

文章编号: 1000-7032(2015)03-0293-06

高 Tb^{3+} 离子含量磁光玻璃的 Faraday 效应及发光性能

刘 盼¹, 殷海荣^{1*}, 张红林², 郭宏伟¹

(1. 陕西科技大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710021;

2. 咸阳非金属矿研究设计院有限公司 研发设计中心, 陕西 咸阳 712021)

摘要: 采用高温熔融法制备了高 Tb^{3+} 离子含量的 $GeO_2-B_2O_3-SiO_2$ 系统磁光玻璃, 测试了其 Verdet 常数和发光性能, 探究了玻璃的 Faraday 效应、发光性能及光学碱度。研究表明: Verdet 常数和光学碱度均随着 Tb_2O_3 含量的增加而线性增大, 当 Tb_2O_3 摩尔分数为 70% 时, Verdet 常数达到 $-5\ 000\ \text{min} \cdot T^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ (632.8 nm), 所有磁光玻璃样品随 Tb_2O_3 含量变化均发出明亮的黄绿光。由于浓度猝灭效应, 高 Tb_2O_3 含量缩短了 Tb^{3+} 离子间距, 增强了交叉弛豫效应, 降低了发光强度和荧光寿命。

关键词: 磁光玻璃; 光学碱度; Tb^{3+} ; 光致发光

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20153603.0293

Faraday Effect and Luminescence Properties of Magneto-optical Glasses With High Tb^{3+} Content

LIU Pan¹, YIN Hai-rong^{1*}, ZHANG Hong-lin², GUO Hong-wei¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;

2. R & D Center, Xianyang Design Institute of Non Metallic Minerals Research Co Ltd., Xianyang 712021, China)

* Corresponding Author, E-mail: foshan83218593@163.com

Abstract: $GeO_2-B_2O_3-SiO_2$ magneto-optical glasses with high Tb^{3+} content were prepared by high temperature melting technique. The effect of Tb^{3+} content on the Faraday effect, luminescent properties and optical basicity was studied. The results show that Verdet constant and optical basicity increase with the increasing of Tb_2O_3 content. All samples emit bright greenish-yellow luminescence, and the glass has a higher Verdet constant of $-5\ 000\ \text{min} \cdot T^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ at 632.8 nm when the mole fraction of Tb_2O_3 is 70%. The distances among Tb^{3+} ions become shorter with the increasing of Tb_2O_3 content due to the concentration quenching effect, therefore, the cross-relaxation effect is enhanced, and the effective luminous intensity and lifetime decrease.

Key words: magneto-optical glass; optical basicity; Tb^{3+} ; photoluminescence

1 引 言

具有 Faraday 效应的材料也称为磁光材料, 广泛应用于激光和其他光学设备^[1]。常见的磁光材料有两种: 磁光晶体和磁光玻璃。其中磁光

晶体(例如钇铁石榴石和铽镓石榴石)具有工作频率可调及热稳定性高的优点, 但是其价格昂贵且制造困难^[2]。此外, 许多具有高 Faraday 旋转角的磁光晶体在短波范围内具有较高的吸收, 限制了它们的使用^[3]。与磁光晶体相比, 磁光玻璃

收稿日期: 2014-11-27; 修订日期: 2015-01-11

基金项目: 国际科技合作计划(2009DFR50520); 国家自然科学基金(51472151); 陕西省教育厅产业化项目(2013JC-22)资助

具有高透光率的优点,而且容易制成大的块体或光纤。目前具有高 Faraday 效应的磁光玻璃主要是稀土离子掺杂玻璃^[4-7]。利用稀土离子玻璃的 Faraday 效应及发光性能^[8-16],可制成夜视镜、光学电流传感器、磁光隔离器等光学器件^[2,12]。在所有的稀土离子中,Tb³⁺、Dy³⁺和 Pr³⁺离子的 Faraday 效应较 Sm³⁺、Gd³⁺、Eu³⁺及 Yb³⁺等离子更为明显^[8]。其中,由于 Tb³⁺离子具有较大的磁矩且在可见光及红外范围内具有较小的吸收系数而成为磁光玻璃常用的稀土离子。尽管含 3d 过渡金属离子的玻璃也具有较大的磁光效应,但在可见光波段的高吸收限制了其在光学领域的应用^[9]。此外,目前含稀土离子玻璃的 Faraday 效应的研究主要集中于磁性能^[15],而探究发光性能的玻璃也未提及 Faraday 效应。

