

# 掺 Pr<sup>3+</sup>氟化物玻璃发光特性研究

张 瑜<sup>1,2</sup> 黄飞飞<sup>1,2</sup> 刘力挽<sup>1,3</sup> 周秦岭<sup>1</sup> 邢朝君<sup>1,2</sup> 杨 科<sup>1,2</sup> 陈丹平

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光单元技术研发中心, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

<sup>3</sup>上海大学物理学院, 上海 200444

**摘要** 采用熔融法制备 Pr<sup>3+</sup>掺杂的 50ZrF<sub>4</sub>-50(BaF<sub>2</sub>-YF<sub>3</sub>-AlF<sub>3</sub>)-xPrF<sub>3</sub> 氟化物玻璃, 系统研究了其在不同激发条件下的光致发光和闪烁发光性能。测试结果表明, Pr<sup>3+</sup>位于可见波段、属于 f→f 跃迁(<sup>3</sup>P<sub>0</sub>→<sup>3</sup>H<sub>4</sub>, <sup>3</sup>P<sub>0</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub>, <sup>3</sup>P<sub>0</sub>→<sup>3</sup>F<sub>2</sub>等)的光致发光最佳摩尔分数为 0.6%, 并且随着 Pr<sup>3+</sup>浓度的增加, 486 nm 处的荧光寿命从 56 μs 下降到 11 μs, 浓度猝灭效应明显; 而 X 射线激发时, 最佳发光摩尔分数上升到 1.0%。Pr<sup>3+</sup>位于紫外波段的 4f→5d 跃迁光致发光强度随着 Pr<sup>3+</sup>浓度的增加一直增强。这是由于 4f→5d 跃迁能级差大, 氟化物声子能量较低, 而产生交叉弛豫需要很多声子, 故难以发生浓度猝灭效应。当采用 X 射线激发时, 检测到较强 486 nm 的发光, 而未探测到紫外发光。

**关键词** 材料; 闪烁发光; 氟化物玻璃; Pr<sup>3+</sup>

中图分类号 TQ171.1+2 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0816004

## Spectroscopic Investigation of Pr<sup>3+</sup> Doped Fluoride Glasses

Zhang Yu<sup>1,2</sup> Huang Feifei<sup>1,2</sup> Liu Liwan<sup>1,3</sup> Zhou Qingling<sup>1</sup>

Xing Zhaojun<sup>1,2</sup> Yang ke<sup>1,2</sup> Chen Danping<sup>1</sup>

<sup>1</sup>R&D Center of High Power Laser Components, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup>Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China

**Abstract** Pr<sup>3+</sup> doped 50ZrF<sub>4</sub>-50(BaF<sub>2</sub>-YF<sub>3</sub>-AlF<sub>3</sub>)-xPrF<sub>3</sub> fluoride glasses are prepared through high-temperature melt-quenching method, and the properties of photoluminescence and scintillation under different excitation conditions are studied. Experimental results show that when excited by 443 nm blue light, the optimal luminous mole concentration of f→f transition (<sup>3</sup>P<sub>0</sub>→<sup>3</sup>H<sub>4</sub>, <sup>3</sup>P<sub>0</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub>, <sup>3</sup>P<sub>0</sub>→<sup>3</sup>F<sub>2</sub>) is 0.6%; when excited by X-rays, the optimal luminous concentration is 1.0%, and with the increase of Pr<sup>3+</sup> concentration, the fluorescence lifetime decreases from 46 μs to 21 μs, concentration quenching effect is quite obvious. The intensities photoluminescence of 4f→5d transition which locat in the ultraviolet band increase with the Pr<sup>3+</sup> concentration. This phenomenon is interpreted as that 4f→5d transition energy gap is quite large, while the phonon energy of fluoride glass is low, the cross-relaxation requires several phonons, so the concentration quenching effect is too difficult to occur. Under the X-ray excitation, the ultraviolet light doesn't be detected, while strong 486 nm light emission is generated.

