

文章编号: 1000-7032(2016)02-0151-07

NBT-Eu 纳米粉体的水热合成及其发光性能研究

孙建建, 陈鹏飞, 张 帅, 方必军*, 丁建宁*

(常州大学 材料科学与工程学院, 江苏省光伏科学与工程协同创新中心, 江苏 常州 213164)

摘要: 采用水热合成法、在不同条件下制备 $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.49}\text{Eu}_{0.01}\text{TiO}_3$ (NBT-Eu) 纳米粉体。通过 X 射线粉末衍射 (XRD)、紫外-可见光谱、透射电子显微镜、荧光光谱对样品进行表征。结果表明, 在 200 °C、碱浓度 $12 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、反应时间 24 h、添加剂 OP-10 用量为 0.6 mL 时, 可以得到纯三方钙钛矿结构的 NBT-Eu 粉体, 该粉体以直径为 15 ~ 200 nm 的纳米棒形式存在。NBT-Eu 粉体在 458 nm 激发下, 产生 689 nm 的荧光, 该荧光由 Eu^{3+} 的 $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_4$ 能级跃迁产生。

关键词: NBT-Eu; 水热合成; 光致发光

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20163702.0151

Hydrothermal Synthesis and Luminescence Properties of NBT-Eu Nanopowders

SUN Jian-jian, CHEN Peng-fei, ZHANG Shuai, FANG Bi-jun*, DING Jian-ning*

(School of Materials Science and Engineering, Jiangsu Collaborative Innovation Center of Photovoltaic Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

* Corresponding Authors, E-mail: fangbj@cczu.edu.cn; dingjn@cczu.edu.cn

Abstract: $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.49}\text{Eu}_{0.01}\text{TiO}_3$ nanopowders were prepared by the hydrothermal method under different conditions. The synthesized nanopowders were characterized by X-ray diffraction, UV-visible spectra, transmission electron microscopy and photoluminescence spectra. The results reveal that the phase-pure rhombohedral perovskite structure NBT-Eu powders can be prepared at a hydrothermal temperature of 200 °C for 24 h with $12 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH and 0.6 mL OP-10. The powders exhibit nanorod shape with a diameter of 15 to 200 nm. Under the excitation of 458 nm light, NBT-Eu nanopowders exhibit the strongest emission at 689 nm, which can be attributed to $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_4$ transition of Eu^{3+} .

Key words: NBT-Eu; hydrothermal synthesis; photoluminescence

1 引 言

稀土元素内层的 4f 电子容易被激发, 能够在 4f 电子层内或 d-f 电子层之间跃迁, 从而产生从紫外区到红外区的不同波段的吸收和发射的荧光光谱^[1]。与其他具有偶数个 4f 电子的稀土离子相比, Eu^{3+} 有一个巨大优势: 其吸收和发射光谱

跃迁中的基态能级是非简并的^[2]。自 1964 年 $\text{Y}_2\text{O}_3: \text{Eu}^{3+}$ 被发现以来, 稀土发光材料的研究与发展取得了巨大进展, 已经在显示、照明、光电子等许多领域获得了广泛的应用^[3]。稀土发光材料主要是由基体材料掺杂稀土离子(激活剂)构成, 作为材料主体的化合物基体对材料的性能有重要的影响。声子能量较低的基体材料能够降低

收稿日期: 2015-11-06; 修订日期: 2015-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(51577015); 江苏省高校自然科学研究重大项目(15KJA43002); 江苏高校优势学科建设工程(苏教科办[2014]9号)资助项目

无辐射弛豫发生的概率进而提高材料的发光效率。由于晶体材料和玻璃态物质的声子能量较低,所以作为基质材料被研究的较多^[4]。

1961年,Smolenskii等首先报道了钛酸铋钠($\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$)无铅陶瓷优异的电、声、光学性能^[5-6]。钛酸铋钠陶瓷声子能量较低,与玻璃态物质相比具有较高的稳定性和机械强度,是稀土发光材料的良好基质。Tian等的研究表明,铁电陶瓷的剩余极化能诱导荧光强度增大,因为极化能够降低陶瓷基体的晶格对称性^[7]。稀土元素的掺杂同时也对铁电陶瓷的电学性能有增强作用^[8-9]。Luo等进一步发现,NBT基陶瓷中的A位稀土掺杂与B位掺杂相比,能够获得更好的铁电、压电和荧光性能^[8,10]。稀土掺杂铁电材料拓宽了铁电材料的应用范围,为进一步开发新型多功能材料提供了可能,具有广阔的应用前景和研究价值。

