文章编号:1000-7032(2019)05-0623-07

Au/Bi 共掺二氧化硅薄膜的制备及近红外光谱调控

陈若望, 汪鹏君, 张晓伟*, 张跃军, 张会红, 束俊鹏 (宁波大学信息科学与工程学院, 浙江宁波 315211)

摘要:根据 X 射线光电子能谱分析和选择性光致发光谱测试结果,探讨了 Bi 离子掺杂非晶二氧化硅薄膜的 近红外发光来源。我们认为非晶二氧化硅薄膜中 Bi 离子的近红外发光来源于低价态 Bi⁺离子从轨道³P₁ 层 到³P₀ 层的辐射复合跃迁和 Bi⁰ 从轨道²D_{3/2}层到⁴S_{3/2}层的辐射复合跃迁。此外,本文利用限制性晶化原理,通 过在掺 Bi 二氧化硅薄膜中引入 Au 离子,实现了 Bi 离子相关的近红外发光峰位可调,荧光强度增大了 300%。 高分辨透射电子显微镜截面图片证实了非晶二氧化硅薄膜厚度约为 90 nm 以及不同尺寸、数密度 Au 量子点 的形成。变温光致发光谱测试结果表明,部分 Au 离子可有效降低 Bi 离子掺杂非晶二氧化硅薄膜中羟基集团 等非辐射复合中心密度。Bi 离子掺杂非晶二氧化硅薄膜近红外发光来源的探讨以及通过 Au 量子点调控 Bi 离子近红外发光性质的讨论将有助于未来掺 Bi 发光材料的相关研究。

关 键 词:非晶二氧化硅;溶胶凝胶;薄膜;光致发光 中图分类号:0482.31 **文献标识码:**A **DOI**:10.3788/fgxb20194005.0623

Fabrication and Near-infrared Spectral Modulation of Au/Bi Ions Co-doped Silica Thin Films

CHEN Ruo-wang, WANG Peng-jun, ZHANG Xiao-wei^{*}, ZHANG Yue-jun, ZHANG Hui-hong, SHU Jun-peng (Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China) * Corresponding Author, E-mail; zhangxiaowei@nbu.edu.cn

Abstract: Near-infrared luminescence origin of Bi-doped amorphous silica thin film is discussed by the XPS characterizations and selective PL measurements. The nature of the near-infrared emission in amorphous silica thin film is considered as both the transition of Bi⁺ ions from ${}^{3}P_{1}$ to ${}^{3}P_{0}$ and the transition of Bi⁰ from ${}^{2}D_{3/2}$ to ${}^{4}S_{3/2}$. Further, the confined crystallization growth strategy is designed for fabricating uniform-size Au quantum dots embedded in Bi-doped silica thin film. Through controls of the doping amounts of Au ions, the NIR emission of Bi ions in silica thin film can be wavelength-tunable and enhanced by nearly 300% on the optimum Au ions doping amount. The thickness of thin film is 90 nm and the formation of Au quantum dots with different average sizes and number densities have been confirmed by the high-resolution TEM images. Temperature-dependent PL emission spectra suggest parts of Au ions may play a role of eliminating hydroxyl groups, which gives rises to greatly enhanced PL intensity in the near-infrared region. We anticipate that both greatly enhanced and wavelength-tunable NIR luminescence and discussion of luminescence origin would shed light on future research of Bi ions-doped luminescent materials.