**Key words** materials; scintillating; fluoride glasses; Pr<sup>3+</sup>

**OCIS codes** 160.2540; 160.3380; 160.2750

收稿日期: 2015-03-31; 收到修改稿日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(51272262, 61405215)

作者简介: 张 瑜(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学玻璃方面的研究。E-mail: zhangyu090719@siom.ac.cn

导师介绍: 陈丹平(1960—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学玻璃方面的研究。

E-mail: D-chen@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

## 1 引 言

人类活动领域的不断扩大以及科学技术水平的飞速提高,尤其在高能物理、核物理、地球物理、核医学、工业探测等领域的应用上不断增长的需求,极大地推动了新型高密度闪烁晶体与玻璃的研究。闪烁玻璃因具有成本低廉、加工方便、组成与体积易于调整等优点而引起材料及物理研究人员的广泛兴趣<sup>[1]</sup>。相比于氧化物玻璃,氟化物玻璃具有折射率低、阿贝系数小、稀土离子掺杂浓度高<sup>[2]</sup>、在紫外和中红外波段透光范围宽等优点。此外,通过引入重金属,可使氟化物玻璃密度高达  $7 \text{ g/cm}^{3-4}$ ,进而减小其辐射长度。更重要的是重金属氟化物玻璃的耐辐照性能好,基本没有辐照着色和暗化的问题<sup>[5]</sup>。如果其光产额得到改善,更有可能作为闪烁材料得到应用。对于氟化物闪烁材料,研究的主要系统包括氟锆基、氟铪基、氟铝基、氟磷基玻璃等<sup>[6-8]</sup>。虽然重金属氟化物玻璃一般在紫外及可见区具有高透射率,但  $\text{Ce}^{3+}$  掺杂的氟化物玻璃的闪烁效率却很低,甚至没有闪烁光的输出<sup>[9]</sup>,这是目前氟化物闪烁玻璃中一个重大的问题。华王祥等<sup>[10]</sup>认为,其主要原因是玻璃中  $\text{Ce}^{3+}$  含量较低,而增加  $\text{Ce}^{3+}$  含量又会引起反玻化趋势。Carnall 等<sup>[11]</sup>发现,  $\text{Pr}^{3+}$  的  $4f^2$  电子组态中的一个电子很容易激发到  $5d$  能级从而形成  $4f^15d^1$  态,这与  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{Eu}^{2+}$  极为相似<sup>[12-16]</sup>。因此,  $\text{Pr}^{3+}$  在闪烁晶体以及闪烁陶瓷方面的应用逐渐引起人们的注意<sup>[17-18]</sup>,其在数据的存储、光学显示器件和医学成像领域具有良好的应用前景。但目前有关于  $\text{Pr}^{3+}$  掺杂闪烁玻璃的报道较少。

通过引入  $\text{Pr}^{3+}$  作为激活离子,得到  $\text{Pr}^{3+}$  掺杂的氟化物闪烁玻璃,系统研究其在不同的激发条件下的光致发光和闪烁发光性能,并测试其荧光寿命等参数,分析产生不同发光性能的机理原因。

## 2 实验部分

研究的氟化物玻璃摩尔百分比为  $50\text{ZrF}_4-50(\text{BaF}_2-\text{YF}_3-\text{AlF}_3)(\text{ZBYA})$ ,其中  $\text{ZrF}_4$  由  $\text{ZrF}_4\cdot\text{H}_2\text{N}_6$  引入,其他均由氟化物引入,原料纯度均为 99.9%。为了研究  $\text{Pr}^{3+}$  对 ZBYA 玻璃的物理化学性能以及光学性质的影响,通过改变  $\text{Pr}^{3+}$  掺杂浓度进行了一系列实验。按照配方称取 25 g 玻璃配合料,充分混合均匀后,倒入铂金坩埚,并加盖保护。将原料放入  $900\sim 950 \text{ }^\circ\text{C}$  的硅碳棒电炉中熔化约 20 min,澄清后浇注在预热过的铁磨具上成型。随后将成型的玻璃快速转移至预热到一定温度(玻璃转变温度  $T_g$  以下  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 的马弗炉中进行退火,先保温 6 h,然后以  $10 \text{ }^\circ\text{C/h}$  的速度降温至  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。关闭马弗炉电源后,玻璃随炉冷却至室温。将退火处理后的玻璃样品切割,并抛光成  $10 \text{ mm}\times 10 \text{ mm}\times 2 \text{ mm}$  大小的块体,用于物化性质和光谱性质的测试。