陶瓷粉体的制备是现代陶瓷生产环节中至关重要的一环,粉体的粒径直接影响到陶瓷的物理、化学性能^[11]。在实际的商业应用中,同样要求荧光粉粒径均匀、分散性良好。与传统的固相反应法相比,采用水热法制备粉体时可以通过控制水热条件来调节产物的形貌和尺寸,在水热反应过程中添加各种有机添加剂可以进一步提高产物的均匀性、分散性,实现形貌的多样性^[12]。蒋晨飞等发现,1% Eu掺杂能够获得良好的荧光性能^[13],同时能够有效改善铁电陶瓷的电学性能^[4]。考虑到水热法制备工艺的影响,本文通过水热法一步反应合成1% Eu掺杂的 $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.49}\text{Eu}_{0.01}\text{TiO}_3$ (NBT-Eu)纳米粉体,研究反应时间、温度、碱浓度^[14-15]、添加剂对纳米粉体结构、形貌和荧光性能的影响。

2 实 验

2.1 样品制备

以分析纯的 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 NaNO_3 、 Eu_2O_3 和 TiO_2 为原料,按照化学式 $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.49}\text{Eu}_{0.01}\text{TiO}_3$ 配比准确称量。将称量好的药品与一定浓度的60 mL的 NaOH (AR)溶液混合均匀,加入OP-10作为添加剂,放入聚四氟乙烯内衬的不锈钢制高压反应釜,按照不同的水热合成条件进行反应。水热合成后,自然冷却至室温,将产物用蒸馏水反复洗涤、离心(4 000 r/min),直至中性,干燥后得

NBT-Eu粉体。

2.2 材料表征

采用XRD(日本Rigaku公司D/max-2500/PC X-ray Diffractionmeter)测定NBT-Eu粉体的晶体结构;采用透射电镜(JEOL JSM-6360LA)观察样品的微观形貌,分析晶体结构;采用激光粒度分布仪(BT-9300S)测试粉体的粒度分布;采用紫外-可见分光光度计(Shimadzu UV-2450UV-visible Spectrophotometer)测试粉体的透射光谱;采用荧光光度计(PerkinElmer Fluorescence Spectrometer LS 45)测试样品的激发光谱和发射光谱,分析样品的荧光性能。

3 结果与讨论

3.1 NBT-Eu粉体水热合成条件分析

通过四因素(温度A、碱浓度B、时间C、添加剂OP-10用量D)三水平(1、2、3)的正交实验确定NBT-Eu粉体的水热合成条件(表1)。

图1给出在不同水热条件下制备的NBT-Eu粉体的XRD图。从图1可以看出,9号粉体的衍射峰强度较高、峰宽较窄,呈现较纯的钙钛矿结构,与NBT标准物相(JCPDS No. 89-3109)一致,没有明显的杂相,XRD结果评定为10分。1号样品的XRD衍射图通过Jade软件分析,确定存在钛酸铋钠相,但是杂相过多且衍射峰较弱,XRD结果评定为2分。

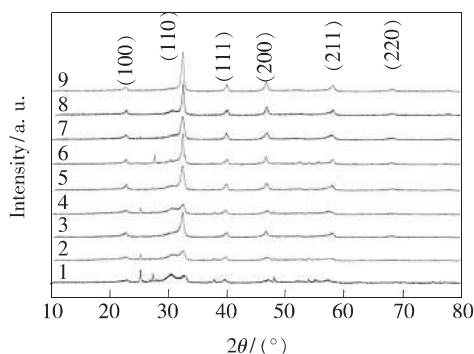


图1 不同水热条件下制备的NBT-Eu粉体的XRD图
Fig. 1 XRD patterns of BNT-Eu powders prepared by hydrothermal method under different conditions

图2给出不同水热条件制备的NBT-Eu粉体在458 nm激发光下的荧光发射光谱(样品编号及其对应的水热条件在表1中给出)。从图中可以看出,不同水热条件制备的NBT-Eu粉体,其荧光发射峰数量、位置基本相同,都在689 nm处呈

