第 49 卷第 9 期
2021 年 9 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 9
September，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210215

利用助熔剂硼酸延长 $SrAl_2Si_2O_8:Eu^{2+}$, Dy^{3+}荧光粉的余辉长度

杨举聿[1]，于灏君[1]，刘艳改[1]，陈 健[2]，米瑞宇[1]，卜小雅[1]，谢赐桉[1]，黄朝晖[1]

(1. 中国地质大学(北京)材料科学与工程学院，非金属材料和固废资源材料利用北京市重点实验室，北京 100083；
2. 北京大学科学研究部，北京 100871)

摘 要：通过高温固相反应法合成具有锶长石结构的层状 $SrAl_2Si_2O_8:Eu^{2+}$, Dy^{3+}荧光粉。结果表明：该荧光粉可被 276 nm 的紫外光激发，产生 1 个峰值在 426 nm 的宽发射带。共掺杂的 Dy^{3+}进入陷阱中心，不影响晶体结构和发射峰位置变化，帮助促进持续的发光。$SrAl_2Si_2O_8:Eu^{2+}$, Dy^{3+}荧光粉具有出色的热稳定性，在 200 ℃时可保持 90.5%的初始发光强度。H_3BO_3 助熔剂的添加不会影响荧光粉的晶体结构，并且帮助提高发光强度并延长余辉寿命。加入助熔剂后，荧光粉寿命可以达到 122.3 s，量子效率提高 30.2%。$SrAl_2Si_2O_8:Eu^{2+}$, Dy^{3+}荧光粉在未来长余辉发光二极管(Light Emitting Diodes, LED)领域中具有发展潜力。

关键词：硼酸；助熔剂；长余辉；余辉寿命
中图分类号：O482.31　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)09–1994–07
网络出版时间：2021–04–27

Extend Afterglow Time of $SrAl_2Si_2O_8$: Eu^{2+}, Dy^{3+} Phosphor by Adding Boric Acid as Flux

YANG Juyu[1], *YU Haojun*[1], *LIU Yangai*[1], *CHEN Jian*[2], *MI Ruiyu*[1], *BU Xiaoya*[1], *XIE Ci'an*[1], *HUANG Zhaohui*[1]
(1. School of Materials Science and Technology, Beijing Key Laboratory of Materials Utilization of Nonmetallic Minerals and Solid Wastes, National Laboratory of Mineral Materials, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. Office of Scientific Research, Peking University Rd, Beijing 100871, China)

Abstract: Long afterglow phosphors are widely used in fields such as optical storage and photocatalysis. Aluminosilicate has the advantages of good physical and chemical stability, thermal stability, high light conversion rate, low cost and emission bandwidth. The layered $SrAl_2Si_2O_8:Eu^{2+}$, Dy^{3+} phosphors with strontium feldspar structure were synthesized by high-temperature solid-state reaction method. The phosphor can be excited by 276 nm ultraviolet light to produce a broad emission band with a peak at 426 nm. Co-doped Dy^{3+} ions do not affect the crystal structure and emission peak position. Dy^{3+} is imported into the trap center to cause continuous light emission. The phosphor has excellent thermal stability, and it can maintain 90.5% of the initial luminous intensity at 200 ℃. The addition of H_3BO_3 flux does not affect the crystal structure. It improves the luminous intensity and prolongs the afterglow lifetime. After adding the flux, the lifetime can reach 122.3 s, and the quantum efficiency is increased by 30.2%. The luminous characteristics and afterglow lifetime can indicate that $SrAl_2Si_2O_8$: Eu^{2+}, Dy^{3+} phosphors have development potential in the field of long afterglow light emitting diodes (LEDs) in the future.

Keywords: boric acid; flux; long afterglow phosphors; afterglow lifetime

长余辉材料由于其在去除激发光源后能够连续发光的能力[1]而被广泛用于显示器、安全标志、光学存储、传感、光催化、太阳能电池和生物医学成像等应用中[2]。由于材料在其晶格中具有陷阱中心，从而导致材料的产生余辉现象。材料中的电荷载流子被激发并从发光中心溢出，然后被陷阱中心捕获，

收稿日期：2021–03–30。　修订日期：2021–04–13。
基金项目：国家自然科学基金(51772278；52072348；51802004)。
第一作者：杨举聿(1997—)，男，硕士研究生。
通信作者：刘艳改(1972—)，教授。
陈 健(1989—)，助理研究员。

Received date: 2021–03–30.　**Revised date:** 2021–04–13.
First author: YANG Juyu(1997–), male, Master candidate.
E-mail: yjy0122@cugb.edu.cn
Correspondent author: LIU Yangai(1972–), female, Ph.D.,Professor.
CHEN Jian(1989–), male, Ph.D., Assistance Researcher.
E-mail: liuyang@cugb.edu.cn
jch@pku.edu.cn

这导致了发光的衰减或连续发光。当陷阱中心越深时，持续发光的时间就越长[1–3]。自 1996 年发现 Eu^{2+} 活化的铝酸盐长余辉材料，铝酸盐长余辉荧光粉备受关注[4]。