采用阿基米德排水法测定玻璃密度;用 JASCO V-570 紫外/可见/红外型分光光谱仪测试其吸收光谱;用 JASCO FP-6500 光谱仪测试其激发、发射光谱;采用英国 Edinburgh Instruments 公司的 FLSP 920 型荧光光谱并配合  $\text{H}_2 \text{ nF900}$  光源测试其荧光寿命;用英国 Renishaw 公司 Invia 型号的显微拉曼光谱仪分析其拉曼结构;用管电压为 50 kV、管电流为 40 mA 的 Mo 靶的 X 射线激发源,并配合卓立汉光 SBP-300 荧光光谱仪测试其 X 射线辐射发光强度。所有测试都在室温下进行。

## 3 结果与讨论

### 3.1 玻璃综合性质

表 1 为 ZBYA 白玻璃样品的相关物理以及光学性质,包括组分、玻璃转变温度  $T_g$ 、析晶温度  $T_c$ 、密度、折射率(实验所得玻璃都是透明均一的)。随着  $\text{Pr}^{3+}$  掺杂浓度的增加,玻璃样品的密度逐渐变大而玻璃转变温度  $T_g$  没有太大变化。表 2 为 X 射线荧光光谱分析(XRF)数据。结果表明,所得玻璃组分中各元素质量百分比均与实验前原料配比基本吻合。

表 1 ZBYA 玻璃样品的物理以及光学性质

Table 1 Physical and optical properties of ZBYA samples

Parameters	Values
Composition	$50\text{ZrF}_4-33\text{BaF}_2-10\text{YF}_3-7\text{AlF}_3$
Temperature of glass transition $T_g / ^\circ\text{C}$	$320\pm 2$
Temperature of inset crystallization peak $T_c / ^\circ\text{C}$	406
Density $\rho / (\text{g/cm}^3)$	$4.7\pm 0.1$
Refractive index	1.498

表2 XRF分析结果(质量分数, %)

Table 2 Results of XRF analysis(mass fraction, %)

Elements tested	Original content	Content by XRF analysis
Zr	28.2	28.0
Ba	28.0	28.1
Y	5.5	5.67
Al	1.2	1.1
F	37.2	37.1

### 3.2 光谱分析

#### 3.2.1 吸收光谱

图1为不同Pr<sup>3+</sup>掺杂摩尔分数的ZBYA玻璃样品在190~700 nm区间内的吸收光谱图。图2为Pr<sup>3+</sup>的4f<sup>2</sup>以及4f5d能级图,根据Pr<sup>3+</sup>的能级图在图1中标定出各吸收峰。由图1可知,ZBYA-Pr玻璃样品有4个比较强的吸收峰,分别对应于Pr<sup>3+</sup>的基态<sup>3</sup>H<sub>4</sub>至激发态<sup>3</sup>P<sub>2</sub>、<sup>3</sup>P<sub>1</sub>+<sup>1</sup>I<sub>6</sub>、<sup>3</sup>P<sub>0</sub>、<sup>1</sup>D<sub>2</sub>的跃迁。由于<sup>3</sup>P<sub>1</sub>和<sup>1</sup>I<sub>6</sub>两个能级的吸收峰距离很近难以分辨,在处理数据时通常将其合并。在250 nm附近有一个很宽属于4f → 5d跃迁的吸收带,并且随着Pr<sup>3+</sup>浓度的增加,其吸收带发生红移。