表1 正交实验结果评定计算表
Tab.1 Calculation results of orthogonal test

序号	因素								结果	
	A. 温度/ ℃	B. NaOH 浓度/ (mol · L ⁻¹)		C. 时间/ h	D. OP-10 用量/ mL			XRD	PL	
1	160	8	8	8	0.6			2	2	
2	160	10	16	16	1.5			3	5	
3	160	12	24	24	2.4			9	9	
4	180	8	16	16	2.4			4	8	
5	180	10	24	24	0.6			8	4	
6	180	12	8	8	1.5			5	6	
7	200	8	24	24	1.5			7	3	
8	200	10	8	8	2.4			6	7	
9	200	12	16	16	0.6			10	10	
I	4.7	5.3	4.3	4.3	4.3	5	6.7	5.3	影响主次	影响主次
II	5.7	6	5.7	5.3	5.7	7.7	5	4.7	C ≈ B > A > D	B > D > C > A
III	7.7	6.7	8	8.3	8	6	6	8	较佳水平	较佳水平
R	3	1.4	3.7	4	3.7	2.7	1.7	3.3	A ₃ B ₃ C ₃ D ₁	A ₃ B ₃ C ₂ D ₃

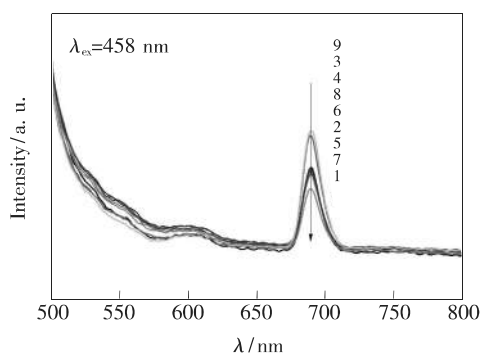


图2 不同水热条件制备的 NBT-Eu 粉体的荧光发射光谱 ($\lambda_{ex} = 458 \text{ nm}$)

Fig.2 PL emission spectra of the NBT-Eu powders prepared by hydrothermal method under different conditions

现最强发射峰,对应于 $^5D_0 \rightarrow ^7F_4$ 跃迁,位于红光区域。随着水热条件的变化,689 nm 荧光发射峰 的强度随之改变。其中 9 号样品在 689 nm 处 的发射峰最强,评定为 10 分;1 号样品在 689 nm 处 的发射峰最弱,评定为 2 分。

表 1 给出了 9 组实验的结果评定计算,表中 I、II、III 行给出了 4 个因素的 3 个不同水平的影响结果平均值, R 作为极值可以判断不同因素对实验指标的影响大小关系, R 值越大则说明该因素在所有因素中对实验结果的影响相对越大。从表 1 中的 R 值可以看出 4 个因素中反应时间和碱

浓度对样品的 XRD 结果影响较大,其次是反应温度,添加剂的用量对 XRD 结果影响较小。碱浓度同样对样品的荧光强度影响最大,温度对样品的荧光强度影响最小。从表 1 中 I、II、III 行可以看出,反应温度、碱浓度的增加有利于纯相钛酸铋钠的合成和荧光强度的增大;反应时间的延长同样有利于钛酸铋钠的合成,但是对于荧光强度的贡献呈现先增加后减少的趋势;有机添加剂的用量对钙钛矿结构的形成和荧光强度的贡献都呈现先减少后增加的趋势。综合分析 XRD、激光粒度分析和荧光性能结果,得出优化条件为温度 200 ℃、碱浓度 12 mol · L⁻¹、时间 24 h、OP-10 用量 0.6 mL。

3.2 NBT-Eu 的物相及形貌

图 3 给出反应温度 200 ℃、碱浓度 12 mol · L⁻¹、OP-10 用量为 0.6 mL 时经 24 h 反应获得的 NBT-Eu 粉体的 XRD 图。可以看出,该条件下制备的粉体的衍射峰比较尖锐,衍射峰与标准卡片 JCPDS No. 89-3109 的 NBT 一致,没有明显的杂相产生,表明该条件制备的粉体呈现较纯的钙钛矿结构。