Verdet 常数是表征磁光效应的主要参数。Verdet 常数越大,磁光设备的敏感性越好、尺寸越小。稀土磁光玻璃的 Verdet 常数与稀土离子含量成正比^[17]。然而稀土离子具有较强的集聚作用,高稀土含量的玻璃易析晶且熔化温度高,目前市场上的磁光玻璃的 Verdet 都较小。因此,选择

物理化学性能稳定且熔化温度低的基质玻璃来制备高 Verdet 常数的磁光玻璃是很有必要的^[18]。GeO₂-SiO₂ 系统玻璃因具有高稀土离子溶解能力而被应用于红光和绿光激光、近红外 LED 等领域^[19-20]。此外,玻璃的许多物理化学性能与其光学碱度有关^[21],Zhao 等^[22]发现玻璃的发光强度随着玻璃的光学碱度的增加而降低。

本文制备了高 Tb³⁺含量的 GeO₂-B₂O₃-SiO₂ (GBS)系统氧化物玻璃,探究了其在可见光范围内的 Faraday 效应及发光性能,对磁光材料的制备及研究具有重要的意义。

2 实 验

采用高温熔融法制备了 GBS 磁光玻璃,其组成见表 1。使用分析纯的 Tb₄O₇、Ga₂O₃、GeO₂、H₃BO₃和 SiO₂,按照量比称量配合料 50 g,加入铂金坩埚中于 1 400 °C 下熔制 2 h,并用铂金棒搅拌,以确保玻璃液的均一性。将熔融的玻璃液倒入预热的石墨模具中,待其固化后放入退火炉中,于 680 °C 下保温 4 h 以消除应力,然后随炉冷却至室温。

表 1 玻璃的组成、Verdet 常数 (V)、光学碱度 (A_{th}) 及氧离子极化率 (α_0)

Table 1 Composition, Verdet constant (V), optical basicity (A_{th}), and the electronic polarizability of oxide ion (α_0)

Sample	Tb ₂ O ₃ / %	Ga ₂ O ₃ / %	GeO ₂ / %	B ₂ O ₃ / %	SiO ₂ / %	V / ($\text{min} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)	A_{th}	α_0
T20	20	10	20	25	45	-2 000	0.576 0	1.526 5
T30	30	10	20	25	45	-2 800	0.611 4	1.577 6
T40	40	10	20	25	45	-3 500	0.640 8	1.622 6
T50	50	10	20	25	45	-4 000	0.665 5	1.662 5
T60	60	10	20	25	45	-4 500	0.686 6	1.698 2
T70	70	10	20	25	45	-5 000	0.704 9	1.730 4

采用中科院研制的 WFC 法拉第效应测试仪测试玻璃的 Verdet 常数,测试波长为 632.8 nm。采用日本 Hitachi 的 F-4600 荧光分光光度计测试磁光玻璃的激发、发射光谱及荧光寿命。所有测试均在室温下进行。

3 结果与讨论

3.1 GBS 玻璃的 Faraday 效应

通过测试可知高 Tb³⁺含量的 GBS 具有明显的 Faraday 效应。根据参考文献^[23]可知,在外磁场作用下,进入介质的左旋圆偏振光的折射率

和右旋圆偏振光的折射率不同,当它在介质中传输距离 L 后,其偏振面相对于原来振动方向转过了 θ 角。磁光玻璃的 Verdet 常数用公式 (1) 计算^[9,17]:

$$\theta = VLH, \quad (1)$$

其中 θ 为 Faraday 旋转角, V 为 Verdet 常数, L 为光通过的磁光材料的长度, H 为磁场强度。由公式 (1) 可知,为了获得较大的旋转角 θ ,可以通过提高 Verdet 常数、磁光材料的长度及磁场强度来实现。然而一般磁光器件尺寸较大,且长期在高磁场的作用下会产生大量的热量,导致