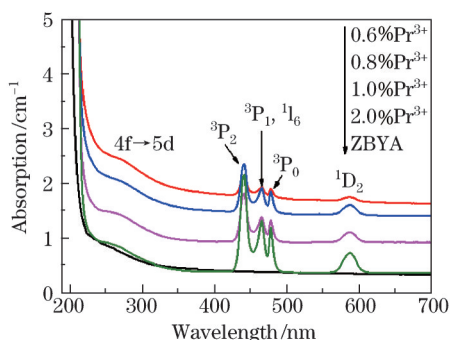


图1 Pr<sup>3+</sup>在ZBYA玻璃样品的吸收光谱

Fig.1 Absorption spectra of Pr<sup>3+</sup> in ZBYA glasses

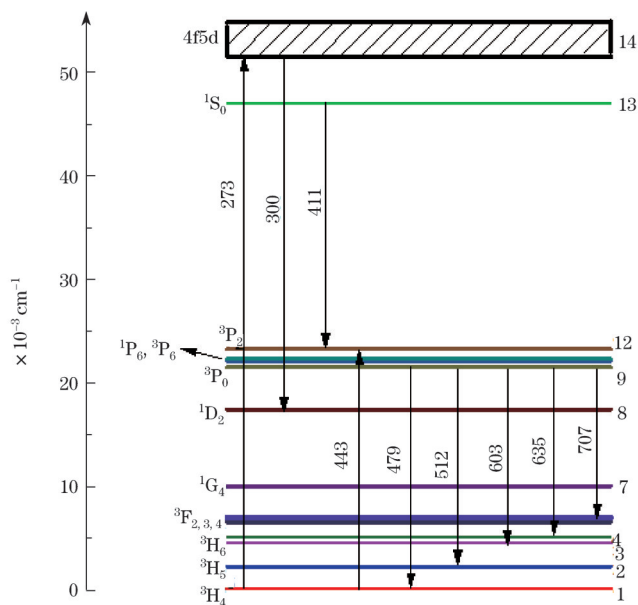


图2 Pr<sup>3+</sup>的能级图

Fig.2 Energy level schematic of Pr<sup>3+</sup>

#### 3.2.2 荧光光谱

图3为不同Pr<sup>3+</sup>掺杂摩尔分数的ZBYA玻璃样品在280~700 nm波段的荧光光谱及激发光谱图。从图3可以看出,当用273 nm的光激发时,其荧光发光为近紫外波段的宽带发射,其中心位于300和414 nm,分别对应于Pr<sup>3+</sup>的4f → 5d跃迁。随着Pr<sup>3+</sup>掺杂浓度的增加,直至ZBYA玻璃样品的稀土离子掺杂浓度达到最大,其

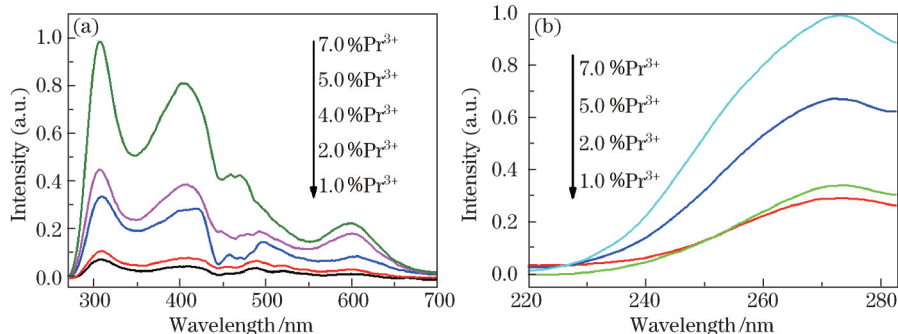


图3 不同 Pr<sup>3+</sup>浓度掺杂 ZBYA 玻璃样品: (a) 在 273 nm 光激发下荧光光谱图; (b) 检测波长在 300 nm 下的激发光谱

Fig.3 (a) Emission spectra under 273 nm excitation and (b) excitation spectra at 300 nm of Pr<sup>3+</sup>doped ZBYA glasses