图 4 给出最佳条件下反应制备的 NBT-Eu 粉体的 TEM 照片。从图中可以清晰地看出产物的形貌特征。NBT-Eu 以纳米棒的形式存在,纳米棒

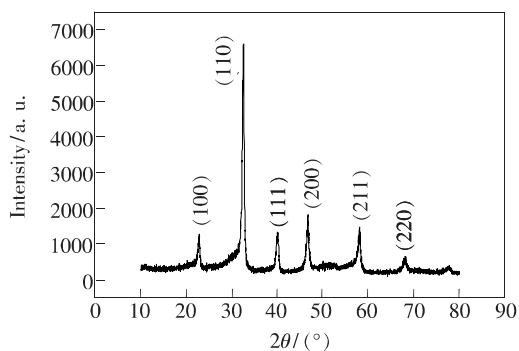


图 3 $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.49}\text{Eu}_{0.01}\text{TiO}_3$ 粉体的 XRD 图
Fig. 3 XRD patterns of BNT-Eu powder

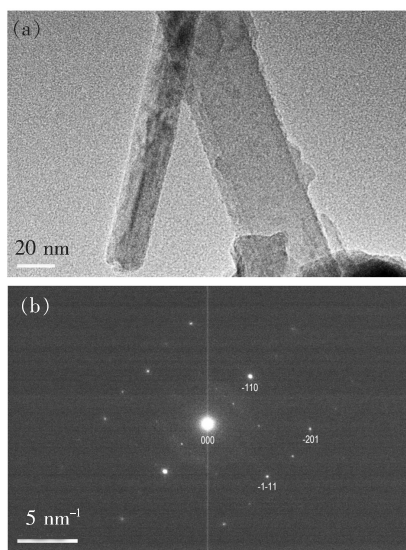


图 4 NBT-Eu 纳米棒的 TEM 形貌(a) 和选区电子衍射(b)
Fig. 4 TEM (a) and SAED (b) images of NBT-Eu nanorods

呈无序分布,表面比较光滑,但是纳米棒直径变化较大,最大直径为 200 nm,最小为 15 nm,长度达到微米量级。在水热合成钛酸铋钠纳米粉体过程中, TiO_2 和 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 溶解后形成钛铋的前驱体,利用原位结晶机制,通过前驱体上的离子原子重排形成 NBT 纳米棒^[11,16]。图 4 中还给出了 NBT-Eu 纳米棒 $[112]$ 带轴的选区电子衍射,周期排列的二维衍射斑点说明 NBT-Eu 纳米棒是单晶结构。

3.3 NBT-Eu 的发光性能

图 5(a) 给出在最佳条件下制备的 NBT-Eu 粉体的紫外-可见光谱。从图 5(a) 中可以看出,该 NBT-Eu 粉体在 291 nm(紫外光区)处出现最大吸收值。

图 5(b) 给出了 NBT-Eu 粉体的 $(\alpha h\nu)^2$ 与 $h\nu$ 关系曲线,利用 Tauc 公式:

$$\alpha h\nu \propto k(h\nu - E_g), \quad (1)$$

式中, α 为吸收系数, $h\nu$ 是发射光子的能量, E_g 为光学能隙, k 为一常数。这里用吸光度 A 替代吸收系数处理。将图中曲线的线性部分做延长线交于横轴,交点的横坐标就是材料的禁带宽度值,为 3.17 eV ^[17]。

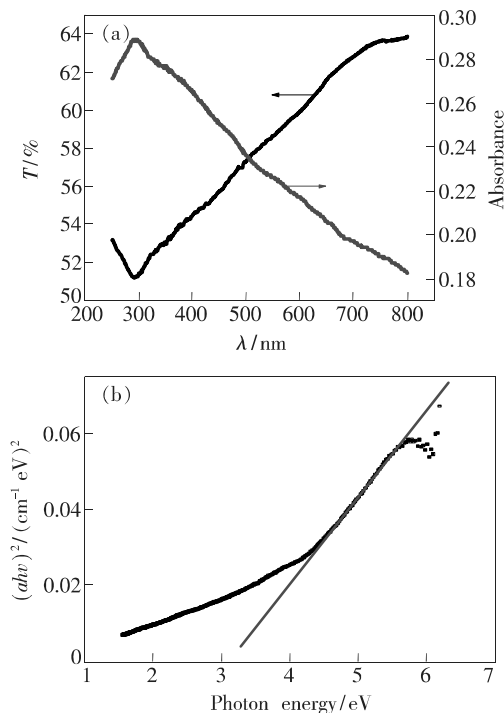


图 5 (a) NBT-Eu 粉体的紫外-可见光谱;(b) NBT-Eu 的 $(\alpha h\nu)^2$ 与 $h\nu$ 的关系曲线。

Fig. 5 (a) UV-visible spectra of BNT-Eu powder. (b) Relationship between $(\alpha h\nu)^2$ and $h\nu$ of BNT-Eu powder.

