

专题: 华南师范大学建校暨物理学科建立 90 周年

掺铥镧铝硅酸盐玻璃光子晶体 光纤制备及光学特性*

夏长明 卢家澳 黄卓元 刘建涛 侯峙云 周桂耀†

(华南师范大学信息光电子科技学院, 广州 510006)

(2023 年 5 月 11 日收到; 2023 年 6 月 20 日收到修改稿)

镧铝硅酸盐玻璃具有稀土离子溶解度高、热稳定性好等优异的光学性能和优良的物理化学性质, 其部分物理化学性质与石英相近, 易与石英玻璃结合进行特种光纤制备, 被认为是一种理想的激光玻璃基质材料. 本文采用传统高温熔融法成功研制出一系列不同浓度 Tm^{3+} 掺杂镧铝硅酸盐玻璃, 以掺铥镧铝硅酸盐玻璃为纤芯, 采用管棒堆叠法制备出掺铥双包层光子晶体光纤. 实验研究了掺铥镧铝硅酸盐玻璃及其光纤的吸收、荧光、激光等光学特性, 研究结果表明, 掺铥镧铝硅酸盐玻璃及其光子晶体光纤适于 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光输出, 为 $2\ \mu\text{m}$ 波段高功率光纤激光器的研究提供了一种新的途径.

关键词: 掺铥玻璃光纤, 镧铝硅酸盐玻璃, 光子晶体光纤, $2\ \mu\text{m}$ 激光**PACS:** 42.81.Bm, 42.55.Wd, 42.55.Xi, 42.81.Cn**DOI:** 10.7498/aps.72.20230766

1 引言

$2\ \mu\text{m}$ 波段激光处于大气窗口附近及人眼安全波段, 在生物医疗^[1-4]、激光雷达^[5]、光通信^[6,7]、材料加工^[8-10] 等多个领域具有十分广泛的应用^[11]. 掺铥 (Tm^{3+}) 光纤作为 $2\ \mu\text{m}$ 光纤激光器核心增益介质^[12], 近年来一直是研究热点领域. 由于传统掺铥石英光纤在高掺杂浓度上存在局限性^[13], 高浓度掺杂锗酸盐玻璃、碲酸盐玻璃和硅酸盐玻璃^[14] 成为新的研究热点.

2010 年, 上海光学精密机械研究所李科峰等^[15] 制备了 Tm^{3+} 掺杂摩尔分数为 1% 的掺铥碲酸盐玻璃光纤, 获得中心波长为 1937 nm 的 1.46 W 激光, 斜率效率为 20%. 2021 年, 华南理工大学涂乐等^[16] 通过高温熔融法成功制备了高浓度掺铥锗酸盐玻璃及光纤, Tm^{3+} 浓度高达 $9.8 \times 10^{20}\ \text{ions/cm}^3$. 2022 年, 南京邮电大学沈晓等^[17] 利用溶胶凝胶法

和高温烧结工艺制备了掺杂摩尔分数为 2.3% 的高硅氧玻璃及光纤, 获得波长为 1947 nm 的激光, 斜率效率为 14.1%. 从以上文献可以看出, 采用高浓度掺铥玻璃代替掺铥石英作为纤芯可以有效解决石英光纤掺杂浓度较低的问题, 但是其玻璃基质熔点低, 与传统石英光纤熔接耦合面临困难. 因此, 本文提出以镧铝硅酸盐玻璃作为掺铥玻璃基质, 其部分物理化学性质与石英物理化学性质相近, 易于与石英玻璃结合进行特种光纤制备^[18], 被认为是一种理想的激光玻璃基质材料^[19-22]. 此外, 利用光子晶体光纤结构灵活可调优势, 进行双包层掺铥镧铝硅酸盐玻璃光子晶体光纤制备, 既可以提高光纤中 Tm^{3+} 掺杂浓度, 也可以充分发挥双包层光子晶体光纤的数值孔径大的优势, 可有效提高泵浦光的利用效率^[23]. 实验结果表明, 以掺铥镧铝硅酸盐玻璃光子晶体光纤搭建的光纤激光器在 $2\ \mu\text{m}$ 波段的实现了激光输出, 适于 $2\ \mu\text{m}$ 波段掺铥光纤激光器研制.