荧光发光强度一直增强。

图4为不同 Pr<sup>3+</sup>掺杂摩尔分数的 ZBYA 玻璃样品在 450~750 nm 波段的激发和发光光谱。由图可知, Pr<sup>3+</sup>在可见及近红外波段均有多个较强的荧光发光带。当用 443 nm 光激发时, 其最强荧光带中心位于 479 nm, 属于 <sup>3</sup>P<sub>0</sub> → <sup>3</sup>H<sub>4</sub> 的跃迁, 次强荧光带中心位于 603 和 635 nm, 分别对应于 <sup>3</sup>P<sub>0</sub> → <sup>3</sup>H<sub>6</sub> 和 <sup>3</sup>P<sub>0</sub> → <sup>3</sup>F<sub>2</sub> 的跃迁。此外还有一些较弱的荧光带, 均属于 <sup>3</sup>P<sub>0</sub> 和 <sup>3</sup>P<sub>1</sub> 能级开始的跃迁。当用 443 nm 光激发时, 荧光发光最强时 Pr<sup>3+</sup> 掺杂摩尔分数为 0.6 %。

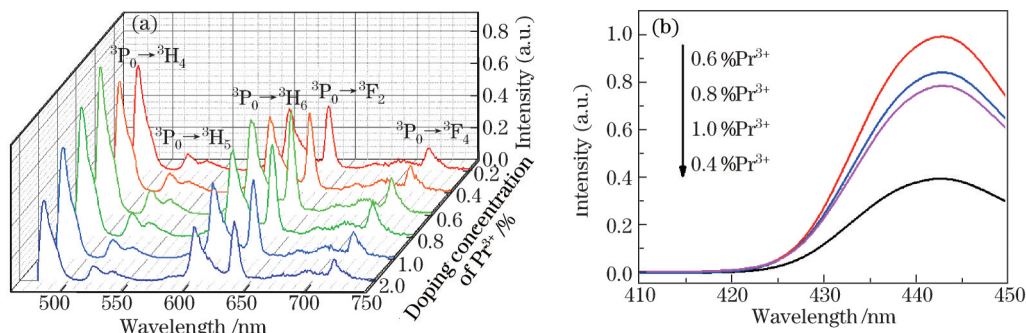


图4 不同 Pr<sup>3+</sup>浓度掺杂 ZBYA 玻璃样品: (a) 在 443 nm 光激发下激发光谱图; (b) 检测波长在 486 nm 下的发光光谱

Fig.4 (a) Emission spectra under 443 nm excitation and (b) cuminescence spectra at 486 nm of Pr<sup>3+</sup>doped ZBYA glasses

### 3.2.3 寿命曲线

图5为不同样品在 443 nm 激发下 486 nm 处发光衰减时间的拟合曲线。所有样品的衰减曲线都能用单指数曲线拟合得到。可知, 样品都具有较快的衰减时间, 均小于 60 μs, 最短的是 11.2 μs, 这与 Eu<sup>2+</sup> 的寿命在同一数量级上<sup>[19]</sup>。随着 Pr<sup>3+</sup> 掺杂摩尔分数的增加, 荧光寿命明显减小。荧光寿命是反应浓度猝灭情况的一个重要指标。荧光寿命随着 Pr<sup>3+</sup> 掺杂摩尔分数的增加而减少的现象可能与 Pr<sup>3+</sup> 基态 <sup>3</sup>H<sub>4</sub> 能级与激发态 <sup>3</sup>P<sub>0</sub> 能级之间的能量传递有关。