铝硅酸盐因其良好的物理和化学稳定性、良好的热稳定性、高的光转换率、低成本和广泛的发射键而被广泛用于荧光粉基质材料[5]。目前报道的硅铝酸盐体系主要是 $MAl_2Si_2O_8(M = Ca, Sr, Ba)$.[6–8]。Ma 等[9]在还原碳气氛中利用高温固相反应合成了 $SrAl_2Si_2O_8:Ce^{3+}/Tb^{3+}$荧光粉，其遵循偶极–四级相互作用，$Ce^{3+}$和 Tb^{3+}之间存在能量转移。在 365 nm 的激发下，可以通过更改 Ce^{3+}和 Tb^{3+}的比例将 $SrAl_2Si_2O_8:Ce^{3+}/Tb^{3+}$荧光粉的颜色从蓝色调节为绿色。荧光粉的最大能量转移效率为 80.92%，量子效率为 67.37%，同时具有良好的热稳定性。荧光粉在 100 ℃时仍能保持初始强度的 90%，活化能为 0.2352 eV。Dong 等[10]通过在不同环境中进行电纺丝和煅烧制备了 $Ca(Sr)Al_2Si_2O_8:Eu^{2+}/Eu^{3+}$荧光粉，并通过与 Dy^{3+}共掺杂来增强荧光粉的余辉。掺入 Dy^{3+}后，蓝光的发射强度明显增加，发射峰的位置不受影响，同时发现该荧光粉的余辉时间显著延长，其快速和慢速分量的衰减时间分别延长至 21.48 s 和 187.78 s。Noto 等[11]使用 Li_2CO_3 和 Li_2SO_4 助熔剂通过固相反应在 1 200 ℃制备了 $ZnTa_2O_6:Pr^{3+}$荧光粉。研究发现：助熔剂通过抑制 Pr^{4+}的猝灭中心增强了基体对电荷转移态的吸收，并增强了向 Pr^{3+}发光中心的能量转移，从而提高了荧光粉的发光强度。还发现通过促进其他电子俘获中心的形成可以延长余辉时间。Zhai 等[12]通过添加 10%的 H_3BO_3 助熔剂合成了绿色荧光粉 $SrAl_2O_4:Dy^{3+}$，这些荧光粉的余辉时间从 53 s 显著提升到 5538 s，延长近 100 倍。考虑到目前对铝硅酸盐的研究，大多数 $SrAl_2Si_2O_8$ 荧光粉是通过高温固相反应方法制备的。

为了降低反应温度并获得更好的结晶荧光粉，本研究利用 Eu^{2+}/Dy^{3+}共掺杂方法，添加硼酸(H_3BO_3)为助熔剂，合成出具有长余辉性质的 $SrAl_2Si_2O_8:Eu^{2+}, Dy^{3+}$荧光粉。

1　实验

1.1　样品制备

以分析纯的 $SrCO_3$，$Al(OH)_3$，SiO_2，Eu_2O_3，Dy_2O_3 和 H_3BO_3 为原料，在碳粉提供的还原性气氛下通过传统的高温固相法制备 $SrAl_2Si_2O_8:Eu^{2+}, Dy^{3+}$荧光粉。使用分析天平根据所需比例称重原材料，并在玛瑙研钵中研磨。然后，将原料的混合物置于 3 mL 石英坩埚中。用碳粉填充小型石英坩埚，将所有小型坩埚转移到 30 mL 石英坩埚中，然后放入箱式炉中。将混合物在 1 300 ℃烧结 5 h，然后将其自然冷却至室温以获得 $SrAl_2Si_2O_8: Eu^{2+}, Dy^{3+}$荧光粉。