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61935010, 61735005) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zguyao@163.com

2 掺铥镧铝硅酸盐玻璃光纤制备及光纤光学特性测试方法

为研究 Tm^{3+} 掺杂浓度对掺铥玻璃光学特性的影响, 本文采用高温熔融法制备了一系列不同浓度的掺铥镧铝硅酸盐玻璃, 配方为 $x\text{Tm}_2\text{O}_3-(70-x)\text{SiO}_2-21\text{Al}_2\text{O}_3-9\text{La}_2\text{O}_3$ ($x=0.2\%, 0.4\%, 0.6\%, 0.8\%, 1.0\%$, 摩尔分数). 根据玻璃配方, 首先将原料充分混合, 然后在 1720°C 高温下, 经过 3 h 的熔融烧制, 制备出掺铥镧铝硅酸盐玻璃. 为研究掺铥镧铝硅酸盐玻璃的吸收、荧光等特性, 将制备的掺铥镧铝硅酸盐玻璃切割、打磨抛光成 5 mm 厚的玻璃样品, 玻璃样品如图 1(a) 所示. 以掺杂摩尔分数为 0.6% 的掺铥镧铝硅酸盐玻璃为纤芯, 结合管棒套管工艺, 利用堆叠法制备掺铥双包层光子晶体光纤预制棒, 然后将其置于特种光纤拉丝塔, 通过控制光纤拉制工艺各项参数, 成功制备出掺铥镧铝硅酸盐玻璃双包层光子晶体光纤, 如图 1(b) 所示, 掺铥镧铝硅酸盐玻璃双包层光子晶体光纤的纤芯直径约为 $21.7\text{ }\mu\text{m}$, 内包层直径约为 $119.3\text{ }\mu\text{m}$, 外径约为 $236.8\text{ }\mu\text{m}$.

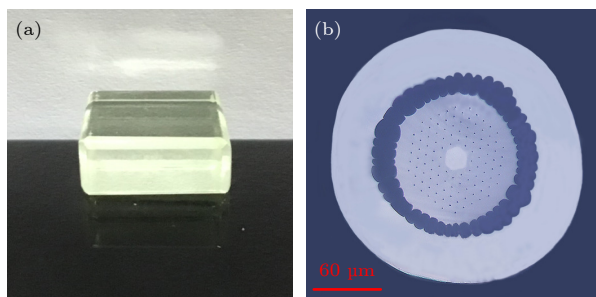


图 1 (a) 掺铥镧铝硅酸盐玻璃样品; (b) 掺铥光子晶体光纤端面图

Fig. 1. (a) Glass samples of Tm^{3+} doped glass; (b) optical micrograph of Tm^{3+} -doped fiber cross section.

为了分析掺铥玻璃及光纤的吸收、荧光、损耗等特性, 采用波长范围 200—2500 nm 宽带光源 (LS-3000, 广州标旗) 作为参考光源, 泵浦源用 793 nm 半导体激光器 (M793±3-50-F105//22-DK-P, 大族天成), 用可见近红外光谱仪 (Maya 2000 Pro, Ocean Optics, 波长范围 400—1100 nm) 记录可见及近红外光谱, 用近红外光谱仪 (NIRQUEST 256, Ocean Optics, 波长范围 1100—2500 nm) 记录近红外光谱. 所有的性能测试都在室温下进行.

3 结果讨论

图 2 为不同摩尔分数掺杂的掺铥玻璃的吸收光谱, 从图 2 可以看到, 不同摩尔分数 Tm^{3+} 掺杂的玻璃吸收峰位置基本相同. Tm^{3+} 离子在可见及近红外波段共存在 4 个吸收峰, 中心波长分别位于 684, 791, 1204 和 1674 nm, 分别对应能级 $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_2/^3\text{F}_3$, $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_4$, $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_5$ 和 $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 的跃迁. 在波长 1386 nm 的吸收峰为 OH^- 吸收峰, 说明在现有玻璃制备工艺条件下, 并没有完全消除 OH^- . 此外, 随着铥离子掺杂浓度的增大, 各吸收峰强度增大. Tm^{3+} 掺杂摩尔分数为 0.2% 玻璃吸收强度最低, Tm^{3+} 掺杂摩尔分数为 1% 玻璃吸收强度最大, 其中 791 nm 吸收峰吸收强度最强, 这也为采用低成本商业化的 793 nm 激光器作为泵浦源提供了便利.