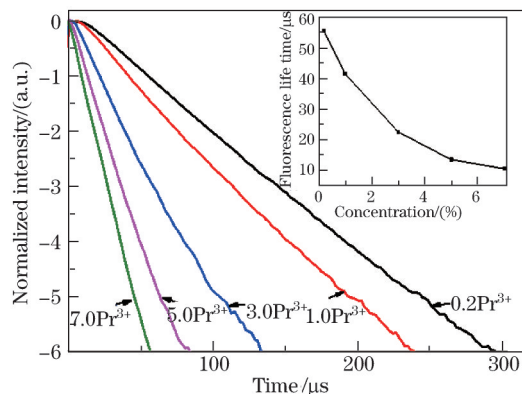


图5 443 nm 激发下 486 nm 处发光衰减时间的拟合曲线

Fig.5 Fluorescence decay curves of 486 nm under 443 nm excitation

### 3.2.4 X射线激发得到的荧光光谱

图6为采用 X 射线激发时得到的荧光光谱图。可知, 随着 Pr<sup>3+</sup> 摩尔分数的增加, 其发光强度由弱增强直至峰



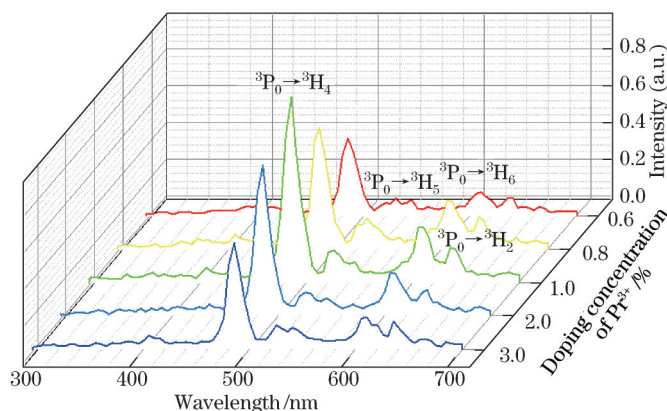


图6 不同Pr<sup>3+</sup>掺杂摩尔分数ZBYA玻璃样品在X射线激发得到的荧光光谱图

Fig.6 Emission spectra of different Pr<sup>3+</sup>doped ZBYA glasses under X-ray excitation

值;当进一步增加Pr<sup>3+</sup>浓度,其荧光强度反而减弱,表现出浓度猝灭效应特性。虽然所有样品的发光谱都与443 nm光激发下的光谱类似,但是最佳发光浓度不同,X射线激发时Pr<sup>3+</sup>最佳发光摩尔分数为1.0%。

综合对比图3、4、6,Pr<sup>3+</sup>掺杂的ZBYA玻璃在不同的激发条件下呈现出不同的变化规律:当采用273 nm光激发时,随着Pr<sup>3+</sup>掺杂摩尔分数的增加,其荧光发光强度一直增加,直到ZBYA玻璃样品达到最大掺杂摩尔分数;当采用443 nm光激发时,Pr<sup>3+</sup>对应的最佳发光摩尔分数为0.6%;而当采用X射线激发时,其荧光光谱图虽然与图4较为类似,但是Pr<sup>3+</sup>对应的最佳发光摩尔分数为1.0%。光致紫外发光没有明显的浓度淬灭现象的原因可归结于氟化物玻璃中较低的声子能量。图7为测得的ZBYA玻璃的拉曼谱,由图可知其主要有两个宽带拉曼峰<sup>[20-21]</sup>,分别位于580 cm<sup>-1</sup>和280 cm<sup>-1</sup>处,其中580 cm<sup>-1</sup>振动峰代表Zr-F<sub>r</sub>,即ZBYA玻璃的最高声子能量仅为580 cm<sup>-1</sup>。对于紫外发光,由图1可知Pr<sup>3+</sup>的4f5d-<sup>3</sup>P<sub>2</sub>能级差别大,由于氟化物声子能量较低,而处于5d能级上的离子要通过交叉弛豫到4f能级,则需要更多的声子参与。因此当采用273 nm光激发时,其荧光强度随着Pr<sup>3+</sup>浓度的增加一直增强,难以发生浓度猝灭效应。对比图4和图6,由其能级图可知,<sup>3</sup>P<sub>2</sub>以下的能级间隔很小,Pr<sup>3+</sup>间产生交叉弛豫时容易通过与声子相互作用,将电子能量传递给声子形成无辐射跃迁。因此可见光和X射线荧光相对容易产生浓度淬灭。对比图3和图6可知,紫外激发光谱与X射线激发光谱具有不同的变化规律。对于这一问题目前初步认为,与光致激发相比,高能射线的激发导致活性离子由基态能级被激发到更高的能级,而处于高能级的离子要通过交叉弛豫实现无辐射跃迁需要更多的声子参与,因此可能导致淬灭浓度升高。但目前尚不清楚在X射线激发时,无法观察到d→f跃迁的闪烁发光的原因。