图 6 给出了 NBT-Eu 粉体在监测波长为 690 nm 时获得的激发光谱。图中在 458 nm 处有明显的激发峰,该激发峰是 Eu^{3+} 离子从基态跃迁至 5d 能级引起,表明在 458 nm 处可以有效地激发样品。

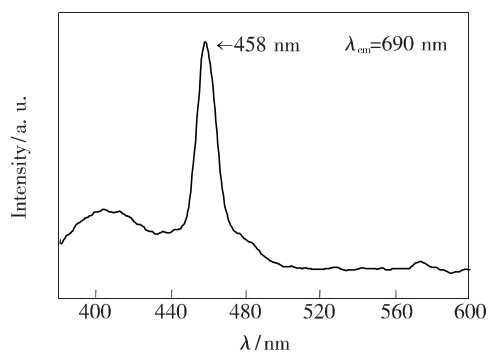


图 6 NBT-Eu 粉体的激发光谱($\lambda_{em} = 690 \text{ nm}$)

Fig. 6 Excitation spectrum of the BNT-Eu powder ($\lambda_{em} = 690 \text{ nm}$)

图7(a)给出了样品在458 nm激发光下的发射光谱。其中526 nm处的峰对应于 $^5D_1 \rightarrow ^7F_1$ 跃迁;550 nm处的峰对应于 $^5D_1 \rightarrow ^7F_2$ 跃迁;593 nm处的峰较强,对应于 $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ 跃迁,位于橙光区域;689 nm处的发射峰最强,对应于 $^5D_0 \rightarrow ^7F_4$ 跃迁,位于红光区域,与图5激发光谱的监测波长相对应。图7(b)给出了样品在394 nm激发光下的发射光谱。图中在526 nm和593 nm处仍有发射峰,分别对应于 $^5D_1 \rightarrow ^7F_1$ 和 $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ 跃迁,与图7(a)中的发射峰一致,而550 nm处的发射峰由于强度较弱无法测出。样品在更短波长的激发光激发下,虽然部分载流子吸收能量跃迁到更高能级,不过并没有新的发射峰,说明跃迁到更高能级后,载流子会经过无辐射弛豫到最低激发态 5D_1 能级,不会在更高的能级产生跃迁。反而因为样品对该波长的光子吸收较少,导致发射峰减弱或消失^[18]。

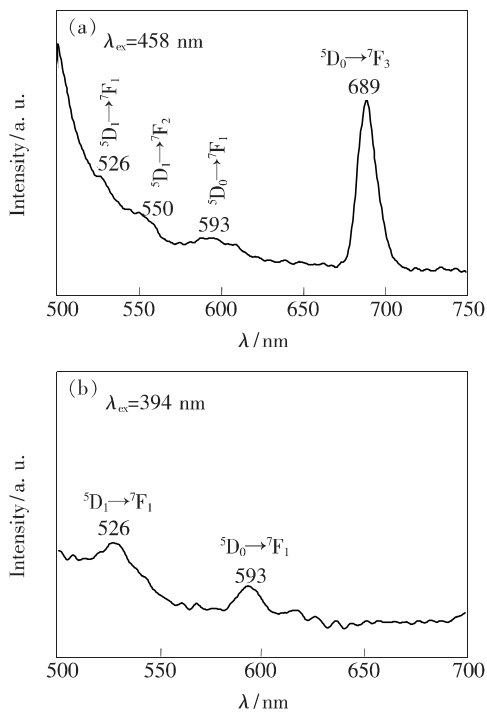


图7 NBT-Eu 粉体的发射光谱。(a) $\lambda_{ex} = 458$ nm; (b) $\lambda_{ex} = 394$ nm。

Fig. 7 PL emission spectra of the NBT-Eu powders. (a) $\lambda_{ex} = 458$ nm. (b) $\lambda_{ex} = 394$ nm.

参 考 文 献:

[1] 张希艳, 卢利平, 柏朝晖, 等. 稀土发光材料 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005:3-11.