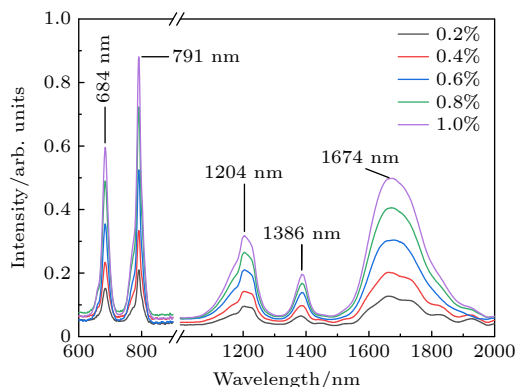


图 2 掺铥镧铝硅酸盐玻璃的吸收光谱
Fig. 2. Absorption spectrum of Tm^{3+} -doped glasses.

图 3 为在 793 nm 激光的激发下, 掺铥玻璃样品的荧光光谱. 从图 3 可以看出, 掺铥玻璃在 1500—2050 nm 波长范围内出现了一宽带荧光光谱, Tm^{3+} 掺杂摩尔分数为 0.6% 的掺铥玻璃发出中心波长为 1782 nm 的荧光, 与能级 $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ 跃迁相对应, 其荧光强度最强, 荧光半高范围位于 1679—1902 nm, 光谱半高全宽达到 223 nm. 说明 Tm^{3+} 掺杂摩尔分数为 0.6% 的玻璃较为适合用作掺铥光纤的纤芯. 荧光强度随着 Tm^{3+} 掺杂浓度的增大而变强, 掺杂摩尔分数为 0.2% 的玻璃荧光强度最弱, Tm^{3+} 掺杂摩尔分数为 0.6% 时, 荧光强度最强. 并且当掺杂浓度继续提高时, 荧光强度反而下降, 其原因为 Tm^{3+} 掺杂浓度过高时, 发生浓度淬灭现象, 影响发光强度. 基于以上分析, Tm^{3+} 掺杂摩尔分数为 0.6% 的玻璃作为光纤纤芯为最佳.

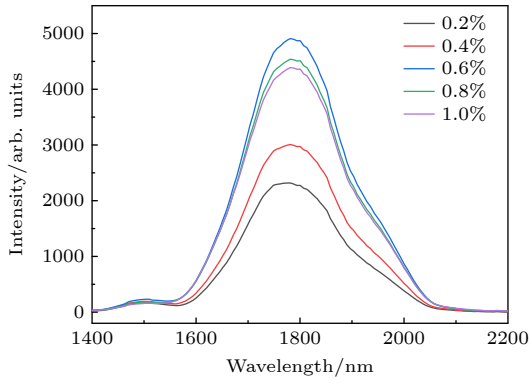


图3 掺铥镧铝硅酸盐玻璃荧光光谱图

Fig. 3. Fluorescence spectra of Tm^{3+} -doped glass under 793 nm laser excitation.

图4为掺杂摩尔分数为0.6%掺铥光纤吸收损耗谱.从图4可以看出,光纤在可见及近红外波段有5个强吸收峰,中心波长分别为681, 790, 1196, 1407和1643 nm,其中波长1407 nm为 OH^- 的吸收损耗峰,其余为 Tm^{3+} 的吸收峰,在790 nm处吸收最强,吸收系数高达10.94 dB/m,这为光纤激光器高效泵浦奠定基础.