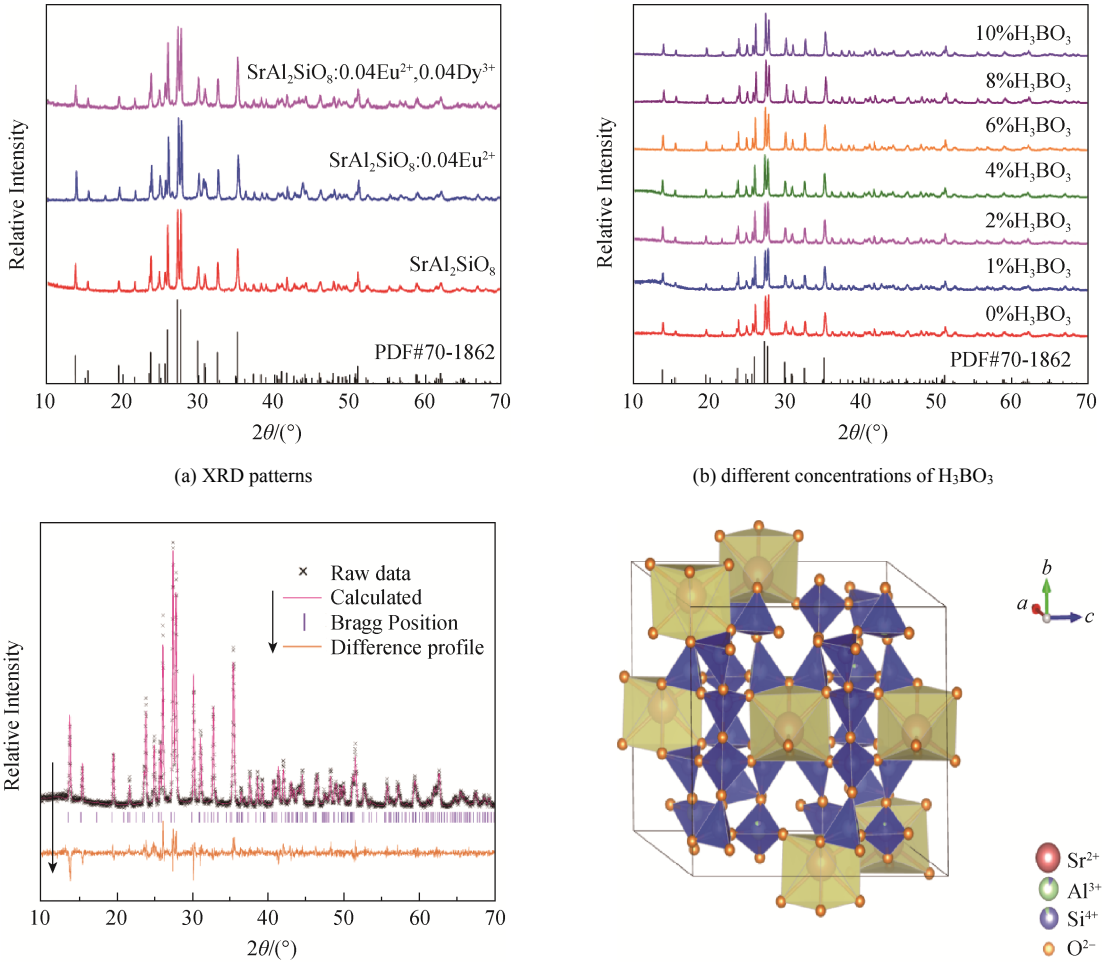
1.2　样品表征

用 D8-Advance 型 X 射线粉末衍射仪分析样品的物相组成，测试条件：Cu 靶，K_α 射线，管电压 40 kV，管电流 100 mA，波长λ=0.154 06 nm，扫描范围为 2θ = 10° ~ 90°，扫描速率为 8(°)/min。用 JSM-IT300 型扫描电子显微镜分析样品的形貌。用 F-4 700 型荧光分光光度计分析样品的激发光谱和发射光谱。用 TBXPS 型分光光度计分析样品的寿命衰减曲线。用 HAMAMATSU 型量子效率检测仪分析样品的量子效率。

2　结果与讨论

2.1　晶体结构分析

图 1 为 $SrAl_2Si_2O_8:Eu^{2+}, Dy^{3+}$荧光粉的 XRD 谱、精修结果以及晶体结构。由图 1a 可见，与标准卡片(JCPDF 70-1862)比对后发现，制备的荧光粉为纯相。由于 Eu^{2+}(r = 0.125 nm，配位数 CN = 8)，Dy^{3+}(r = 0.103 nm，CN = 8)和 Sr^{2+}(r = 0.126 nm，CN = 8)具有相似的离子半径，因此 Eu^{2+}和 Dy^{3+}的掺杂不会影响 $SrAl_2Si_2O_8$ 基质的晶相。由图 1b 可见，荧光粉晶面的衍射峰与 $SrAl_2Si_2O_8$(JCPDF 70-1862)标准卡片上的衍射峰匹配良好。尽管在固相反应中引入了 H_3BO_3 助熔剂，但在其 XRD 谱中未出现与此相关的杂质，这表明 H_3BO_3 浓度对荧光粉的晶相没有影响。但是，随着 H_3BO_3 浓度的增加，衍射峰的半高宽逐渐减小，对比在 27.68°的加入不同 H_3BO_3 助熔剂的衍射峰可以看出半高宽从 0.157 降到了 0.142，表明荧光粉的结晶度通过加入 H_3BO_3 助熔剂得到改善，制备的荧光粉更均匀，更有利于光致发光性能。由图 1c 和表 1 可以看出，$SrAl_2Si_2O_8$ 属于单斜晶系，属于 $C2/c$ 空间群。晶胞参数分别如下：a = 0.839 nm，b = 1.297 nm，c = 1.426 nm，$\alpha=\gamma$=90°，β=115.331°和 V = 1.402 120 nm^3。细化因子最终收敛到 R_{wp} = 14.11%，R_p = 10.88%，拟合优度χ^2 = 1.441。这些数据表明结构精修的结果是可靠的，合成的荧光粉不包含其他杂质晶相。



(a) XRD patterns (b) different concentrations of H_3BO_3

(c) Rietveld structural (d) Crystal structure

图 1 $SrAl_2Si_2O_8:Eu^{2+}$，Dy^{3+}荧光粉的 XRD 谱和晶体结构

Fig. 1 X-ray diffraction patterns and crystal structures of $SrAl_2Si_2O_8:Eu^{2+}$, Dy^{3+} phosphors

表 1 $SrAl_2Si_2O_8$ 晶体 Rietveld 精修的主要细化参数

Table 1 Main parameters of the XRD Rietveld refinement of a $SrAl_2Si_2O_8$ crystal

Space group	*a*/nm	*b*/nm	*c*/nm	*α*/(°)	*β*/(°)	*γ*/(°)	*V*/nm^3	R_{wp}/%	R_p/%	χ^2
*C*2/*c*	0.838 7	1.297 1	1.425 9	90	115.331	90	1.402 120	14.11	10.88	1.441

表 2 为不同原子位置对 $SrAl_2Si_2O_8$ 晶体的影响。图 1d 为 $SrAl_2Si_2O_8$ 的晶体结构，该结构是通过结构细化数据获得的。由表 2 和图 1d 可以看出，$SrAl_2Si_2O_8$ 具有锶长石结构[6,13–14]，[SiO_4]和[AlO_4]四面体共角顶连接形成主干，并与 Sr^{2+}结合形成三维框架结构。基质中只有一个 Sr^{2+}位置，它与 6 个 O^{2-}连接形成[SrO_6]八面体。掺入的 Eu^{2+}和 Dy^{3+}都占据 Sr^{2+}的位置，为了保持电荷平衡，会生成锶空位和 2 个 Dy_{Sr} 位点，形成的缺陷促使产生长余辉现象。