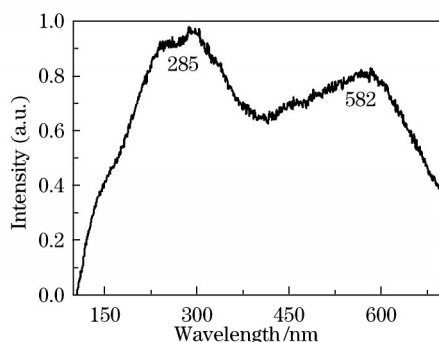


图7 掺Pr<sup>3+</sup>氟化物玻璃的拉曼光谱

Fig.7 Raman spectrum of Pr<sup>3+</sup>doped ZBYA glass

## 4 结 论

采用高温熔融法制备不同Pr<sup>3+</sup>掺杂摩尔分数的ZBYA氟化物玻璃,系统研究其在不同的激发条件下的光致发光和闪烁发光性能。测试结果表明,在273 nm的紫外光激发下,利用Pr<sup>3+</sup>的4f→5d的跃迁可以得到波长为300 nm的荧光峰,并且发光强度随着Pr<sup>3+</sup>摩尔分数的增加而增加;在443 nm的蓝光激发下,属于f→f跃迁(<sup>3</sup>P<sub>0</sub>→<sup>3</sup>H<sub>4</sub>, <sup>3</sup>P<sub>0</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub>和<sup>3</sup>P<sub>0</sub>→<sup>3</sup>F<sub>2</sub>等)的最佳发光摩尔分数为0.6%,并且随着Pr<sup>3+</sup>摩尔分数的增加,其荧光寿命从56 μs下降到