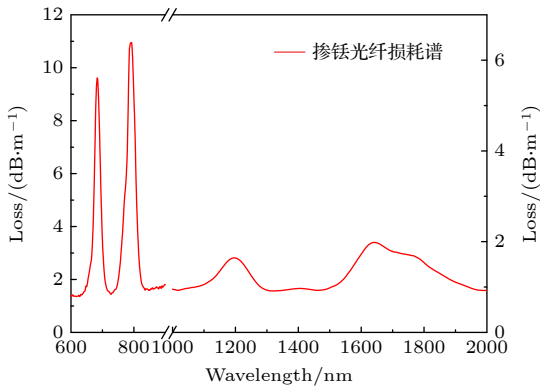


图4 掺铥光纤的损耗谱图

Fig. 4. Loss spectrum of Tm^{3+} -doped optical fiber.

为了研究掺铥光纤激光特性,自主搭建了一套光纤激光器如图5所示.793 nm的泵浦光经过4f耦合系统耦合进入掺铥光纤.二色镜M1和M2构成激光器的谐振腔,M1参数为:HT@793 nm,HR@2000 nm,793 nm透过率为99.8%,2000 nm反射率为99.9%;M2参数为:HR@793 nm,HT@2000 nm,793 nm反射率为99.8%,2000 nm透过率为15%.

图6为长度为62.2 cm掺铥光纤在793 nm激光的激发下的发射光谱.从图6可以看出,入纤功率低于2.107 W时,光纤的输出带宽较宽的荧光,

中心波长约为1923 nm,带宽高达130 nm.入纤功率功率到2.107 W时,光谱中出现窄线宽尖峰震荡,中心波长为1935 nm,说明此时泵浦功率接近激光阈值.继续增大泵浦功率到2.450 W时,此时泵浦功率超过阈值.尖峰强度急速上升,谱宽急剧窄化,带宽从129 nm减小到53 nm,中心波长从1923 nm变为1955 nm,光谱的明显变化说明激光产生,这证明了制备的掺铥镧铝硅酸盐光子晶体光纤可用于2 μm 波段激光研制.

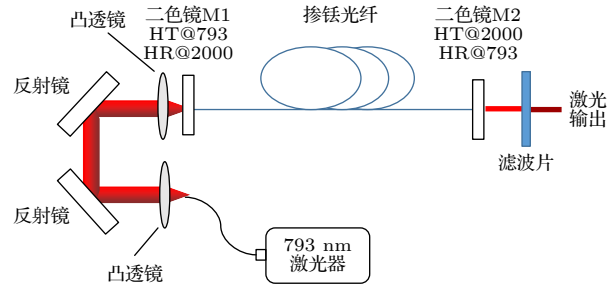


图5 光纤激光器空间光路示意图

Fig. 5. Schematic diagram of Tm^{3+} -doped optical fiber laser.

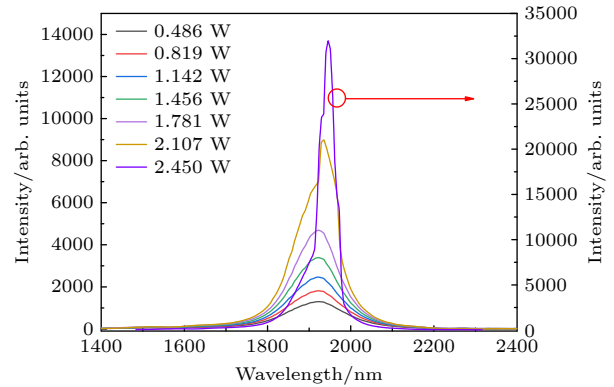


图6 掺铥光纤的荧光及激光光谱

Fig. 6. Fluorescence and laser spectrum of Tm^{3+} -doped optical fiber.

为了研究不同长度对激光特性的影响,在不同泵浦功率条件,分别对长度为24.8, 34.9, 52.4和62.2 cm的光纤进行激光性能的测试,如图7所示.

从图7可以看出,随着光纤长度增大,激光中心波长向长波方向移动分别为1923, 1936, 1948和1955 nm.此外,光纤越长,激光阈值越高,产生激光所需要的泵浦功率越大.图8为不同长度光纤的斜率效率,在现有实验条件下,获得激光功率最高为253 mW,34.1 cm长的光纤获得斜率效率最高为9.67%,与目前文献报道的掺铥玻璃光纤激光器斜率效率接近.