基金项目:国家自然科学基金(61704094,61474068,61404076);浙江省教育厅研究基金(Y201737316);宁波大学王宽诚幸福基金 资助项目

收稿日期: 2018-07-09;修订日期: 2018-08-29

Supported by National Natural Science Foundation of China (61704094,61474068,61404076); Research Foundation of Education Bureau of Zhejiang Province (Y201737316); K. C. Wong Magna Fund in Ningbo University

Key words: amorphous silica; sol-gel method; thin films; photoluminescence

1引言

上世纪末,日本科学家 Murata 首次报道了掺 铋(Bi)二氧化硅玻璃在室温 500 nm 光激发下中 心波长在1150 nm、半高宽在150 nm 的超宽带近 红外发光现象^[1]。随后,多种掺 Bi 材料的近红外 发光现象逐渐受到科学界和工业界的广泛关注. 在光纤放大器、光纤激光器、牛物成像、牛物传感 等领域展现出巨大的应用前景^[25]。作为过渡金 属离子,Bi离子具有随着价态变化而发光波长改 变的性质,并且其发光特性受基质影响很大,易出 现较大的 Stokes 频移,这给发光调控提供了便利 条件。由于 Bi 离子具有多种离子价态, 例如 0, +1, +2, +3 和 +5 价,因而到现在 Bi 离子的近 红外发光来源尚不清楚[68]。早期的大多数研究 报道将近红外发光归因于高价态的 Bi 离子^[9],而 后来的研究结果表明低价态的 Bi 离子更有可能 导致超宽带、长寿命的近红外光发射[10-11]。此 外,在某些特定条件下,Bi离子易于形成阳离子 团聚(如 Bi_2^{4+} 、 Bi_5^+ 、 Bi_5^{3+} 、 Bi_6^{2+} 、 Bi_8^{2+} 、 Bi_9^{5+} 等)以及 阴离子团聚(如 Bi²⁻、Bi³⁻等),由于 6s 和 6p 外 层电子未受到屏蔽作用,离子团聚中心也极有可 能产生较强的近红外光发射。除了近红外发光中 心来源这一科学问题外,如何增强 Bi 离子的近红 外发光效率也是研究人员广泛关注的技术难 题^[12-14]。Bi离子特殊的类原子能级结构使得其 在非晶二氧化硅基质中的光学吸收截面仅为 10^{-20} cm².这会导致 Bi 离子的光致激发过程效率 低下,严重阻碍了 Bi 离子相关光纤激光器和放大 器的发展^[15]。

本文采用基于旋涂技术的溶胶凝胶法制备了 不同浓度 Bi 离子掺杂非晶二氧化硅薄膜。在此 基础上,采用截面 TEM 与 XPS 技术对薄膜微结 构进行了表征。不同激发光波长下的近红外光致 发光(PL)测试表明,Bi 离子的近红外发光来源于 两种可能的低价态发光中心——Bi⁰和 Bi⁺。通 过在前驱液中引入不同浓度的金(Au)离子,利用 限制性晶化原理,我们获得了尺寸可控的 Au 量 子点掺杂非晶二氧化硅薄膜。高分辨截面 TEM 图片表明,随着 Au 离子掺杂浓度增加,非晶二氧 化硅薄膜中 Au 量子点的尺寸逐渐增大。同时, Bi 离子的近红外发光波长和强度可由 Au 离子掺 杂浓度有效控制。在最优 Au 离子掺杂浓度条件 下,Bi 离子相关的近红外发光强度增大了 300%。 变温 PL 发射光谱表明非晶二氧化硅薄膜中 Au 离子能够有效降低羟基基团等非辐射复合中心密 度,因此导致了 Bi 离子近红外发光强度显著 增大。