Verdet 常数随温度的变化而变化。因此,提高 Verdet 常数对磁光器件的小型化具有深远的意义。

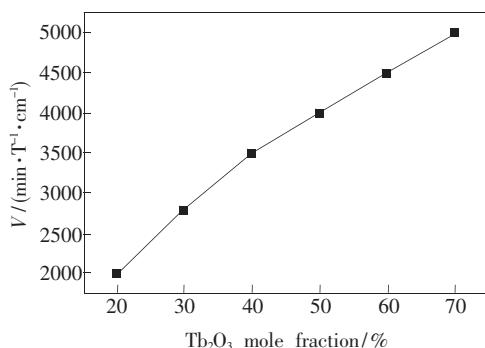


图1 磁光玻璃试样的 Tb₂O₃ 摩尔分数与 Verdet 常数的关系

Fig. 1 Relationship between the mole fraction of Tb₂O₃ and Verdet constant

在 632.8 nm 下测得磁光玻璃样品的 Verdet 常数为 -2 000 ~ -5 000 min · T⁻¹ · cm⁻¹ (表 1), 表现出明显的 Faraday 旋转效应, 大于一般的硅酸盐和磷酸盐磁光玻璃。其中负号表示偏振面沿磁场方向顺时针旋转, 其绝对值越大, Faraday 效应越明显。Tb₂O₃ 摩尔分数与 Verdet 常数的关系见图 1。由图 1 可知, 由于 Tb 具有较大的磁矩, 磁光玻璃的 Verdet 常数的绝对值随 Tb₂O₃ 摩尔分数呈线性增长关系, 与其他含稀土离子的磁光玻璃相似^[4-8]。此外, Tb³⁺ 离子的 4f-5d 能级跃迁也有助于 Faraday 效应^[13]。

3.2 磁光玻璃的光学碱度

光学碱度最早是由 Duffy 提出来的, 是材料的平均电子贡献能的数字表达形式, 与材料的光学性能及氧化物中阳离子的电子云状态有关^[21,24-25]。理论光学碱度可通过氧化物的光学碱度及玻璃的组成求得, 其表达式^[21,26]如下:

$$A_{th} = \sum X_i A_i, \quad (2)$$

其中 A_{th} 为理论光学碱度, X_i 为氧化物中的氧含量, A_i 为各氧化物的光学碱度。光学碱度与氧离子极化率的关系式^[23]如下:

$$A_{th} = 1.67(1 - 1/\alpha_0), \quad (3)$$

其中 α_0 为氧离子极化率。式(3)表明玻璃的理论光学碱度与氧离子极化率成正比关系。通过式(2)和式(3)求得的理论光学碱度与氧离子极化率见表 1。根据参考文献^[27-28]得 Tb₂O₃、GeO₂、

B₂O₃ 及 SiO₂ 的光学碱度分别为 0.954, 0.6, 0.42, 0.48。由表 1 可知, 随着 Tb₂O₃ 的摩尔分数由 20% 增加至 70%, GBS 磁光玻璃的光学碱度从 0.576 0 增加到 0.704 9, 与其他硼酸盐玻璃变化一致^[21]。由于 Tb³⁺ 离子具有大的离子半径和场强, 其极化率较高, 因此, 玻璃的光学碱度及氧离子极化率随 Tb³⁺ 离子含量的增加而增大。

此外, 氧离子极化率的增加有助于 Tb³⁺ 离子的能级分裂^[18], 导致 4f 到 5d 能级跃迁加大^[20]。根据晶体场理论, 大的光学碱度可增加 Tb³⁺ 离子的能级分裂, 即高浓度的 Tb³⁺ 离子增加了磁光玻璃的磁矩和氧离子极化率, 导致 Verdet 常数加大。因此, 有可能通过提高玻璃的光学碱度来提高 Verdet 常数。

3.3 磁光玻璃的发光性能

虽然没有文献报道含 Tb³⁺ 离子磁光玻璃的发光现象, 但我们发现当 Tb₂O₃ 摩尔分数为 70% 时, 玻璃仍具有发光性能。图 2(a) 为不同 Tb₂O₃ 含量的磁光玻璃在监测 545 nm 下的激发光谱。从图可以看到磁光玻璃在 342, 353, 370, 378, 488 nm 处有激发峰, 分别为 Tb³⁺ 离子的 ⁷F₆ → ⁵L₇、⁷F₆ → ⁵L₉、⁷F₆ → ⁵G₅、⁷F₆ → ⁵D₃ 及 ⁷F₆ → ⁵D₄ 跃迁^[29-30]。