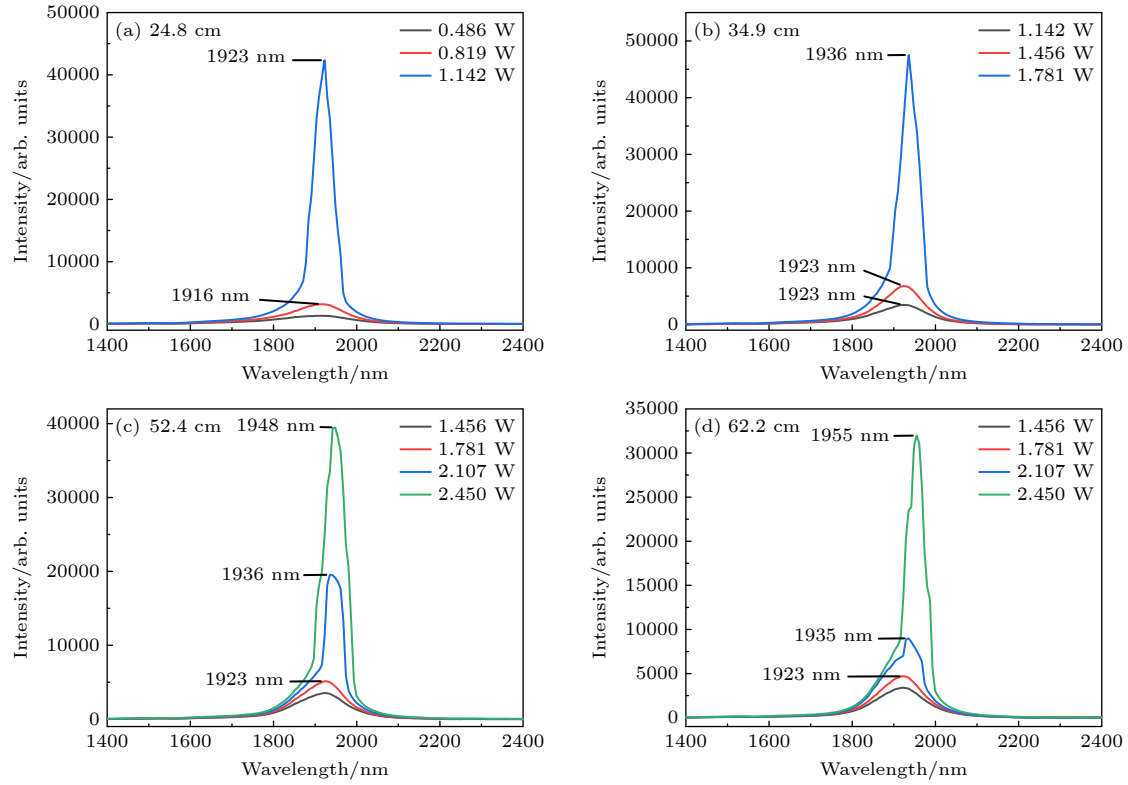


图 7 不同长度掺铥光纤的激光输出光谱

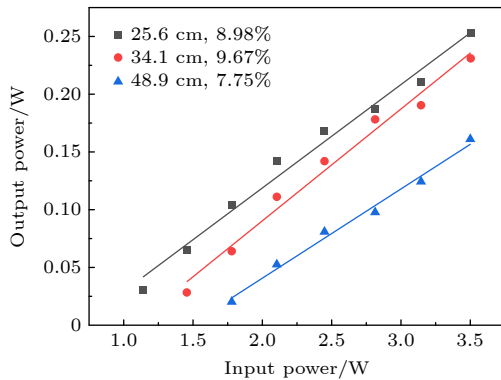
Fig. 7. Laser spectrum with different length of Tm^{3+} -doped optical fiber.