2 实 验

正硅酸四乙酯(TEOS, Sigma-Aldrich, 98%)、 无水乙醇和去离子水均匀混合后,室温下 TEOS 逐渐水解形成硅溶胶。称量不同质量的硝酸铋 (Bi (NO₃)₃, Sigma-Aldrich, 98%) 和高氯酸金 (HAuCl₄, Sigma-Aldrich, 99.9%)固体粉末, 分别 加入初始混合溶液中。随后,将前驱液放置在65 ℃水浴环境中加热搅拌4h,使固体粉末完全溶 解。经过一系列水解缩合反应,溶胶互相连接形 成凝胶,透明前驱液的粘度逐渐增加。采用旋涂 技术将混合凝胶旋涂至干净的硅片衬底上。旋涂 过程中采用中科院微电子中心研发的 KW-4A 型 台式匀胶机,最高旋涂转速控制在8000 r/min, 旋涂 30 s。旋涂工艺完成后,在 450 ℃氮气氛围 中进行脱水过程并且去掉薄膜中的残存溶剂和有 机物,形成稳定干燥的非晶二氧化硅薄膜^[16]。随 后,将薄膜样品放置在 H₂/Ar 混合气氛中进行不 同温度的退火。在退火过程中,溶胶凝胶二氧化 硅薄膜逐渐收缩,这种刚性的非晶二氧化硅基质 限制了 Au 离子团簇成核尺寸,并且可以有效防 止 Au 量子点团聚。Au 量子点的最终尺寸可由 前驱液中 Au 离子含量有效控制。由此,我们获 得了一种尺寸可控的 Au 量子点与 Bi 离子共掺非 晶二氧化硅薄膜的制备方法。在此基础上,本文 采用X射线光电子能谱分析(XPS)与透射电子 显微镜(TEM)对薄膜微结构进行了表征。同时, 采用 Horiba Jobin Yvon Fluorolog-3 荧光光谱系统 进行了 PL 谱测试。激发光源为 450 W 的氙灯, 波长范围在 250~800 nm 内可调。近红外探测器 为液氮冷却的铟镓砷探测器,测试过程中采用 SR830型锁相放大器减少环境噪声。低温 PL 测 试采用 30 mW He-Cd 激光器作为光源, 激发波长 为325 nm,激光经滤光、聚焦后,照射在装有4个 透明石英窗口的密封腔中。密封腔采用液 He 制 冷。PL 测试结果均扣除环境噪声,并根据薄膜厚 度进行了修正。

3 结果与讨论

本文采用高分辨 TEM 对薄膜样品进行了结构表征。截面 TEM 观测样品制备流程如下:首先,采用线锯将薄膜样品切割成约 3 mm 的条状;随后,采用 TEM 专用胶水对条状样品对粘,对粘后的样品置于 150 ℃干燥箱中 1 h,此时条状样品 对粘牢固;然后,采用金刚石砂纸研磨对粘样品, 直至样品的厚度小于 100 nm;最后,将研磨后的 样品小心地粘在铜环上,采用 Gatan 691 型离子减 薄仪对截面样品进行减薄。减薄后的截面样品即 可进行 TEM 观测。如图 1 所示,当旋涂最高转速 控制在 8 000 r/min 时,薄膜的平均厚度约为 90 nm。截面 TEM 图片表明旋涂后的掺 Bi 非晶二氧 化硅薄膜表面光滑,厚度均一,并且位于 Si 衬底 上。通过精确控制旋涂过程中最高转速、持续时 间等参数,可以较好地控制薄膜厚度。



图 1 掺 Bi 非晶二氧化硅薄膜横截面 TEM 表征

Fig. 1 Cross-sectional TEM characterization of Bi-doped amorphous silica thin film

图 2 是不同 Bi 离子掺杂量的非晶二氧化硅 样品的 XPS 谱。图中,位于 157.1 eV 和162.4 eV 的 XPS 特征峰分别对应 Bi 离子的⁴f_{5/2} 和⁴f_{7/2}能 级。与以往文献中介绍的 Bi³⁺的 XPS 特征峰的 峰位和线宽对比^[17],本文采用湿化学法制备的掺 Bi 非晶二氧化硅样品中 Bi 离子相关的 XPS 特征 峰轻微偏移到较低的键能。理论上,较低的 XPS 键能往往对应于更低价态的目标离子^[18]。据此, 非晶二氧化硅薄膜样品近红外发光可能来源于低 价态的 Bi 离子。与文献[17]报道结果相比,较 宽的 XPS 半高宽表明 Bi 离子掺杂非晶二氧化硅 的 XPS 特征峰可能由两种甚至更多种类低价态 Bi 离子发光中心组成。