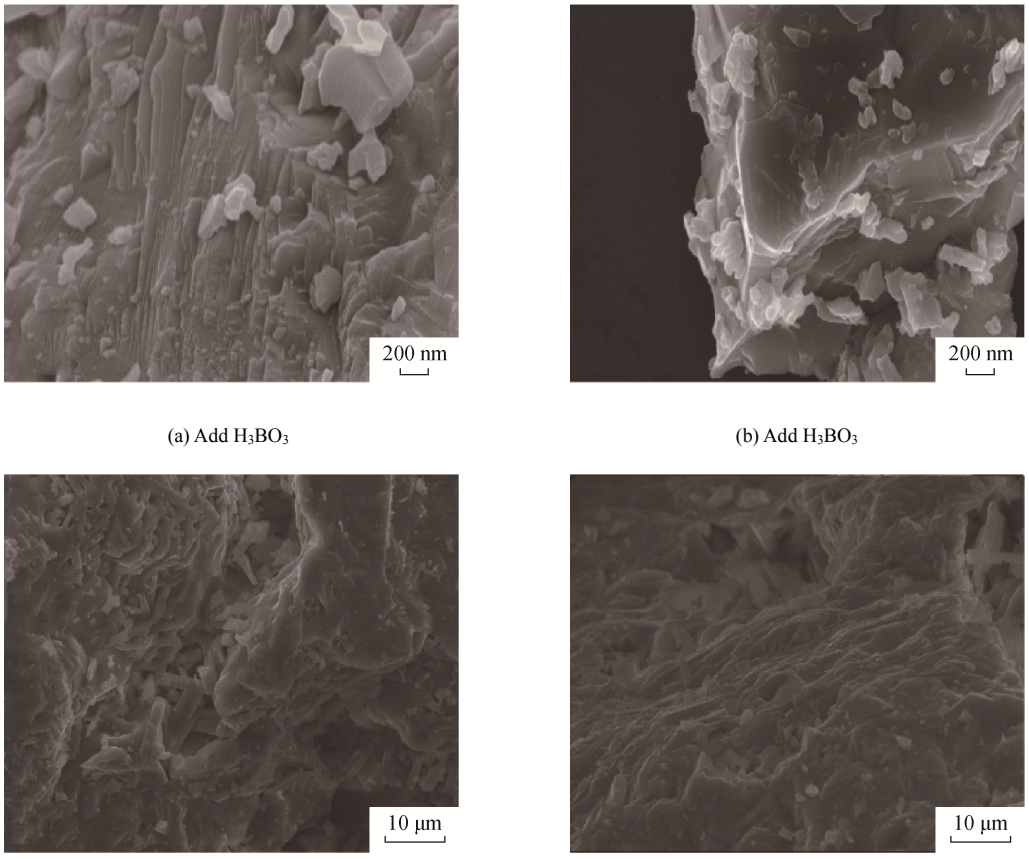
表 2 不同原子占位对 $SrAl_2Si_2O_8$ 晶体的影响

Table 2 Effect of different atomic occupations on the $SrAl_2Si_2O_8$ crystal

Ion	Ion position	*x*	*y*	*z*	Occupancy	Site
Sr	Sr1	0.270 5	-0.003 5	0.065 9	1.0	8*f*
Si	Si1	0.006 6	0.174 6	0.108 3	0.9	8*f*
Si	Si2	0.003 2	0.177 5	0.616 4	0.1	8*f*
Si	Si3	0.693 4	0.120 0	0.170 6	0.1	8*f*
Si	Si4	0.684 5	0.113 7	0.671 6	0.9	8*f*
Al	Al1	0.006 6	0.174 6	0.108 3	0.1	8*f*
Al	Al2	0.003 2	0.177 5	0.616 4	0.9	8*f*
Al	Al3	0.693 4	0.120 0	0.170 6	0.9	8*f*
Al	Al4	0.684 5	0.113 7	0.671 6	0.1	8*f*
O	O1	0.004 5	0.128 9	0.000 3	1.0	8*f*
O	O2	0.591 1	0.000 2	0.142 7	1.0	8*f*
O	O3	0.826 7	0.126 6	0.105 4	1.0	8*f*
O	O4	0.810 4	0.126 3	0.611 3	1.0	8*f*
O	O5	0.013 2	0.298 4	0.118 6	1.0	8*f*
O	O6	0.018 8	0.309 0	0.630 4	1.0	8*f*
O	O7	0.187 6	0.124 5	0.195 5	1.0	8*f*
O	O8	0.196 0	0.119 0	0.702 7	1.0	8*f*

2.2　微观形貌分析

图 2 为 $SrAl_2Si_2O_8:Eu^{2+}, Dy^{3+}$荧光粉的扫描电子显微镜照片。由图 2 可见，由固相反应形成的固溶体呈现出层状结构，粒径约为 50～100 μm。由于荧光粉的高表面活性，在样品图像中观察到了颗粒团聚现象[15]。添加助溶剂后，荧光粉各层之间存在一些棒状结构，这是由于化合物和助熔剂之间的界面能不同所致[11]，表明 H_3BO_3 促进了晶面的生长。