图 8 不同长度为掺铥光纤的斜率效率

Fig. 8. Slope efficiency of Tm^{3+} -doped fiber with different length.

4 总 结

本文采用高温熔融法制备出一系列不同浓度的掺 Tm^{3+} 镧铝硅酸盐玻璃, 并以掺铥镧铝硅酸盐玻璃为纤芯, 利用套管法和堆积法制备了大芯径掺铥镧铝硅酸盐光子晶体光纤, 纤芯直径达 $21.7 \mu\text{m}$. 在 793 nm 激光的激发下, 掺铥镧铝硅酸盐玻璃在 $1550\text{--}2050 \text{ nm}$ 波长范围内获得荧光带宽高达 223 nm 超宽带荧光. 以掺铥镧铝硅酸盐玻璃光纤

搭建的光纤激光器在 $2 \mu\text{m}$ 波段实现了激光输出, 在现有实验条件下, 激光功率最高为 253 mW , 斜率效率最高为 9.67% , 与目前文献报道的掺铥玻璃光纤激光器斜率效率接近, 并实验分析了不同长度激光性能, 研究发现随着光纤长度增大, 激光中心波长向长波长方向移动. 实验证明, 我们制备的掺铥镧铝硅酸盐玻璃及光纤适于 $2 \mu\text{m}$ 光纤激光器研制.

参考文献

- [1] Zhang A J, Duan J L, Xing Y B, Li J Y 2022 *Laser Opto. Pro.* **59** 50 (in Chinese) [张安军, 段嘉霖, 邢颖滨, 李进延 2022 激光与光电子学进展 **59** 50]
- [2] Yang K, Ren Q S, Wei S G, Li W R 2005 *Laser Opto. Pro.* **42** 52 (in Chinese) [杨昆, 任秋实, 魏石刚, 李万荣 2005 激光与光电子学进展 **42** 52]
- [3] Cauni V, Mihai B, Tanase F, Persu C, Irina C 2022 *Rev. Roum. Sci. Tech. El.* **67** 85
- [4] Cao Z G, Tian C, Jiang M L, Zhong S Q, Zhou L X, Chen G L 2022 *J. Cont. Uro. and Repro. Onco.* **14** 156 (in Chinese) [曹正国, 田超, 蒋茂林, 钟苏权, 周琳雄, 陈桂柳 2022 现代泌尿生殖肿瘤杂志 **14** 156]
- [5] McComb T S, Sims R A, Willis C C C, Kadvani P, Shah L, Richardson M 2010 *Conference on Lasers and Electro-Optics* San Jose, CA, USA, May 16–21, 2010 p2
- [6] Hemming A, Simakov N, Davidson A, Bennetts S, Hughes M,