Fig. 2 XPS spectra of amorphous silica with different Bi ions doping amounts

图 3(a)显示了1000 ℃退火之后,在不同的 激发波长下,5% Bi 离子掺杂非晶二氧化硅薄膜 在近红外区域的 PL 谱。Bi 离子掺杂非晶二氧化 硅薄膜的近红外 PL 谱与激光波长密切相关。随 着激发波长从 300 nm 增加到 400 nm,近红外光



图 3 (a)不同激发波长下的掺 Bi 二氧化硅薄膜在近红 外区域的 PL 谱;(b) Bi⁺与 Bi⁰ 试探性的能级图。

Fig. 3 (a) Excitation wavelength-dependent PL spectra from Bi-doped silica thin films in the near-infrared region. (b) Tentative energy level diagram of ${\rm Bi}^+$ ions and ${\rm Bi}^0$.

谱区域中 PL 峰位从 1 151 nm 红移到 1 251 nm。 当激发波长从 400 nm 进一步增加到 550 nm 时, PL 峰位从 1 251 nm 蓝移到 1 163 nm。随后,激发 波长从 550 nm 增加到 600 nm, PL 峰位显示从 1 163 nm 又红移至 1 282 nm。然后,当激发波长 从 600 nm 上升到 650 nm 时, PL 峰位又发生了蓝 移,从 1 282 nm 回到 1 157 nm。最后,激发波长 从 650 nm 上升到 800 nm, PL 峰位从 1 157 nm 红 移到 1 272 nm。随着激发波长的变化, Bi 离子相 关近红外 PL 峰位变化表明非晶二氧化硅薄膜中 可能存在两种 Bi 离子近红外发光中心。结合 XPS 测试结果与相关文献报道^[19-21],本文推测 Bi 离子掺杂非晶二氧化硅薄膜的近红外发光中心来 源于低价态 Bi^+ 离子从轨道³ P_1 层到³ P_0 层跃迁和 低价态 Bi^0 离子从轨道² $D_{3/2}$ 层到⁴ $S_{3/2}$ 层的跃迁。 图 3(b)是根据不同激发波长下的掺 Bi 二氧化硅 薄膜 PL 峰位,推测出的两种 Bi 离子试探性的能 级图。

为了提高 Bi 离子相关近红外发光中心的光 学吸收截面,同时确定 Bi 离子掺杂非晶二氧化硅 薄膜的近红外发光中心来源,将不同浓度的 Au 离子掺入非晶二氧化硅薄膜。如图 4(a)、(b)、 (c)所示,随着 Au 离子掺杂含量的升高,1 000 ℃ 退火之后,非晶二氧化硅薄膜中 Au 量子点尺寸 和浓度逐渐增加。采用 ImageJ 软件对 Au 量子点 尺寸和数密度进行了统计分析,发现随着 Au 离



图 4 不含 Au(a) 及掺有 5% Au(b)、10% Au(c) 的非晶二氧化硅薄膜截面 TEM 表征图。

Fig. 4 Cross-sectional TEM images of amorphous silica films doped without Au ions(a), with 5% (b) and 10% (c) Au ions, respectively.

子掺杂量从 5% 增加到 10%, Au 量子点的平均尺 寸从(6.0±0.6) nm 略微增加到(6.3±0.4) nm, 而 Au 量子点的数密度从 1.5×10¹² cm⁻²增加 到 3.1×10¹² cm⁻²。