(a) Add H_3BO_3　　(b) Add H_3BO_3

(c) No H_3BO_3　　(d) No H_3BO_3

图 2　$SrAl_2Si_2O_8:Eu^{2+}$，Dy^{3+}荧光粉的 SEM 照片

Fig. 2　SEM images of $SrAl_2Si_2O_8: Eu^{2+}, Dy^{3+}$ phosphors

2.3　光致发光特性分析

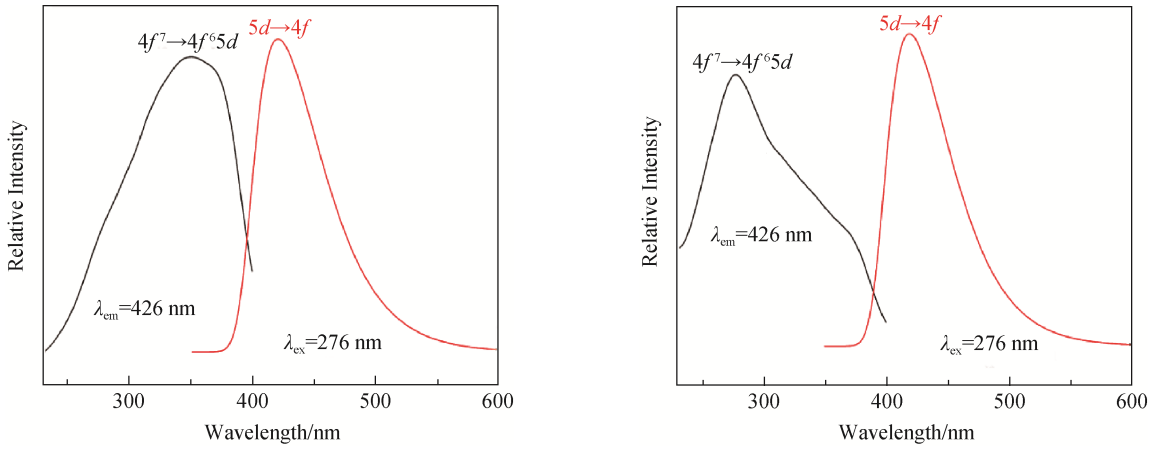
图 3 为 $SrAl_2Si_2O_8:0.04Eu^{2+}$ 和 $SrAl_2Si_2O_8:0.04Eu^{2+}, 0.04Dy^{3+}$的激发和发射光谱。由图 3a 可见，在 426 nm 处监测下，$SrAl_2Si_2O_8:0.04Eu^{2+}$荧光粉呈现出 1 个宽激发带，激发峰位于 350 nm 处，对应于 Eu^{2+}的 $4f^7 \rightarrow 4f^6 5d^1$ 跃迁[2,6,10,13,16–20]。在 276 nm 激发下，$SrAl_2Si_2O_8:0.04Eu^{2+}$荧光粉显示出非常宽的发射带，发射峰位于 426 nm 处，这是由于 Eu^{2+}的 $5d \rightarrow 4f$ 自旋跃迁引起的。由图 3b 可见，与 Dy^{3+}共掺杂后，仍然只有 1 个激发带，激发峰位于 277 nm 处。与 $SrAl_2Si_2O_8:0.04Eu^{2+}$的数据相比，激发峰的位置没有太大变化，峰型的改变归结为 Dy^{3+}作陷阱中心所致，峰值强度得到提升。同样在 426 nm 激发下，发射带范围保持不变，发射峰位于 419 nm 处，这证明 Eu^{2+}离子是唯一的发光中心，Dy^{3+}充当电子陷阱。

图 4 为不同 Eu^{2+}、Dy^{3+}、H_3BO_3 的发射光谱。由图 4a 可以看出，随着 Eu^{2+}浓度的增加，发射峰强度表现出先增大后减小的趋势。同时，当 $x > 0.02$ 时发生浓度猝灭现象。单掺杂 Eu^{2+}的浓度猝灭现象通常是由于 Eu^{2+}之间发生了非辐射能量转移过程，其中，可以使用 Dexter 理论确定特定的主导因子，如式(1)所示[24]：

$$I / x = K[1 + \beta(x)^{\theta/3}]^{-1} \quad (1)$$

式中：x 为临界掺杂浓度；I 为临界掺杂浓度下的发射强度；K 和 β 为常数。当 $\theta=6$ 时，浓度猝灭现象对应于偶极–偶极相互作用；当 $\theta=8$ 时，对应于偶极–四极相互作用；当 $\theta=10$ 时，对应于四极–四极相互作用[24]。由图 4b 可以看出，斜率是–1.135，θ 接近 6。可以判断出 $SrAl_2Si_2O_8:x\,Eu^{2+}$荧光粉通过偶极–偶极相互作用发生浓度猝灭。由图 4c 可见，当

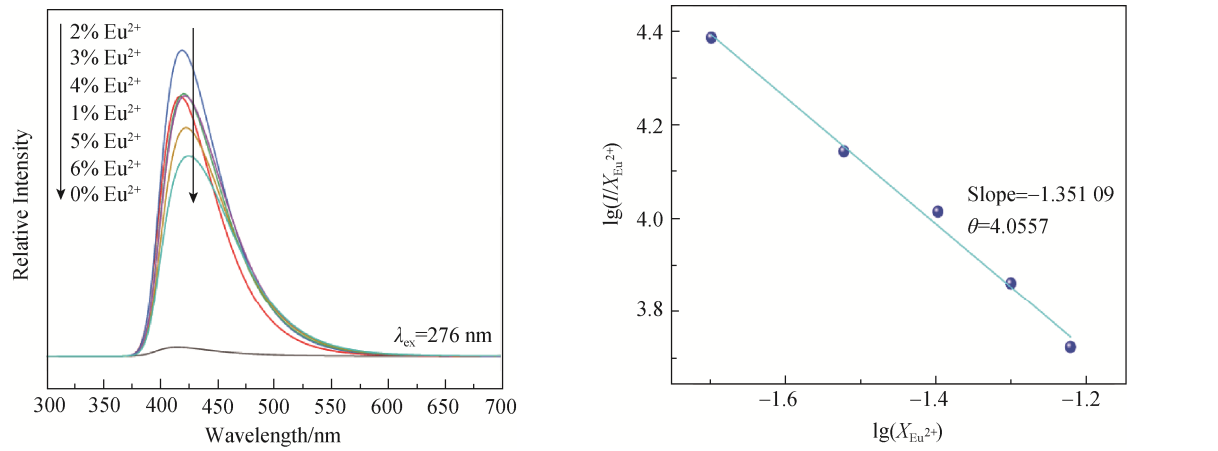
y = 0.02 时，荧光粉的发光强度达到最大值。当 y > 0.02 时，发生浓度猝灭现象。由图 4d 可见，添加 H_3BO_3 不会改变发射峰的位置。然而，当添加量小于 8%(摩尔分数)时，发射峰强度明显增强，这证明了添加少量助熔剂可以促进 Eu^{2+}进入晶格形成发光中心[22]。