- Carmody N, Davies P, Corena L, Stepanov D, Haub J, Swain R, Carter A 2013 *Conference on Lasers and Electro-Optics* San Jose, CA, USA, June 9–14, 2013 p2
- [7] Fu Q, Xu L, Liang S J, Shardlow P C, Shepherd D P, Shaiful Alam, Richardson D J 2020 *Opt. Express* **28** 5741
- [8] Li S, Zhang Z H, Han S G, Ren X H, Liu D, Xin Y G, Gao S Y 2020 *J. Nets. Form. Eng.* **12** 76 (in Chinese) [李苏, 张占辉, 韩善果, 任香会, 刘丹, 辛杨桂, 高世一 2020 *精密成形工程* **12** 76]
- [9] Dong Y J, Bai X T, Zheng Y 2023 *Laser Opto. Pro.* **60** 1 (in Chinese) [董亚举, 白雪涛, 郑义 2023 *激光与光电子学进展* **60** 1]
- [10] Zhang J X, Fu S J, Sheng Q, Zhang L, Shi W, Yao J Q 2022 *Opt. Laser Technol.* **158** 108882
- [11] Li X, Yang C, Li Y L 2022 *Laser J.* **43** 1 (in Chinese) [李鑫, 杨超, 李永亮 2022 *激光杂志* **43** 1]
- [12] Qian G Q, Tang G W, Wu M B, Qian Q, Chen D D, Yang Z M 2021 *Bull. Chi. Ceramic. Soc.* **40** 2471 (in Chinese) [钱国权, 唐国武, 吴敏波, 钱奇, 陈东丹, 杨中民 2021 *硅酸盐通报* **40** 2471]
- [13] Liu Y Z, Xing Y B, Liao L, Wang Y B, Peng J G, Li H Q, Dai N L, Li J Y 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 259 (in Chinese) [刘茵紫, 邢颖滨, 廖雷, 王一礴, 彭景刚, 李海清, 戴能利, 李进延 2020 *物理学报* **69** 259]
- [14] Gao S, Wang X, Fan X K, Li K F, Liao M S, Hu L L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 323 (in Chinese) [高松, 王欣, 范小康, 李科峰, 廖梅松, 胡丽丽 2014 *物理学报* **63** 323]
- [15] Li K F, Zhang G, Hu L L 2010 *Opt. Lett.* **35** 4136
- [16] Tu L, Tang G W, Qian Q, Yang Z M 2020 *Opt. Lett.* **46** 310
- [17] Shen X, Yang G L, Wang Y F, Chen Y G, Yu C L, Wei W, Hu L L 2023 *Acta Opti. Sin.* **43** 112 (in Chinese) [沈骁, 杨广利, 王亚飞, 陈应刚, 于春雷, 韦玮, 胡丽丽 2023 *光学学报* **43** 112]
- [18] Schuster K, Unger S, Aichele C, Lindner F, Grimm S, Litzkendorf D, Kobelke J, Bierlich J, Wondraczek K, Bartelt H 2014 *Advan. Opt. Tech.* **3** 447
- [19] Liang L B, Mo Z F, Ju B, Xia C M, Hou Z Y, Zhou G Y 2021 *J. Non-Cryst. Solids* **557** 120578
- [20] Huang Z Y, Yang J H, Mo Z F, Lu J A, Xia C M, Hou Z Y, Zhou G Y 2022 *J. Non-Cryst. Solids* **591** 121718
- [21] Huang Z Y, Ma W C, Wu T, Lu J A, Liu J T, Xia C M, Hou Z Y, Zhou G Y 2022 *IEEE 7th Optoelectronics Global Conference* Shenzhen, China, December 6–11, 2022 pp22–24
- [22] Kang J J, Mo Z F, Huang Z Y, Yang J H, Ma W C, Liu J T, Xia C M, Hou Z Y, Zhou G Y 2022 *J. Non-Cryst. Solids* **596** 121869
- [23] Zhou P, Huang L J, Leng J Y, Xiao H, Xu J M, Yao T F 2020 *Scie. Sini. Tech.* **50** 123 (in Chinese) [周朴, 黄良金, 冷进勇, 肖虎, 许将明, 姚天甫 2020 *中国科学: 技术科学* **50** 123]

SPECIAL TOPIC — The 90th Anniversary of South China Normal University and Physics Discipline

Preparation and optical properties of thulium doped lanthanum aluminum silicate glass photonic crystal fiber^{*}

Xia Chang-Ming Lu Jia-Ao Huang Zhuo-Yuan
Liu Jian-Tao Hou Zhi-Yun Zhou Gui-Yao[†]

(School of Information Optoelectronics Technology, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

(Received 11 May 2023; revised manuscript received 20 June 2023)