图 5 是不同浓度 Au 离子与 5% Bi 离子共掺 非晶二氧化硅薄膜在近红外区域的室温 PL 谱。 随着 Au 离子掺杂浓度的增加,近红外区域的 PL 峰位发生了轻微蓝移。这是由于高温退火后, Au³⁺离子很容易被还原成 Au⁰,而 Bi⁰ 倾向于被 氧化成 Bi⁺离子。随着氧化还原反应进行,非晶 二氧化硅薄膜中 Bi⁺离子浓度增加,与 Bi⁺离子 相关的 1 150 nm 处 PL 发光强度增大。因此,随 着 Au³⁺离子含量增加,Bi 离子相关近红外发光峰 蓝移^[22]。同时,过量掺杂的 Au³⁺离子可有效消 除非晶二氧化硅薄膜中的羟基基团等非辐射复合 中心。羟基基团数量的减少极大地降低了非晶二 氧化硅薄膜中非辐射复合发生的概率^[23-24],因而 随着 Au³⁺离子含量增加,共渗薄膜样品近红外发 光强度显著增大。



图 5 不同 Au 离子掺杂量的掺 5% Bi 离子二氧化硅薄膜的 PL 谱

Fig. 5 PL spectra of silica films co-doped with 5% Bi ions and different Au ions doping amounts

为了进一步阐明 Au 离子掺杂非晶二氧化硅 薄膜对 Bi 离子近红外发光的影响,本文测试了薄 膜样品在近红外区域的变温 PL 谱。如图 6(a)、 (b)所示,所有样品在近红外区域的 PL 强度随着 测试温度升高(从 9.6 K 到 273 K)而降低。测试 温度升高,非晶二氧化硅基质中电子-声子相互作 用增强,晶格振动增强,非辐射复合发生几率增 加,因此 PL 强度降低。本文拟合了热猝灭激活能的函数以更好地阐明近红外区域中的热猝灭现象和 PL 增强机制。PL 强度随测试温度的变化规律可根据 Arrhenius 方程描述^[25]:

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + a \exp\left(-\frac{E_a}{KT}\right)},$$
 (1)



图 6 5% Bi 离子单掺(a)、10% Au 离子与 5% Bi 离子共掺(b)的非晶二氧化硅薄膜在近红外区域变温 PL 谱。插图为 根据 Arrhenius 公式的拟合曲线。

Fig. 6 Temperature-dependent PL integrated intensity in the near-infrared region of 5% Bi ions-doped silica thin films *versus* the reciprocal temperature. (a) Samples without Au ions. (b) Samples co-doped with 10% Au ions. Each insert illustrates the $\ln(I_0/I(T) - 1)$ as a function of 1000/T for guiding the Arrhenius fitting.

其中, $a = k_{ar}/k_r$, k_{ar} 和 k_r 分别是非晶薄膜中非辐射复合和辐射复合的发生概率, E_a 是热激活能,K是玻尔兹曼常数, I_0 是低温下样品近红外 PL 发光强度。如图 6(a)、(b)中插图所示, Arrhenius 模型很好地描述了两种薄膜样品的 PL 强度猝灭现象。根据拟合 Arrhenius 曲线,单掺 Bi 薄膜样品的热激活能为 6.75 meV,而 Bi 离子与 Au 离子 共掺薄膜样品的热激活能为 3.96 meV。共掺薄 膜样品中,Au 离子有效降低了非辐射复合中心密 度,平均声子能量降低,因此热激活能略有下降。

4 结 论

本文采用基于旋涂技术的溶胶凝胶法制备 了 Bi 离子掺杂非晶二氧化硅薄膜。XPS 表征结 果与激发波长相关的 PL 谱表明,非晶二氧化硅 薄膜中的近红外发光可能来源于低价态 Bi⁺离 子从轨道³P₁ 层到³P₀ 层跃迁和低价态 Bi⁰离子 从轨道²D_{3/2}层到⁴S_{3/2}层的跃迁。在此基础上,利 用限制性晶化原理,在非晶二氧化硅薄膜中引 入不同尺寸的 Au 量子点,Bi 离子相关近红外发 光波长可调。在最佳 Au 离子掺杂浓度条件下, Bi 离子近红外发射强度显著提高了 300%。变 温 PL 谱测试结果表明 Au 离子可有效降低 Bi 离子掺杂非晶二氧化硅薄膜中非辐射复合中心 密度。现有研究结果表明,利用限制性晶化原 理,通过在非晶二氧化硅薄膜中引入 Au 量子 点,是提高 Bi 离子的近红外荧光发射强度的一 条有效技术途径。