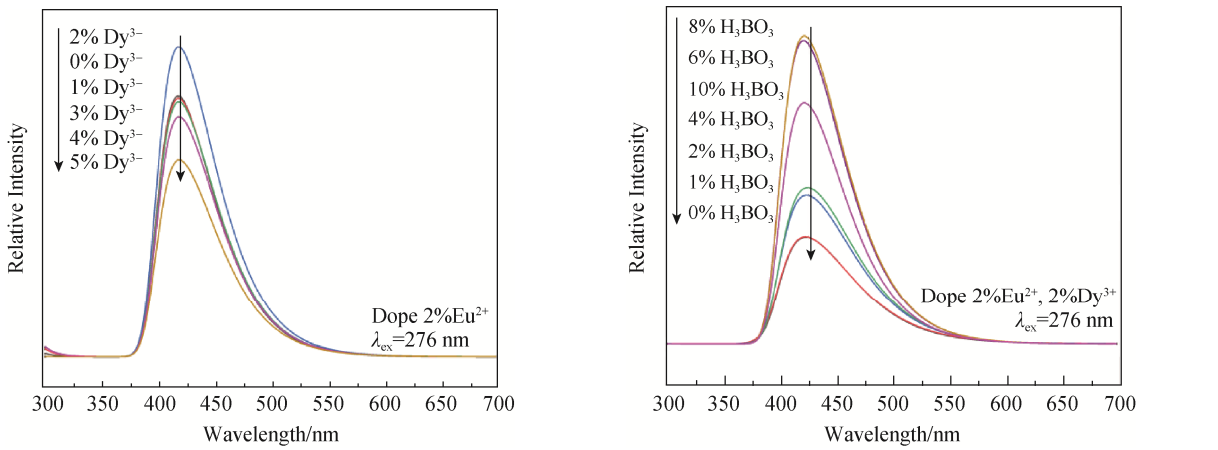
(a) $SrAl_2Si_2O_8$:0.04Eu^{2+} (b) $SrAl_2Si_2O_8$:0.04Eu^{2+}, 0.04Dy^{3+}

图 3 $SrAl_2Si_2O_8$:0.04Eu^{2+}和 $SrAl_2Si_2O_8$:0.04Eu^{2+}，0.04Dy^{3+}的激发和发射光谱

Fig. 3 Excitation and emission spectra of $SrAl_2Si_2O_8$:0.04Eu^{2+} and SrAl2Si2O8:0.04Eu^{2+}, 0.04Dy^{3+}



(a) Different doping concentrations of Eu^{2+} (b) Fitting curve of the emission peaks for different quenching concentrations of Eu^{2+}

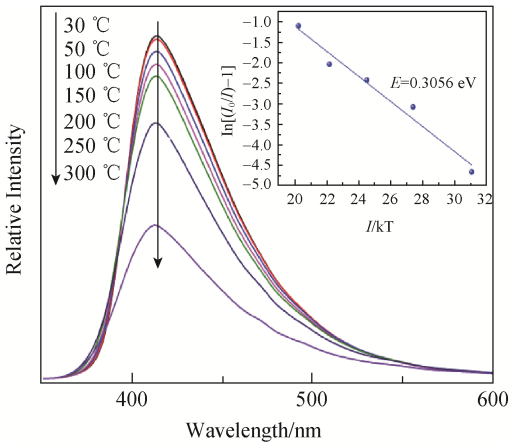


(c) Different doping concentrations of Dy^{3+} (d) Different flux concentrations

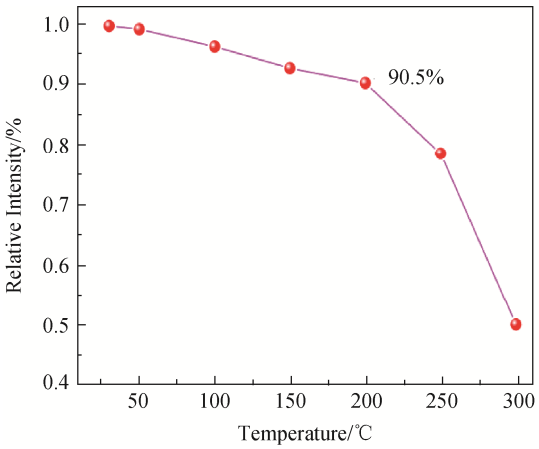
图 4 不同 Eu、Dy、H_3BO_3 浓度荧光粉的发射光谱

Fig. 4 Emission spectra of phosphors with different concentrations of Eu, Dy and H_3BO_3

图 5 为 $SrAl_2Si_2O_8$: Eu^{2+}, Dy^{3+}荧光粉的变温发射光谱。由图 5 可以看出，随着非辐射跃迁的增加，发射强度随温度的升高而降低。然而，当温度达到 200 ℃时，发光强度仍保持室温的 90.5%，这表明 $SrAl_2Si_2O_8$: Eu^{2+}, Dy^{3+}荧光粉的热稳定性较好，通过计算和拟合获得的活化能为 0.3056 eV。



(a) Variable temperature spectra



(b) Relationship between temperature and emission intensity

图 5　$SrAl_2Si_2O_8$: Eu^{2+}，Dy^{3+}变温发射光谱以及变温活化能拟合曲线

Fig. 5　$SrAl_2Si_2O_8$: Eu^{2+}, Dy^{3+} variable temperature emission spectra and variable temperature activation energy fitting curves