11  $\mu\text{s}$ , 浓度猝灭效应明显; 采用 X 射线激发时, 未探测到紫外发光, 但探测到强的 486 nm 的发光, 最佳发光摩尔分数为 1.0 %。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Guorong, Stefania Baccaro, Du Yongjuan. Development of novel heavy scintillating glasses[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2000, (5): 48–51.  
陈国荣, Stefania Baccaro, 杜永娟. 新型高密度闪烁玻璃研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2000, (5): 48–51.
- 2 Wang Jiu, Chen Yi, Gan Fuxi. Energy level and optical absorption properties of  $\text{Pr}^{3+}$  ions in fluoride glass(ZBLAN)[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(1): 78–84.  
王 劫, 陈 一, 干福熹.  $\text{Pr}^{3+}$ 在氟化物玻璃(ZBLAN)中的能级和光学吸收特征[J]. 光学学报, 1996, 16(1): 78–84.
- 3 Huang F F, Li X, Liu X Q, *et al.*. Sensitizing effect of  $\text{Ho}^{3+}$  on the  $\text{Er}^{3+}$ : 2.7  $\mu\text{m}$ -emission in fluoride glass[J]. Optical Materials, 2014, 36(5): 921–925.
- 4 Huang F F, Lui X Q, Li W W, *et al.*. Energy transfer mechanism in  $\text{Er}^{3+}$  doped fluoride glass sensitized by  $\text{Tm}^{3+}$  or  $\text{Ho}^{3+}$  for 2.7- $\mu\text{m}$  emission[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(5): 051601.
- 5 Lecoq P. The high energy physics demand for a new generation of scintillators[J]. J Lumin, 1994, 60: 948–955.
- 6 Nagornaya L, Ryzhikov V. Fast scintillators based on large heavy tungstate single-crystals[C]. Cristal 2000 International Workshop: Heavy Scintillators for Scientific and Industrial Applications, Chamonix, 1992: 367–374.
- 7 Zhang Y, Yi H L, Tan H P. Analysis of transient radiative transfer in two-dimensional scattering graded index medium with diffuse energy pulse irradiation[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 87: 187–198.
- 8 Auffraya E, Bouttet D, Dafinei I, *et al.*. Cerium doped heavy metal fluoride glasses, a possible alternative for electromagnetic calorimetry [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1996, 380(3): 524–536.
- 9 Shaukat S F, Mckinlay K J, Flower P S, *et al.*. Optical and physical characteristics of HBLAN fluoride glasses containing cerium[J]. Journal of NonCrystalline Solids, 1999, 244(2): 197–204.
- 10 Hua Wangxiang, Fan Shiqi. Inorganic scintillators and their recent developments[J]. Shanghai Chemistry Industry, 1998, 23(5): 36–39.  
华王祥, 范世骐. 无机闪烁体的发展[J]. 上海化工, 1998, 23(5): 36–39.
- 11 Carnall T, Fields P R, Sarup R.  $^1\text{S}_0$  level of  $\text{Pr}^{3+}$  in crystal matrices and energy level parameters for the  $4f^2$ [J]. The Journal of Chemical Physics, 1969, 51(6): 2587–2591.
- 12 Eijk C W. Fast lanthanide-doped inorganic scintillators[C]. SPIE, Tenth Feofitou Symposium on Spectroscopy of Crystals Activated by Rare-Earth and Transitional-Metal Ions, 1996, 2706: 158–167.
- 13 Chewpraditkul W, He X, Chen D, *et al.*. Luminescence and scintillation of  $\text{Ce}^{3+}$ -doped oxide glass with high  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  concentration[J]. Physica Status Solidi A, 2011, 208(12): 2830–2832.
- 14 Yang Bin, Zhang Yuepin, Xia Haiping, *et al.*. Preparation and optical properties of  $\text{Ce}^{3+}$ -doped high lutetium-gadolinium oxide glasses[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0216001.  
杨 斌, 张约品, 夏海平, 等. 铈掺杂高钆钨氧化物玻璃制备和光谱性能[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0216001.
- 15 He Xiaoming, Chen Danping, Yu Bingkun, *et al.*. Effects of substitution of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  by  $\text{BaO}$  or  $\text{La}_2\text{O}_3$  on spectral properties of  $\text{Ce}^{3+}$ -doped  $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3$  glasses[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0516001.  
何小明, 陈丹平, 余昷颀, 等.  $\text{BaO}$ 或 $\text{La}_2\text{O}_3$ 替代 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 对 $\text{Ce}^{3+}$ 掺杂 $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 玻璃光谱性能的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0516001.
- 16 Shen Yinglong, Tang Chunmei, Sheng Qiuchun, *et al.*. Spectroscopic properties and energy transfer of  $\text{Ce}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$  codoped oxide glasses with high  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  concentration[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(11): 117801–117803.  
沈应龙, 唐春梅, 盛秋春, 等. 铈铕共掺高钆氧化物玻璃的发光性能及能量传递效应[J]. 物理学报, 2013, 62(11): 117801–117803.
- 17 Sreebunpeng K, Chewpraditkul W, Babin V, *et al.*. Scintillation response of  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}^{3+}$  single crystal scintillators[J]. Radiation Measurements, 2013, 56: 94–97.
- 18 Yanagida T, Fujimoto Y, Fukuda K. Evaluations of  $\text{Pr}^{3+}$  doped  $\text{KY}_3\text{F}_{10}$  scintillator[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53 (5S1): 05FK02.
- 19 Tang Chunmei, Shen Yinglong, Sheng Qiuchun, *et al.*. Properties of luminescence and scintillation of  $\text{Eu}$ -doped high gadolinium glass[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(4): 247804.  
唐春梅, 沈应龙, 盛秋春, 等.  $\text{Eu}$ 掺杂的高 $\text{Gd}$ 玻璃荧光及闪烁发光性能研究[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 247804.
- 20 Almeida R M, Mackenzie J D. A structural interpretation of the vibrational spectra of binary fluorohafnate glasses[J]. J Chem Phys, 1983, 78(11): 6502–6511.
- 21 Almeida R M, Mackenzie J D. Vibrational spectra and structure of fluorozirconate glasses[J]. J Chem Phys, 1981, 74(11): 5954–5961.

栏目编辑: 张浩佳