参考文献:

- [1] MURATA K, FUJIMOTO Y, KANABE T, et al.. Bi-doped SiO₂ as a new laser material for an intense laser [J]. Fusion Eng. Des., 1999,44(1-4):437-439.
- [2] ZHOU Y, YONG Z J, ZHANG W, et al. Ultra-broadband optical amplification at telecommunication wavelengths achieved

by bismuth-activated lead iodide perovskites [J]. J. Mater. Chem. C, 2017,5(10):2591-2596.

- [3] FIRSTOV S, KHARAKHORDIN A, ALYSHEV S, et al. Formation of laser-active centers in bismuth-doped high-germania silica fibers by thermal treatment [J]. Opt. Express, 2018,26(10):12363-12371.
- [4] ESCUDERO A, CARRILLO-CARRIÓN C, ZYUZIN M V, et al. Synthesis and functionalization of monodisperse near-ultraviolet and visible excitable multifunctional Eu³⁺, Bi³⁺: REVO₄ nanophosphors for bioimaging and biosensing applications
 [J]. Nanoscale, 2016,8(24):12221-12236.
- [5] 刘义章,孙军勇,王磊,等. 半导体聚合物量子点-亚甲基蓝荧光能量转移体系测定水中 Bi³⁺[J]. 发光学报, 2017, 38(10):1353-1358.
 LIU Y Z, SUN J Y, WANG L, et al. . Semiconducting polymer dots-methylene blue fluorescence energy transfer system for

determination of Bi (Ⅲ) ions in water [J]. Chin. J. Lumin., 2017,38(10):1353-1358. (in Chinese)

- [6] SOKOLOV V O, PLOTNICHENKO V G, DIANOV E M. The origin of near-IR luminescence in bismuth-doped silica and germania glasses free of other dopants: first-principle study [J]. Opt. Mater. Express, 2013,3(8):1059-1074.
- [7] DIANOV E M. Bismuth-doped optical fibers: a challenging active medium for near-IR lasers and optical amplifiers [J]. Light: Sci. Appl., 2012,1:e12-1-7.
- [8] LI X M, CAO J K, PENG M Y. The origin of the heterogeneous distribution of bismuth in aluminosilicate laser glasses [J].
 J. Am. Ceram. Soc., 2018,101(7):2921-2929.
- $\begin{bmatrix} 9 \end{bmatrix}$ XIA H P, WANG X J. Near infrared broadband emission from Bi⁵⁺-doped Al₂O₃-GeO₂-X(X = Na₂O, BaO, Y₂O₃) glasses $\begin{bmatrix} J \end{bmatrix}$. Appl. Phys. Lett., 2006,89(5):051917-1-3.
- [10] HE X J, XU X H, ZHOU D C, et al. Effects of copper ions on the near-infrared luminescence in Bi doped silicate glass via copper for sodium ion exchange [J]. J. Non-Cryst. Solids, 2015, 421:30-34.
- [11] PENG M Y, SPRENGER B, SCHMIDT M A, et al. Broadband NIR photoluminescence from Bi-doped Ba₂P₂O₇ crystals: insights into the nature of NIR-emitting bismuth centers [J]. Opt. Express, 2010,18(12):12852-12863.
- [12] LI X M, CAO J K, WANG L P, et al. Predictable tendency of Bi NIR emission in Bi-doped magnesium aluminosilicate laser glasses [J]. J. Am. Ceram. Soc., 2018,101(3):1159-1168.
- [13] ZHAO Q C, ZHANG J Z, LUO Y H, et al. Energy transfer enhanced near-infrared spectral performance in bismuth/erbium codoped aluminosilicate fibers for broadband application [J]. Opt. Express, 2018,26(14):17889-17898.
- [14] CAO J K, LI X M, WANG L P, et al. New strategy to enhance the broadband near-infrared emission of bismuth-doped laser glasses [J]. J. Am. Ceram. Soc., 2018,101(6):2297-2304.
- [15] LIN S B, ZHANG X W, ZHANG P, et al. . High-efficiency near-infrared emission from bismuth-doped SiO_{0.73} thin films fabricated by ion implantation technology [J]. Opt. Lett., 2016,41(3):630-633.
- [16] 董恒平,陈坤基,宗波,等. 非晶掺氧氮化硅薄膜中 N-Si-O 发光缺陷态的研究 [J]. 南京大学学报(自然科学), 2017,53(3):392-398.