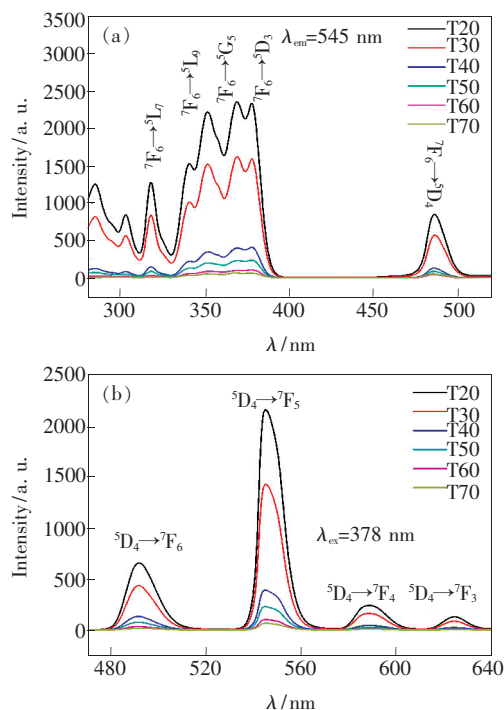


图2 磁光玻璃试样在监测 545 nm 下的激发光谱 (a) 和 378 nm 激发下的发射光谱 (b)

Fig. 2 Excitation spectra monitored at 545 nm (a) and emission spectra excited by 378 nm (b) of the glasses

其中 378 nm 处激发峰的强度约为 488 nm 处的 3 倍。此外,激发峰强度随 Tb^{3+} 离子浓度的增加而变小,峰宽化。但是由于 Tb^{3+} 离子的 4f 电子被 $5s^25p^6$ 壳层屏蔽,各激发峰的位置基本不变。

378 nm 激发下的 GBS 玻璃的发射光谱如图 2(b) 所示。各发射峰主要源于 Tb^{3+} 离子的 5D_4 向 7F_j 能级的跃迁: $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$ (490 nm)、 $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ (545 nm)、 $^5D_4 \rightarrow ^7F_4$ (588 nm) 和 $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$ (624 nm)^[29-30]。 Tb^{3+} 离子的能级跃迁示意图及 378 nm 激发下磁光玻璃的颜色分别见图 3(a) 和图 3(b)。 $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ 跃迁发出的黄绿光是发光强度最大的,因为在该波长下跃迁几率最大^[31-32]。

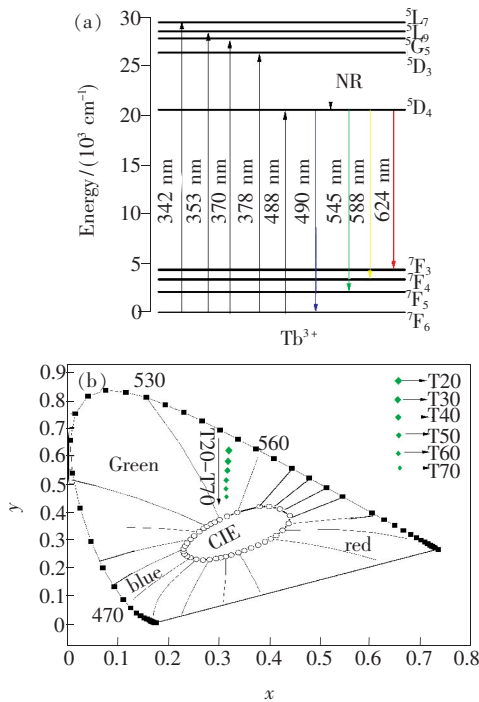


图 3 (a) Tb^{3+} 离子能级跃迁示意图;(b) 不同 Tb 含量的磁光玻璃在 378 nm 激发下的颜色及 CIE 坐标。
Fig. 3 (a) Energy level diagram of Tb^{3+} ions. (b) CIE chromaticity coordinates of the glasses with different Tb content under 378 nm excitation.

