在 747 nm 处的发射强度逐渐下降, 而 Yb^{3+} 在 1002 nm 处的发射强度逐渐增强. 当 Yb^{3+} 的掺杂浓度达到 0.03 时, Yb^{3+} 的发射强度达到最大值, 并随后发生了浓度猝灭现象. 上述结果进一步证明, 在 $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}:\text{Cr}^{3+}$, Yb^{3+} 荧光粉中存在 $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的能量传递.

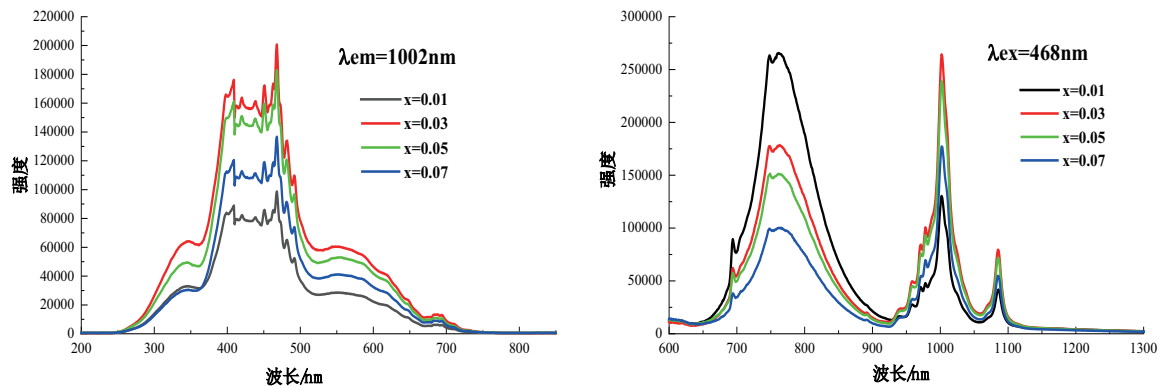
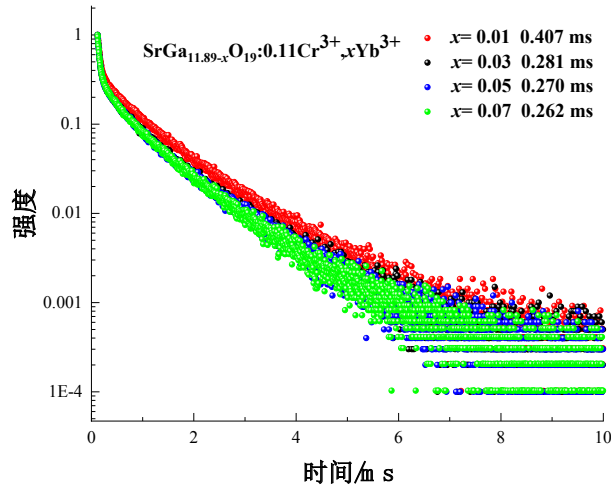


图 4 (a) SGO:0.11Cr³⁺, $x\text{Yb}^{3+}(x)$ 的激发光谱

(b) SGO:0.11Cr³⁺, $x\text{Yb}^{3+}(x)$ 的发射光谱

SGO:0.11Cr³⁺, $x\text{Yb}^{3+}$ ($x = 0.01, 0.03, 0.05, 0.07$) 系列荧光粉在 468 nm 激发下和 747 nm 监测下的衰减曲线如图 5 所示.

图5 SGO:0.11Cr³⁺, xYb³⁺(x) 荧光粉的衰减曲线

由图5可以看出,所有样品的衰减曲线均可采用以下二阶指数方程进行拟合^[20]:

$$I(t) = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + I_0 \quad (1)$$

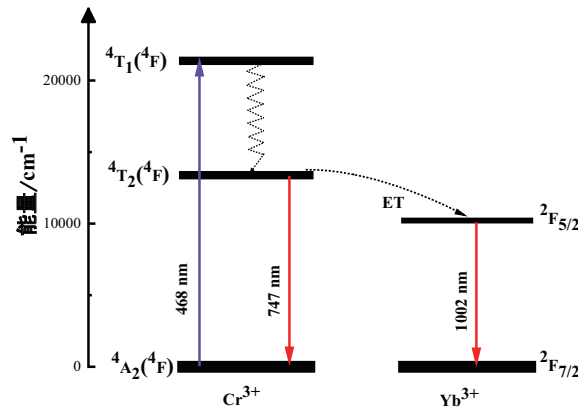
其中: $I(t)$ 为发射强度; A_1 、 A_2 和 I_0 是拟合得到的常数; τ_1 和 τ_2 分别为短衰减时间和长衰减时间.

根据拟合所得结果和平均衰减时间计算公式:

$$\left(\bar{\tau} = \frac{A_1 \tau_1^2 + A_2 \tau_2^2}{A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2} \right) \quad (2)$$

经计算,得到平均衰减时间分别为 0.407、0.281、0.270 和 0.262ms. 这表明,在样品中 Cr³⁺ 的衰减时间随 Yb³⁺ 离子掺杂浓度的提高而逐渐降低. 该结果进一步表明,在 SrGa₁₂O₁₉:Cr³⁺, Yb³⁺ 荧光粉中存在 Cr³⁺ → Yb³⁺ 的能量传递.

在 SGO 基质中, Cr³⁺ 到 Yb³⁺ 的能量传递示意图如图6所示. 由图6可以看出,当 Cr³⁺ 被 468 nm 蓝光激发时,电子从基态 ⁴A₂(⁴F) 被提升到激发态 ⁴T₁(⁴F); 在 ⁴T₁(⁴F) 上处于激发态的电子则通过无辐射跃迁被弛豫到最低激发态 ⁴T₂(⁴F). 其中,一部分电子通过辐射跃迁返回到 Cr³⁺ 的基态 ⁴A₂(⁴F) 上,在 747 nm 处产生近红外发射; 而另一部分电子则首先通过能量传递过程跃迁到与 Cr³⁺ 的激发态 ⁴T₁(⁴F) 相近的 Yb³⁺ 的 ²F_{5/2} 激发态上,然后再通过辐射跃迁到 Yb³⁺ 的基态 ²F_{7/2} 上,由此在 1002 nm 处产生了近红外发射.

图6 SGO:Cr³⁺, Yb³⁺ 中 Cr³⁺ 到 Yb³⁺ 的能量传递示意图

为了判断样品的热稳定性,对 SGO:0.11Cr³⁺, 0.03Yb³⁺ 样品的发射光谱随温度变化情况进行了分析,见图7. 由图7(a)可以看出,在 468 nm 激发下,样品的发光强度随着温度的上升而逐渐下降. 由图7(b)

可以看出,当温度从 $-193\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $207\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, Cr^{3+} 在 747 nm 处的发光强度下降了 69.9% , 这表明样品中 Cr^{3+} 的热稳定性较差. 其原因为: Cr^{3+} 具有高度敏感的 $d-d$ 跃迁, 因此易受晶格振动的影响, 进而使得其热稳定性较差^[21]. 由图 (c) 可以看出, Yb^{3+} 在 $950\text{--}1100\text{ nm}$ 的发射强度仍能保持初始发射强度的 82.1% , 这表明 Yb^{3+} 在 SGO 中具有良好的热稳定性. 其原因为: Yb^{3+} 具有 2 个相距较远 (约为 10000 cm^{-1}) 的独特能级 $^2\text{F}_{7/2}$ 和 $^2\text{F}_{5/2}$, 且无多声子非辐射弛豫, 因此其发射不易受到晶格振动的影响^[22], 从而使得 Yb^{3+} 离子的近红外发光具有良好的热稳定性.