ZHANG X Y, LU L P, BAI Z H, et al. Rare Earth Luminescent Materials [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005:3-11. (in Chinese)

图8给出了NBT-Eu粉体的发光过程示意图。载流子在458 nm的激发光激发下获得能量,从基态跃迁至能量较高的 5D_2 能级,由黑色粗线箭头表示。 5D_2 能级的载流子处于不稳定状态,发生由黑色细线箭头表示的非辐射跃迁^[19]。一部分载流子非辐射弛豫至 5D_1 能级,随后再跃迁至f能级,发射出526 nm和550 nm波长的绿色荧光,另一部分发生非辐射弛豫至 5D_0 能级后,再跃迁至f能级,发射出593 nm和689 nm的红色荧光^[20]。

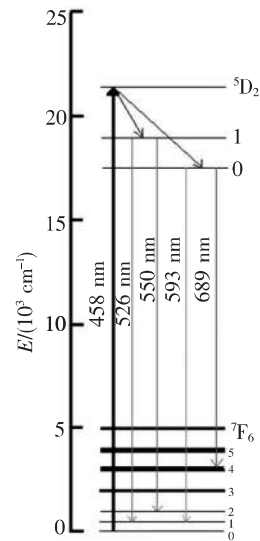


图8 NBT-Eu 纳米材料的发光示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the luminescence of NBT-Eu nanomaterials

4 结 论

利用水热法一步合成NBT-Eu纳米粉体,通过正交试验得到了较好的反应条件,即在反应温度200 °C、碱浓度 $12 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、OP-10用量为0.6 mL时经过24 h反应可制得纯三方钙钛矿结构的NBT-Eu纳米粉体。NBT-Eu粉体在291 nm处出现最大吸收值,其光学带隙为3.17 eV。当激发波长为458 nm时,NBT-Eu粉体的发射光谱中产生4个发射峰,分别对应于 $^5D_1 \rightarrow ^7F_1$ (526 nm)、 $^5D_1 \rightarrow ^7F_2$ (550 nm)、 $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ (593 nm)和 $^5D_0 \rightarrow ^7F_4$ (689 nm)跃迁,其中689 nm的发射峰最强。