Abstract

Lanthanum aluminum silicate glass has excellent optical properties, such as high solubility of rare earth ions, good thermal stability, and excellent physicochemical properties. Some of its physicochemical properties are similar to those of silica glass, so it is easy to combine with silica glass to fabricate special optical fibers. It is considered to be an ideal laser glass matrix material. In this paper, a series of Tm^{3+} doped lanthanum aluminum silicate glasses with different concentrations for $x\text{Tm}_2\text{O}_3-(70-x)\text{SiO}_2-21\text{Al}_2\text{O}_3-9\text{La}_2\text{O}_3$ ($x = 0.2\%$, 0.4% , 0.6% , 0.8% , 1% , mole fraction) are successfully developed by the traditional high-temperature melting method. Using thulium-doped lanthanum aluminum silicate glass as the fiber core, thulium-doped double-cladding photonic crystal optical fibers are prepared by the stack-and-draw technique and rod in tube method. The core diameter of the thulium-doped lanthanum aluminosilicate glass double-clad photonic crystal fiber is as long as $21.7\text{ }\mu\text{m}$, the inner cladding diameter is about $119.3\text{ }\mu\text{m}$, and the outer diameter is about $236.8\text{ }\mu\text{m}$. The optical properties of thulium-doped lanthanum aluminum silicate glass and its optical fiber are studied experimentally. Under the excitation of a 793 nm laser, the fluorescence bandwidth of thulium-doped lanthanum aluminum silicate glass reaches 223 nm in a wavelength range of $1550\text{--}2050\text{ nm}$. The fiber laser constructed with thulium-doped lanthanum aluminosilicate glass fiber achieves a laser operating at around $2\text{ }\mu\text{m}$. The fiber laser resonant cavity consists of a pair of dichroic mirrors. The front dichroic mirror has high transmittance for light at 793 nm and high reflectivity (99.9%) for the light within a wavelength range of $1850\text{--}2050\text{ nm}$. The back dichroic mirror has high reflectivity (99.9%) for light at 793 nm and high transmittance ($\sim 15\%$) at 2050 nm . Under the experimental conditions in our laboratory, the laser power reaches 253 mW . The highest slope efficiency is 9.67% , which is close to that of the thulium-doped glass fiber laser reported in the literature. It is also found that the central wavelength of fiber laser is shifted toward the longer wavelength with the increase of the optical fiber's length. These results suggest that thulium-doped lanthanum aluminum silicate glass and thulium-doped photonic crystal fiber are suitable for $2\text{-}\mu\text{m}$ fiber laser.

Keywords: thulium-doped glass fiber, lanthanum aluminum silicate glass, photonic crystal fiber, $2\text{ }\mu\text{m}$ laser

PACS: 42.81.Bm, 42.55.Wd, 42.55.Xi, 42.81.Cn

DOI: 10.7498/aps.72.20230766

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61935010, 61735005).

[†] Corresponding author. E-mail: zguyao@163.com

掺铥镧铝硅酸盐玻璃光子晶体光纤制备及光学特性

夏长明 卢家澳 黄卓元 刘建涛 侯峙云 周桂耀

Preparation and optical properties of thulium doped lanthanum aluminum silicate glass photonic crystal fiber

Xia Chang-Ming Lu Jia-Ao Huang Zhuo-Yuan Liu Jian-Tao Hou Zhi-Yun Zhou Gui-Yao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 204206 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230766

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230766>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种可用于轨道角动量的受激布里渊放大的光子晶体光纤放大器

Design of photonic crystal fiber amplifier based on stimulated Brillouin amplification for orbital angular momentum

物理学报. 2022, 71(7): 074206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211909>

一种基于三芯光子晶体光纤的宽带模分复用器的设计与研究

Design and research of a broadband mode-division multiplexer based on three-core photonic crystal fiber

物理学报. 2022, 71(4): 044206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211187>

基于光子晶体光纤交叉敏感分离的磁场温度传感研究

Simultaneous measurement of magnetic field and temperature based on photonic crystal fiber with eliminating cross-sensitivity

物理学报. 2018, 67(18): 184212 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180680>

六重准晶涡旋光光子晶体光纤特性

Transmission characteristics of vortex beams in a sixfold photonic quasi-crystal fiber

物理学报. 2019, 68(11): 114209 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190381>

基于宽带可调谐、窄线宽掺铥光纤激光器的2 μm 波段水的超光谱吸收测量

Hyperspectral absorption of water around 2 μm based on a broadband tunable, narrow linewidth Tm-doped fiber laser

物理学报. 2022, 71(11): 114203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212127>

Xe离子束辐照硼硅酸盐玻璃和石英玻璃效应对比研究

Comparative studies of irradiation effects in borosilicate glass and fused silica irradiated by energetic Xe ions

物理学报. 2018, 67(3): 038101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172117>