图 4 为不同 Tb_2O_3 含量试样在 378 nm 激发下的 $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ 发射的荧光寿命曲线。由图可知 Tb^{3+} 离子的衰减曲线服从一阶指数方程^[31]:

$$I_t = I_0 \exp(-t/\tau), \quad (4)$$

其中 I_t 和 I_0 分别为在 t 和起始时间的发光强度, t 为时间, τ 为指数成分的衰减时间。根据公式(4)及衰减曲线可知,随着 Tb_2O_3 含量的增加,磁光玻璃的荧光寿命由 2.317 ms 降至 0.170 ms。

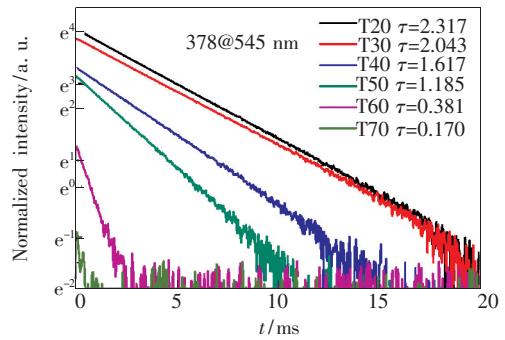


图 4 GBS 磁光玻璃试样的荧光寿命
Fig. 4 Fluorescence decay curve of GBS glasses

在磁光玻璃的发射光谱中,位于 545 nm 处的最强峰随 Tb_2O_3 摩尔分数从 20% 增加到 70% 而逐渐减小,原因是 Tb^{3+} 离子的 5D_4 能级的浓度猝灭^[33-35]。由 5D_3 到 5D_4 能级有两个非辐射跃迁过程:一个是源于共振能量转移的交叉弛豫 $^5D_3 + ^7F_6 \rightarrow ^5D_4 + ^7F_0$ ^[36];另一个是多声子辅助的无辐射弛豫^[36]。其中,交叉弛豫与离子间的距离成正比^[37]。 Tb 浓度的增加缩短了 Tb^{3+} 离子间距离,增加了相互作用,降低了磁光玻璃的发光强度与寿命。此外,根据参考文献可知,交叉弛豫作用与离子浓度成平方关系,与 OH^- 及光学碱度成线性关系^[31,38-39]。

图 5 为 Tb^{3+} 离子浓度与荧光寿命的关系,由图可知它们成非线性关系,因此交叉弛豫作用是导致磁光玻璃发光猝灭的主要原因。

根据报道,光学碱度的增加不利于 Tb^{3+} 离子从基态跃迁到高的能级^[19]。因此,随着 Tb_2O_3 含量的增加,光学碱度增加,磁光玻璃的发光性能降低,与硼酸盐玻璃掺 Bi^{3+} 、 Tb^{3+} 的结果一致^[22,40]。然而,这与 Tanaka 等掺 Eu^{2+} 的结果相反,可能与 Eu^{2+} 离子特殊的电子构型有关^[17]。

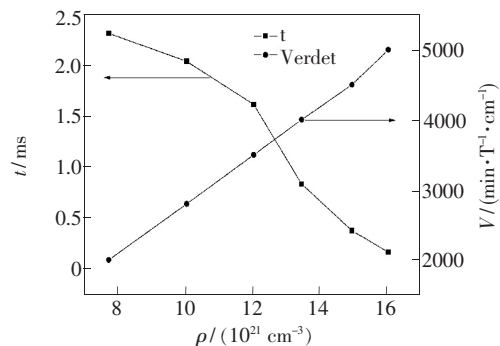


图 5 Tb^{3+} 离子浓度与荧光寿命及 Verdet 常数的关系
Fig. 5 Relationship between concentration of Tb^{3+} ions, lifetime and Verdet constant of samples

4 结 论

采用高温熔融法制备了高 Tb^{3+} 离子浓度掺杂的磁光玻璃,探究了其Faraday效应及发光性能。研究表明: Tb 离子具有较大的磁矩,其含量的增加导致磁光玻璃Verdet常数的增加,且光学碱度及Verdet常数随 Tb_2O_3 含量增加呈线性

递增关系。随着 Tb^{3+} 离子含量的增加,磁光玻璃的发光强度及寿命降低,主要原因有:(1)稀土离子浓度增加,离子间距缩短;(2)磁光玻璃的光学碱度增加,玻璃中 OH^- 增加;(3) Tb^{3+} 的 $^5D_3 + ^7F_6 \rightarrow ^5D_4 + ^7F_0$ 交叉弛豫。其中交叉弛豫是导致浓度猝灭的主要原因。制备的高Verdet常数磁光玻璃可用于激光及磁光设备。

参 考 文 献:

- [1] Ouedraogo K, Topsis S, Gaymouini J, *et al.* Accurate ellipsometric magnetic-field sensor used to align the watt balance magnetic circuit of the French National Metrology Institute [J]. *Sens. Actuat. A*, 2012, 175:9-14.
- [2] Akamatsu H, Fujita K, Nakatsuka Y, *et al.* Magneto-optical properties of Eu^{2+} -containing aluminoborosilicate glasses with ferromagnetic interactions [J]. *Opt. Mater.*, 2013, 35(11):1997-2000.
- [3] Tsutsumi M. Optical isolator-modulator in a microstrip line on yttrium iron garnet single crystal [J]. *IEICE. T. Electron.*, 2001, 84(3):325-330.
- [4] Burzo E, Ardelean I, Ursu I, *et al.* Magnetic properties of $xEu_2O_3(1-x)[3B_2O_3-PbO]$ glasses [J]. *Mater. Lett.*, 1996, 26:103-105.
- [5] Culea E, Pop A, Cosma I, *et al.* Magnetic behaviour of $xGd_2O_3 \cdot (1-x)Na_2O \cdot 2B_2O_3$ glasses [J]. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1996, 157:163-164.
- [6] Culea E, Ristoiu T, Bratu I, *et al.* Magnetic and structural behaviour of some borate glasses containing holmium ions [J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 1999, 57:259-261.
- [7] Culea E, Ristoiu T, Bratu I, *et al.* Structural and magnetic behavior of some borate glasses containing europium ions [J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 2000, 75:82-84.
- [8] Malakhovskii A V, Edelman I S, Radzyner Y, *et al.* Magnetic and magneto-optical properties of oxide glasses containing Pr^{3+} , Dy^{3+} and Nd^{3+} ions [J]. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2003, 263(2):161-172.
- [9] Garaje S N, Apte S K, Kumar G, *et al.* Ferric oxide quantum dots in stable phosphate glass system and their magneto-optical study [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2013, 48(2):901-906.
- [10] Alers P B. Faraday effect in cerium phosphate glasses at low temperatures [J]. *Phys. Rev.*, 1959, 116(6):1483.
- [11] Rubinstein C, Berger S, Van Uiter L, *et al.* Faraday rotation of rare-earth (III) borate glasses [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 35(8):2338-2340.
- [12] Li C Y, Wu Y M, Cao L M, *et al.* Magneto-optical modulation method for measuring glass internal stress [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2014, 22(1):58-62 (in Chinese).
- [13] Petrovskii G, Edelman I, Zarubina T, *et al.* Faraday effect and spectral properties of high-concentrated rare earth oxide glasses in visible and near UV region [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 1991, 130(1):35-40.
- [14] Qiu J, Higuchi H, Kawamoto Y, *et al.* Faraday effect of $GaS_{3/2}-GeS_2-LaS_{3/2}$ -based glasses containing various rare-earth ions [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, 80(9):5297-5300.
- [15] Qiu J, Kawamoto Y, Hirao K. Faraday effect of $ZrF_4-BaF_2-LnF_3$ glasses ($Ln = La, Ce, Pr, Tb$ and Dy) [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, 36:1091-1093.
- [16] Hayakawa T, Nogami M, Nishi N, *et al.* Faraday rotation effect of highly Tb_2O_3/Dy_2O_3 -concentrated $B_2O_3-Ga_2O_3-SiO_2-P_2O_5$ glasses [J]. *Chem. Mater.*, 2002, 14(8):3223-3225.
- [17] Tanaka K, Fujita K, Soga N, *et al.* Faraday effect of sodium borate glasses containing divalent europium ions [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, 82(2):840-844.
- [18] Zu C, Chen J, Zhao H, *et al.* Effect of cerium on luminescence and irradiation resistance of Tb^{3+} doped silicate glasses [J]. *J. Alloys Compd.*, 2009, 479(1):294-298.
- [19] Witkowska A, Padlyak B, Rybicki J, An EXAFS study of the local structure of rare-earth luminescence centres in the $3CaO-Ga_2O_3-3GeO_2$ glass [J]. *Opt. Mater.*, 2008, 30:699-702.