- [2] BINNEMANS K, Interpretation of europium (III) spectra [J]. *Coordin. Chem. Rev.* , 2015 , 295 :1-45.
- [3] 刘荣辉,黄小卫,何华强,等. 稀土发光材料技术和市场现状及展望 [J]. 中国稀土学报, 2012, 30(3) :265-272.
LIU R H, HUANG X W, HE H Q, *et al.* . Prospect and advances of technique and market of rare earth luminescent materials [J]. *J. Chin. Rare Earth Soc.* , 2012, 30(3) :265-272. (in Chinese)
- [4] 杨建虎,戴世勋,姜中宏. 稀土离子的上转换发光及研究进展 [J]. 物理学进展, 2003, 23(3) :284-298.
YANG J H, DAI S X, JIANG Z H. Upconversion emission of rare earth ions and its recent developments [J]. *Prog. Phys.* , 2003, 23(3) :284-298. (in Chinese)
- [5] PRUSTY R K, KURUVA P, RAMAMURTY U, *et al.* . Correlations between mechanical and photoluminescence properties in Eu doped sodium bismuth titanate [J]. *Solid State Commun.* , 2013, 173 :38-41.
- [6] ETINC T, SPREITZER M, LOGAR M, *et al.* . Hydrothermal synthesis of nanosized $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ [J]. *Am. Ceram. Soc.* , 2011, 94(11) :3793-3799.
- [7] TIAN X L, WU Z, JIA Y M, *et al.* . Remanent-polarization-induced enhancement of photoluminescence in Pr^{3+} -doped lead-free ferroelectric $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3$ ceramic [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 2013, 102(4) :042907-1-3.
- [8] LUO L H, DU P, LI W P, *et al.* . Effects of Er doping site and concentration on piezoelectric, ferroelectric, and optical properties of ferroelectric $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ [J]. *J. Appl. Phys.* , 2013, 114(12) :124104-1-6.
- [9] SUN H Q, ZHANG Q W, WANG X S, *et al.* . The photoluminescence and electrical properties of lead-free $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{-TiO}_3\text{:Pr}$ ceramics [J]. *Ceram. Int.* , 2014, 40(10) :15669-15675.
- [10] HUANG Y P, LUO L H, WANG J, *et al.* . The down-conversion and up-conversion photoluminescence properties of $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{:Yb}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ ceramics [J]. *J. Appl. Phys.* , 2015, 118(4) :044101-1-5.
- [11] 徐明珠,江向平,展红全,等. 二步水热法制备钛酸铋钠粉体的研究 [J]. 压电与声光, 2015, 37(1) :92-95.
XU M Z, JIANG X P, ZHAN H Q, *et al.* . Studies on the two-step hydrothermal synthesis of $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3$ powders [J]. *Piezoelectr. Acoustoopt.* , 2015, 37(1) :92-95. (in Chinese)
- [12] 白玉龙,高红,张俊英. 水热法制备微纳米荧光材料 [J]. 功能材料, 2014, 45(12) :12019-12026.
BAI Y L, GAO H, ZHANG J Y. Hydrothermal synthesis of micro-nanofluorescent materials [J]. *J. Funct. Mater.* , 2014, 45(12) :12019-12026. (in Chinese)
- [13] 蒋晨飞,黄文娟,丁明辉,等. 双掺 Eu^{3+} 和 Tb^{3+} 的下转换 $\beta\text{-NaYF}_4$ 的合成与发光性能 [J]. 发光学报, 2012, 33(7) :683-687.
JIANG C F, HUANG W J, DING M Y, *et al.* . Synthesis and luminescence properties of $\beta\text{-NaYF}_4$ doped with Eu^{3+} and Tb^{3+} [J]. *Chin. J. Lumin.* , 2012, 33(7) :683-687. (in Chinese)
- [14] JING X P, LIN M, TU N, *et al.* . Simple hydrothermal synthesis and sintering of $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ nanowires [J]. *J. Alloys Compd.* , 2011, 509(38) :9346-9350.
- [15] JING X Z, LI Y X, YIN Q R. Hydrothermal synthesis of $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ fine powders [J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 2003, 99(1-3) :506-510.
- [16] 李涛,彭同江,杨世源. 水热反应温度对锆钛酸铅微晶性质的影响 [J]. 压电与声光, 2015, 37(1) :73-75.
LI T, PENG T J, YANG S Y. Effect of hydrothermal temperature on characters of lead zirconate titanate crystallite [J]. *Piezoelectr. Acoustoopt.* , 2015, 37(1) :73-75. (in Chinese)
- [17] 许菲菲,胡琴,杨百良. XPS 测量稀土氧化物薄膜禁带宽度的可行性研究 [J]. 微纳电子技术, 2013, 50(3) :190-193.
XU F F, HU Q, YANG B L. Study on the feasibility of measuring the band gap of rare earth oxide films by XPS [J]. *Micronanoelectron. Technol.* , 2013, 50(3) :190-193. (in Chinese)
- [18] 孙晓绮,孟庆华,孟庆云,等. 钨掺杂氧化锌纳米棒阵列材料的制备及光学性能研究 [J]. 发光学报, 2013, 34(5) :573-578.
SUN X Q, MENG Q H, MENG Q Y, *et al.* . Fabrication and optical properties of Eu-doped ZnO nanorod arrays [J]. *Chin. J. Lumin.* , 2013, 34(5) :573-578. (in Chinese)
- [19] BAZZI R, FLORES M, LOUIS A C, *et al.* . Synthesis and properties of europium-based phosphors on the nanometer scale: Eu_2O_3 , $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{:Eu}$, and $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}$ [J]. *J. Colloid. Interface Sci.* , 2004, 273(1) :191-197.
- [20] 徐冰玉,王国凤,李莹,等. $\text{SrWO}_4\text{:Eu}^{3+}$ 纳米晶的合成、表征和光致发光性能 [J]. 发光学报, 2013, 34(9) :1179-1182.

XU B Y, WANG G F, LI Y, *et al.*. Synthesis, characterization, and photoluminescence of SrWO₄: Eu³⁺ nanocrystals [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(9):1179-1182. (in Chinese)



孙建建(1992 -),男,江苏南京人,硕士研究生,2014年于盐城工学院获得学士学位,主要从事压电陶瓷稀土掺杂的研究。

E-mail: 1625308048@qq.com



方必军(1971 -),男,安徽巢湖人,博士,教授,2002年于中国科学院上海硅酸盐研究所获得博士学位,主要从事压电铁电陶瓷晶体材料与器件、纳米功能材料的研究。

E-mail: fangbj@cczu.edu.cn



丁建宁(1966 -),男,江苏镇江人,博士,教授,2001年于清华大学获得博士学位,主要从事微纳器件及系统设计与制造基础、新能源材料与器件及装备、摩擦学的研究。

E-mail: dinging@cczu.edu.cn