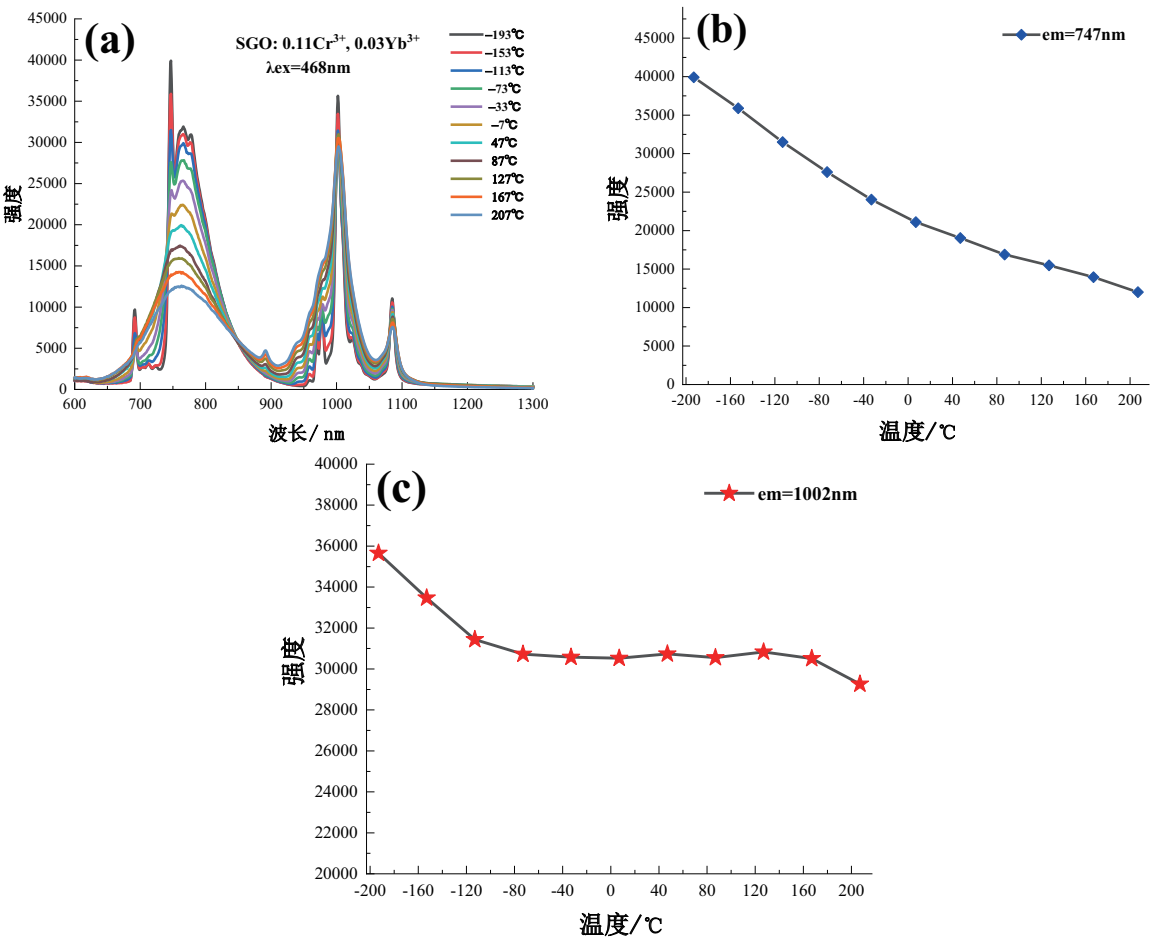


图 7 SGO:0.11Cr³⁺, 0.03Yb³⁺ 的变温发射光谱 (a)、Cr³⁺ 的 (b) 和 Yb³⁺ (c) 的发光强度随温度的变化情况

2.3 SGO:*x*Cr³⁺, *y*Yb³⁺ 荧光粉的应用探讨

图 8 为 AM1.5G 太阳光谱、c-Si 太阳能电池的光谱响应曲线和 SGO:0.11Cr³⁺, 0.03Yb³⁺ 荧光粉的激发光谱和发射光谱 (在 $200\text{--}1600\text{ nm}$ 波长范围内). 由图 8 可以看出: 在样品的激发光谱和太阳光谱中, 二者在占比较大的紫外-可见光区域具有良好的匹配度; 样品的发射光谱所对应的波段和 c-Si 太阳能电池的光谱响应曲线所对应的波段高度重叠. 这表明, SGO:0.11Cr³⁺, 0.03Yb³⁺ 可能具有提高 c-Si 太阳能电池光伏转换效率的作用.