- [20] Doweidar H. Considerations on the structure and physical properties of B_2O_3 - SiO_2 and GeO_2 - SiO_2 glasses [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2011, 357(7):1665-1670.
- [21] Rejisha S, Santha N. Structural investigations on $20MO-xBi_2O_3-(80-x)B_2O_3$ ($M = Ca, Sr$ and $Ba; x = 15$ and 55) glasses [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2011, 357(22):3813-3821.
- [22] Zhao S, Xin F, Xu S, *et al.* Luminescence properties and energy transfer of Eu/Tb ions codoped aluminoborosilicate glasses [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2011, 357(11):2424-2427.
- [23] Pershan P. Magneto-optical effects [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 38:1482-1490.
- [24] Duffy J. Redox equilibria in glass [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 1996, 196:45-50.
- [25] Komatsu T, Ito N, Honma T, *et al.* Electronic polarizability and its temperature dependence of Bi_2O_3 - B_2O_3 glasses [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2010, 356(49):2310-2314.
- [26] Pal Singh G, Kaur P, Kaur S, *et al.* Investigation of structural, physical and optical properties of CeO_2 - Bi_2O_3 - B_2O_3 glasses [J]. *Physica B*, 2012, 407(21):4168-4172.
- [27] Dimitrov V, Sakka S. Electronic oxide polarizability and optical basicity of simple oxides [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, 79(3):1736-1740.
- [28] Zhao X, Wang X, Lin H, *et al.* Electronic polarizability and optical basicity of lanthanide oxides [J]. *Physica B*, 2007, 392(1):132-136.
- [29] Zhang Q, Chen G, Xu Y, *et al.* Abnormal upconversion luminescence from Yb^{3+} doped and Tb^{3+}/Yb^{3+} codoped high silica glasses induced by intrinsic optical bistability [J]. *Chem. Appl. Phys. B*, 2010, 98(3):261-265.
- [30] Gu L S, Shi N, Zhang L, *et al.* Synthesis and luminescent properties of Tb/Eu co-doped zinc borophosphate glasses for white light generation [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2014, 35(8):897-904 (in Chinese).
- [31] Zhang L, Peng M, Dong G, *et al.* An investigation of the optical properties of Tb^{3+} -doped phosphate glasses for green fiber laser [J]. *Opt. Mater.*, 2012, 34(7):1202-1207.
- [32] Jiao H, Liao F, Tian S, *et al.* Influence of rare earth Sc and La to the luminescent properties of FED blue phosphor $Y_2SiO_5:Ce$ [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2004, 151(7):39-42.
- [33] He D, Yu C, Cheng J, *et al.* Effect of Tb^{3+} concentration and sensitization of Ce^{3+} on luminescence properties of terbium doped phosphate scintillating glass [J]. *J. Alloys Compd.*, 2011, 509(5):1906-1909.
- [34] Dejneka M, Snitzer E, Riman R. Spectroscopic characterization of Eu^{3+} -doped inorganic and alkoxide sol-gel derived fluorozirconate glass and zirconium fluoride gels [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 1996, 202(1):23-34.
- [35] Williams D K, Bihari B, Tissue B M, *et al.* Preparation and fluorescence spectroscopy of bulk monoclinic $Eu^{3+}:Y_2O_3$ and comparison to $Eu^{3+}:Y_2O_3$ nanocrystals [J]. *J. Phys. Chem. B*, 1998, 102:916-920.
- [36] Campbell J, Suratwala T. Nd-doped phosphate glasses for high-energy/high-peak-power lasers [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2000, 263:318-341.
- [37] Tsuboi T. Optical properties of Ce^{3+}/Tb^{3+} -codoped borosilicate glass [J]. *Eur. Phys. J.—Appl. Phys.*, 2004, 26(2):95-101.
- [38] Ratnakaram Y, Tirupathi Naidu D, Chakradhar R. Absorption and emission properties of Nd^{3+} in lithium cesium mixed alkali borate glasses [J]. *Solid State Commun.*, 2005, 136(1):45-50.
- [39] Meng X G, Qiu J R, Peng M Y, *et al.* Near infrared broadband emission of bismuth-doped aluminophosphate glass [J]. *Opt. Express*, 2005, 406(5):1628-1634.
- [40] Rajyasree C, Vinaya Teja P M, Murthy K, *et al.* Optical and other spectroscopic studies of lead, zinc bismuth borate glasses doped with CuO [J]. *Physica B*, 2011, 406(23):4366-4372.



刘盼(1989 -),男,陕西商洛人,硕士研究生,2012年于陕西科技大学获得学士学位,主要从事功能玻璃方面的研究。

E-mail: liupan8910@163.com



殷海荣(1962 -),男,陕西渭南人,教授,2001年于陕西科技大学获得硕士学位,主要从事生物材料和无机非金属材料方面的研究。

E-mail: foshan83218593@163.com