图 6 为 $SrAl_2Si_2O_8$: Eu^{2+}, Dy^{3+}荧光粉的照片和寿命衰减曲线。由图 6a 可以看出，发光强度迅速下降，这是在荧光衰减过程开始时的快速衰减现象[23]。为了更好地验证助熔剂添加对余辉寿命的影响，结合光谱数据得出加入 8% H_3BO_3 较为合适，同时监测了荧光粉在 276 nm 处的余辉寿命衰减曲线，如图 6b 所示。可以使用式(2)所示的拟合模型，将该数据拟合为二阶指数函数[18]：

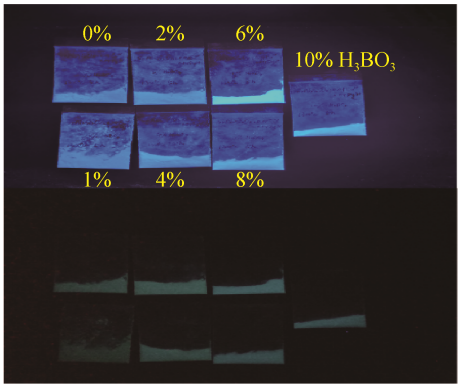
$$I(t) = I_0 + A_1\exp(-t/\tau_1) + A_2\exp(-t/\tau_2) \qquad (2)$$

式中：t 为衰减时间；I(t)为在时间 t 的发光强度；τ_1 和 τ_2 分别为快的发光寿命和慢的发光寿命；A_1 和 A_2 为拟合常数。最终平均寿命 τ*可使用式(3)计算[18]：

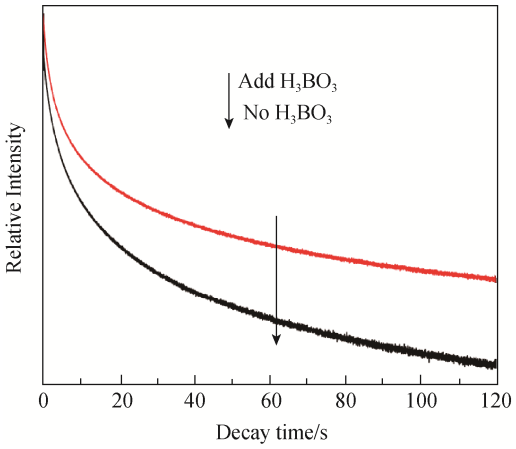
可以使用式(3)结算得到荧光粉的量子效率：

$$\phi_F = k_F / (k_F + \Sigma k_{NR}) \qquad (3)$$

式中：ϕ_F 为量子效率；k_F 为荧光去活的速率常数；Σk_{NR} 各种单分子的非辐射去活的速率常数的总和。结果表明：没有使用助溶剂 H_3BO_3 的平均寿命为 8.86 s，添加助溶剂 H_3BO_3 的平均寿命为 112.3 s。助熔剂的添加延长了荧光粉的余辉寿命。比较在有或没有助熔剂的情况下制备的荧光粉样品的量子效率，添加 H_3BO_3 后量子效率从 32.1%提高到 62.3%。其原因是 Dy^{3+}作为陷阱中心，在添加助熔剂后其数量增加，一部分 Sr^{2+}被 Dy^{3+}取代，为了保持电荷平衡，生成了锶空位和 2 个 Dy_{Sr} 位点，这个过程可以用 $3Sr_{Sr} \rightarrow 2Dy_{Sr} + V_{Sr}''$表示，因此促进产生更多的陷阱，从而俘获更多的电荷载流子。因此，H_3BO_3 的添加促进荧光粉余辉延长。



(a) Photographs of phosphors in light-on and light-off states



(b) Persistent luminescence decay curves

图 6　荧光粉照片以及持久发光衰减曲线。

Fig. 6　Photographs of phosphors and persistent luminescence decay curves.

3 结论

通过高温固相反应法成功合成了具有锶长石结构的层状 $SrAl_2Si_2O_8$: Eu^{2+}, Dy^{3+}荧光粉。XRD 分析表明：Eu^{2+}取代了 Sr^{2+}并进入了荧光粉的晶格。荧光粉可以被 276 nm 紫外光激发产生 1 个宽发射带，其峰值在 426 nm 处。共掺杂 Dy^{3+}不会影响荧光粉的晶体结构和发射峰位置，Dy^{3+}被引入到荧光粉的陷阱中心。$SrAl_2Si_2O_8$: Eu^{2+}, Dy^{3+}荧光粉具有良好的热稳定性，在 200 ℃时还保持其初始发光强度的 90.5%。加入 H_3BO_3 助熔剂不会影响荧光粉的晶体结构，但会提高其发光强度并延长其余辉寿命。加入 H_3BO_3 后，寿命达到 122.3 s，量子效率提高了 30.2%。$SrAl_2Si_2O_8$: Eu^{2+}, Dy^{3+}荧光粉在长余辉发光二极管领域具有发展潜力。

参考文献:

[1] WEI Zhen, MAO Weixi, ZHANG Kehui, et al. Enhanced long afterglow of $SrAl_2Si_2O_8$:Eu^{2+} by codoping Dy^{3+}[J]. J Mater Sci, 2018, 29(23): 20517–20521.

[2] LI Yang, GECEVICIUS M, et al. Long persistent phosphors-from fundamentals to applications[J]. Chem Soc Rev, 2016, 45(8): 2090–2136.

[3] XU Jian, TANABE S. Persistent luminescence instead of phosphorescence: History, mechanism, and perspective[J]. J Lumin, 2018, 205: 581–620.

[4] MATSUZAWA T, AOKI Y, TAKEUCHI N, MURAYAMA Y. New long phosphorescent phosphor with high brightness, $SrAl_2O_4$:Eu^{2+}, Dy^{3+}[J]. J Electrochem Soc, 1996, 143(8): 2670–2673.