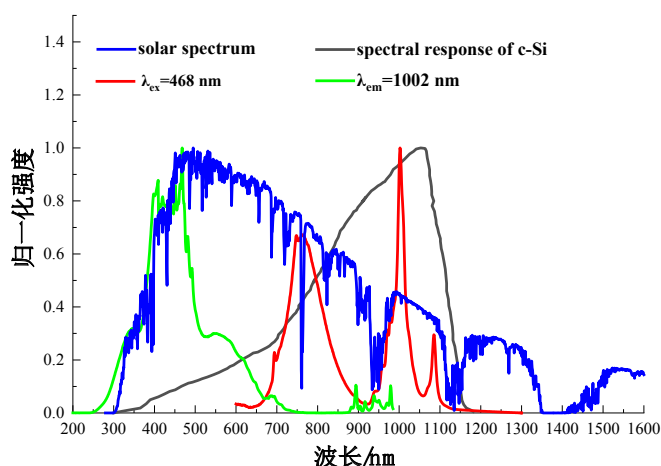


图8 AM1.5G 太阳光谱(蓝)、c-Si 太阳能电池的光谱响应曲线(黑)、
 $\text{SGO}:0.11\text{Cr}^{3+}, 0.03\text{Yb}^{3+}$ 的激发光谱(绿)和发射光谱(红)

3 结语

利用 XRD 测试表明, 本文利用高温固相法制备的具有 NIR 发光的新型 $\text{SGO}:\text{Cr}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 荧光粉为纯相。在 SGO 基质中共掺 $\text{Cr}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 后, 存在 $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的能量传递, 且样品共掺 $\text{Cr}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 与单掺 Cr^{3+} 的相同地从紫外到可见光区域的宽吸收范围, 即能够产生有效的近红外发射。随着 Yb^{3+} 掺杂浓度的提高, Yb^{3+} 在 1002 nm 处的发光强度逐渐增强, 而 Cr^{3+} 的发光强度和衰减时间均呈现下降趋势。结果进一步证实: 在 $\text{SrGa}_{12}\text{O}_{19}$ 中存在 $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+}$ 的能量传递存在。另外, 由 $-193\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $207\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变温发射光谱的测试表明, 样品在 950 ~ 1100 nm 范围内的发射具有良好的热稳定性, 且在 $207\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下其发光强度为初始发光强度的 82.1%。上述研究结果可为 $\text{SGO}:\text{Cr}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 荧光粉在 c-Si 太阳能电池光谱转换效率的提高策略研究方面提供参考。

参考文献:

- [1] DAMBHARE M V, BUTEY B, MOHARIL S V. Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1913(1): 012053.
- [2] MUTHU S, GANDHI M B, MEENAKSHISUNDARAM S P, et al. A review on the applicability of luminescent phosphors and effective positioning in dye - sensitized solar cells for enhanced performance and stability[J]. Solar RRL, 2023, 7(22): 2300510.
- [3] HUANG X, HAN S, HUANG W, et al. Enhancing solar cell efficiency: the search for luminescent materials as spectral converters[J]. Chemical Society Reviews, 2013, 42(1): 173-201.
- [4] CHENG K, HUANG W, LIU X, et al. Cr^{3+} -free broadband near-infrared phosphors $\text{NaAl}_5\text{O}_8: \text{Fe}^{3+}$ [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 964: 171240.
- [5] LU X, GAO Y, CHEN J, et al. Long-wavelength near-Infrared divalent Nickel-Activated double-perovskite Ba_2MgWO_6 phosphor as imaging for human fingers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(33): 39472-39479.
- [6] HUANG W T, RAJENDRAN V, CHAN M H, et al. Near - infrared windows I and II phosphors for theranostic applications: spectroscopy, bioimaging, and light - emitting diode photobiomodulation[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 11(11): 2202061.
- [7] ZHANG X, YOU W, PAN G, et al. Research progress of rare earth/transition metal ions doped NIR luminescent