DONG H P, CHEN K J, ZONG B, *et al.*. Investigation on luminescent defect state related to N-Si-O bonding in amorphous oxygenated silicon nitride film [J]. *J. Nanjing Univ.* (*Nat. Sci.*), 2017,53(3):392-398. (in Chinese)

- [17] FUJIMOTO Y. Local structure of the infrared bismuth luminescent center in bismuth-doped silica glass [J]. J. Am. Ceram. Soc., 2010,93(2):581-589.
- [18] ZHANG X W, LIN T, ZHANG P, et al. Tunable quantum dot arrays as efficient sensitizers for enhanced near-infrared electroluminescence of erbium ions [J]. Nanoscale, 2018,10(8):4138-4146.
- [19] ZHANG P X, CHEN N, WANG R, et al. Charge compensation effects of Yb³⁺ on the Bi⁺: near-infrared emission in PbF₂ crystal [J]. Opt. Lett., 2018, 43(10):2372-2375.
- [20] ZHANG N, QIU J R, DONG G P, et al. Broadband tunable near-infrared emission of Bi-doped composite germanosilicate glasses [J]. J. Mater. Chem., 2012,22(7):3154-3159.
- [21] WANG R F, LIU J, ZHANG Z. Luminescence and energy transfer progress in Bi-Yb co-doped germanate glass [J]. J. Alloys Compd., 2016,688:332-336.
- [22] JIA X M, XIA M L, XU Y S, et al. Silver nanoparticle enhanced 2.7 μm luminescence in Er³⁺-doped bismuth germanate glasses [J]. Opt. Mater. Express, 2018,8(6):1625-1632.
- [23] ZHANG X W, CHEN R W, WANG P J, et al. A soft chemistry-based route to enhanced photoluminescence of terbium ions

and tin oxide nanocrystals codoped silica thin films [J]. Appl. Surf. Sci., 2018,452:96-101.

- [24] 林涛,万能,韩敏,等. SnO₂ 纳米晶体的制备、结构与发光性质 [J]. 物理学报, 2009,58(8):5821-5825.
 LIN T, WAN N, HAN M, et al. . Synthesis, structures and luminescence properties of SnO₂ nanoparticles [J]. Acta Phys. Sinica, 2009,58(8):5821-5825. (in Chinese).
- [25] ZHANG X W, LIN T, ZHANG P, et al. . Highly efficient near-infrared emission in Er³⁺ doped silica films containing sizetunable SnO₂ nanocrystals [J]. Opt. Express, 2014,22(1):369-376.



陈若望(1994 -),男,浙江宁波人, 硕士研究生,2016年于贵州大学获 得学士学位,主要从事稀土及过渡 金属掺杂硅基薄膜近红外发光材料 方面的研究。

E-mail: chenruowang9090@ qq. com



张晓伟(1987 -),男,河北石家庄人, 博士,讲师,2016 年于南京大学获得 博士学位,主要从事稀土掺杂硅基薄 膜发光材料与光电子器件方面的 研究。

E-mail: zhangxiaowei@nbu.edu.cn