[5] LI Xin, YANG Cheng, LIU Quansheng, et al. Enhancement of luminescence properties of $SrAl_2Si_2O_8$:Eu^{3+} red phosphor[J]. Ceram Int, 2020, 46(11): 17376–17382.

[6] DAI W B, ZHOU J, ZHANG Z H, et al. Photoluminescent properties of Eu-doped $MAl_2Si_2O_8$ aluminosilicates phosphors[J]. J Alloy Compd, 2018, 765: 650–658.

[7] LI Ling, LIU Xiaoguang. Effects of change of the cation M^{2+} on crystal structure and optical properties of divalent samarium-doped $MAl_2Si_2O_8$ (M=Ca, Sr, Ba)[J]. Rsc Adv, 2015, 5(25): 19734–19742.

[8] BRGOCH Jakoah, DENAULT Kristin A, et al. Accessing $(Ba_{1-x}Sr_x)Al_2Si_2O_8$:Eu phosphors for solid state white lighting *via* microwave-assisted preparation: Tuning emission color by coordination environment[J]. Z Anorg Allg Chem, 2014, 640(6): 1182–1189.

[9] MA Pingchuan, YUAN Bo, et al. Tunable emission, thermal stability and energy-transfer properties of $SrAl_2Si_2O_8$: Ce^{3+}/Tb^{3+} phosphors for *w*-LEDs[J]. J Alloy Compd, 2017, 714: 627–635.

[10] DONG Guoping, XIAO Xiudi, LIU Xiaofeng, et al. Preparation and optical properties of long afterglow europium-doped $Ca(Sr)Al_2Si_2O_8$ electrospun nanofibers[J]. J Electrochem Soc, 2009, 156(11): J356–J360.

[11] NOTO L L, ROOS W D, NTWAEABORWA O M, et al. The role of flux material on the enhancing of the luminescent intensity and persistent emission of $ZnTa_2O6$:Pr^{3+} phosphor[J]. Sci Adv Mater, 2015, 7(6): 1197–1206.

[12] ZHAI Baogai, YANG Long, MA Qinglan, et al. Mechanism of the prolongation of the green afterglow of $SrAl_2O_4$:Dy^{3+} caused by the use of H_3BO_3 flux[J]. J Lumin, 2017, 181: 78–87.

[13] XUE Junpeng, SONG Mingjun, MI Hyeon Noh, et al. Achieving non-contact optical thermometer via inherently Eu^{2+}/Eu^{3+}-activated $SrAl_2Si_2O_8$ phosphors prepared in air[J]. J Alloy Compd, 2020, 843: 155858.

[14] XU Hongwei, WANG Lili, LI Minhong, et al. Self-reduction process and enhanced blue emission in $SrAl_2Si_2O_8$: Eu, Tb *via* electron transfer from Tb^{3+} to Eu^{3+}[J]. Phys Status Solidi A, 2017, 214: 6.

[15] KIM Yongseon. Lithium nickel cobalt manganese oxide synthesized using alkali chloride flux: morphology and performance as a cathode material for lithium ion batteries[J]. Acs Appl Mater Inter, 2012, 4(5): 2329–2333.

[16] LIU Weiren, LEI Bingfu. Flux-assisted preparation and photoluminescence of emission-tunable (Sr, Eu)$Al_2Si_2O_8$ phosphors[J]. J Nanosci Nanotechno, 2018, 18(1): 374–380.

[17] 左修源, 陈永杰, 耿秀娟, 等. Si^{4+}掺杂对橙红色荧光粉 $NaBaSi_xP_{1-x}O4$:Eu^{3+}结构和发光性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2017(4): 69–75.
ZUO Xiuyuan, CHEN Yongjie, GENG Xiujuan et al. J Chin Ceram Soc, 2017(4): 69–75.

[18] 于灏君, 王宝辰, 刘艳改,等. $Sr_6La_4(SiO_4)_2(PO_4)_4O_2$:$xEu^{2+}$,$yMn^{2+}$荧光粉的制备及性能[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(12): 1771–1779.
YU Haojun, WANG Baochen, LIU Yangai et al. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(12): 1771–1779.

[19] 王梓垚, 陈健, 刘艳改, 等. $BaAl_2O_4$:Eu 直接白色荧光粉的制备及其发光性能[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(9): 1320–1325.
WANG Ziyao, CHEN Jian, LIU Yangai et al. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(9): 1320–1325.

[20] 郑庆华, 周薇薇, 吕兆承, 等. NaLaMgTeO$_6$:Eu^{3+}新型红色荧光粉的制备与发光性能[J]. 硅酸盐学报, 2017(4): 542–547.
ZHENG Qinghua, ZHOU Weiwei, LV Zhaocheng, et al. J Chin Ceram Soc, 2017(4): 542–547.

[21] VAN den Eeckhout Koen, PHILIPPE F Smet, DIRK Poelman. Persistent luminescence in Eu^{2+}-doped Compounds: A review[J]. Materials, 2010, 3(4): 2536–2566.

[22] WU Xiulan, JIAO Yehui, HAI Ou, et al. Effect of single and composite fluxes on the morphology and luminescence properties of layered perovskite $Sr_{1.95}TiO_4$:0.05Sm^{3+} phosphor[J]. J Lumin, 2017, 192: 626–633.

[23] LI Darong, WANG Yinhai, Xu Ke, et al. Effect of H_3BO_3 on the persistent luminescence and photocatalytic properties of $ZnGa_2O_4$ phosphors[J]. Opt Mater, 2014, 36(11): 1836–1840.

[24] WANG Baochen. Photoluminescence properties of a Ce^{3+} doped $Sr_3MgSi_2O_8$ phosphor with good thermal stability[J]. Rsc Adv, 2018, 8(28): 15587–155594.