- materials[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(27): 3614-3633.
- [8] GAO T, LIU Y, LIU R, et al. Research progress and development of near-infrared phosphors[J]. Materials, 2023, 16(8): 3145.
- [9] ZHANG Q, LIU D, WANG Z, et al. $\text{LaMgGa}_{11}\text{O}_{19}:\text{Cr}^{3+}, \text{Ni}^{2+}$ as blue-light excitable near-infrared luminescent materials with ultra-wide emission and high external quantum efficiency[J]. Advanced Optical Materials, 2023, 11(6): 2202478.
- [10] XU J, HEN D, YU Y, et al. $\text{Cr}^{3+}:\text{SrGa}_2\text{O}_9$: A broadband near-infrared long-persistent phosphor[J]. Chemistry—An Asian Journal, 2014, 9(4): 1020-1025.
- [11] HUANG D, OUYANG Q, XIAO H, et al. Cr, Yb -codoped $\text{Ca}_2\text{LaHf}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$ garnet phosphor: electronic structure, broadband NIR emission and energy transfer properties[J]. Dalton Transactions, 2021, 50(3): 908-916.
- [12] WANG C, JIN Y, YUAN L, et al. Highly efficient and thermally stable broadband NIR phosphors by rationally bridging $\text{Cr}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$ in $\text{LiScGe}_2\text{O}_6$ for optical bioimaging[J]. Inorganic Chemistry Frontiers, 2023, 10(3): 860-868.
- [13] LU Z, LIU Y, CHEN S, et al. Improved Near-Infrared Luminescence Properties of $\text{LiScSi}_2\text{O}_6: \text{Cr}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ Phosphors via Efficient Energy Transfer[J]. ACS Applied Optical Materials, 2023, 1(6): 1097-1103.
- [14] LU Z, CHEN S, LIU Y, et al. $\text{LiGaP}_2\text{O}_7:\text{Cr}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ phosphors for broadband NIR LEDs toward multiple applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 956: 170311.
- [15] YU S, WEI Z, WU J, et al. Design and tuning Cr^{3+} -doped near-infrared phosphors for multifunctional applications via crystal field engineering[J]. Dalton Transactions, 2022, 51(6): 2313-2322.
- [16] HUANG W T, CHEN K C, HUANG M H, et al. Tunable Spinel Structure Phosphors: Dynamic Change in Near-Infrared Windows and Their Applications[J]. Advanced Optical Materials, 2023, 11(23): 2301166.
- [17] FANG S, LI Y, CAI P, et al. Strong electron-phonon coupling of Cr^{3+} ion provides an opportunity for superior sensitivity cryogenic sensing[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 158: 108844.
- [18] ZHAO F, CAI H, SONG Z, et al. Structural Confinement toward Controlling Energy Transfer Path for Enhancing Near-Infrared Luminescence[J]. Chemistry of Materials, 2021, 33(21): 8360-8366.
- [19] TAMRAKAR R K, UPADHYAY K, BISEN D P. Variation in luminescence behavior of Yb^{3+} doped GdAlO_3 phosphor with gradual increase in Yb^{3+} concentration[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 75: 160-167.
- [20] CHEN M, FAN H, LU Z, et al. Energy transfer realizes efficient NIR emitting $\text{Ca}_2\text{ScTaO}_6: \text{Cr}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ perovskite-structured phosphors[J]. Ceramics International, 2023, 49(10): 15717-15725.
- [21] JIA Z, YUAN C, LI R, et al. Electron-phonon coupling mechanisms of broadband near-infrared emissions from Cr^{3+} in the $\text{Ca}_3\text{Sc}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ garnet[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2020, 22(18): 10343-10350.
- [22] LIU Y, HE S, WU D, et al. Broadband NIR garnet phosphors with improved thermal stability via energy transfer[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2022, 4(2): 643-650.