

文章编号: 1000-7032(2022)04-0478-04

Bi 掺杂高磷石英基光纤实现 E 波段放大

郭梦婷¹, 田晋敏^{1,2}, 王 璠¹, 阳求柏^{1,3},
邵冲云¹, 王 孟¹, 张 磊¹, 崔淑珍¹, 于春雷^{1,4*}, 胡丽丽^{1,4*}

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 强激光材料重点实验室, 上海 201800; 2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024)

摘要: 采用改进的化学气相沉积技术结合液相掺杂工艺制备了低损耗 Bi 掺杂高磷石英基光纤, P₂O₅ 摩尔分数高达 7.2%, 光纤的背景损耗为 18 dB/km@1 550 nm。进一步采用 1 240 nm 的可调谐拉曼激光器泵浦自制 Bi 掺杂高磷石英基光纤, 在 1 355 ~ 1 380 nm 波段实现净增益, 在 1 355 nm 波长处的最高增益为 5.14 dB。这是国内首次制备出低损耗掺铋高磷石英基光纤, 并基于该掺铋光纤实现了近红外波段的净增益放大。

关键词: Bi 掺杂高磷石英基光纤; 宽带放大; 光纤光学

中图分类号: TN253 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20210409

Amplification in E Band Based on Highly Phosphorus and Bismuth Co-doped Silica Fiber

GUO Meng-ting¹, TIAN Jin-min^{1,2}, WANG Fan¹, YANG Qiu-bai^{1,3}, SHAO Chong-yun¹,
WANG Meng¹, ZHANG Lei¹, CUI Shu-zhen¹, YU Chun-lei^{1,4*}, HU Li-li^{1,4*}

(1. Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China)

* Corresponding Authors, E-mail: sdyclly@163.com; hulili@siom.ac.cn

Abstract: The low-loss bismuth- and highly phosphorous-co-doped silica fiber (BPDF) was prepared by the modified chemical vapor deposition technology combined with the solution doping method, where the mole fraction of phosphorous was as high as 7.2% and the background loss was 18 dB/km@1 550 nm. We used the tunable Raman laser operating at ~1 240 nm to pump the homemade BPDF, and achieved a broadband amplification in the range of 1 355 nm to 1 380 nm. The proposed BPDF amplifier provided the maximum gain of 5.18 dB at 1 355 nm. To our knowledge, this is the first report on the realization of low-loss BPDF fabrication, and the broadband amplification in the near-infrared band using the homemade BPDF in China.

Key words: highly phosphorus and bismuth co-doped silica fiber; broadband amplifier; fiber optics

收稿日期: 2021-12-24; 修订日期: 2022-01-14

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1805900)资助项目

Supported by National Key R&D Program of China(2020YFB1805900)

多媒体应用、云计算和因特网的飞速发展对光纤通讯网络的数据承载能力提出了苛刻的要求, 光纤系统扩容迫在眉睫。为有效利用石英基质的低损耗窗口, 亟需寻找一种可实现超宽带发光的石英基增益介质。2001 年, 日本 Fujimoto 在 Bi/Al 共掺硅酸盐玻璃中实现了半高宽为 300 nm 的近红外发光, 自此 Bi 掺杂光纤成为关注热点^[1]。英国南安普顿和俄罗斯经过多年研发, 目前已实现 O、E 和 U 波段的宽带放大及激光输出^[2-8]。上海光机所、上海大学、浙江大学、华南理工大学、华中科技大学等开展了大量 Bi 离子掺杂宽带发光机理及 Bi 掺杂玻璃、光纤性能研究^[9-15], 但尚未有低损耗 Bi 掺杂高磷石英基光纤制备及其在近红外波段的宽带净增益放大报道。此外, Bi 掺杂光纤放大器泵浦波长特殊, 泵浦源也是限制国内 Bi 掺杂光纤放大器发展的重要因素之一。

本文采用改进的化学气相沉积结合溶液掺杂技术制备 Bi 掺杂高磷石英基玻璃光纤, 为实现 E 波段放大, 共掺杂 P₂O₅ 含量 7.2% (摩尔分数), 光纤在 1 550 nm 的背景损耗约为 18 dB/km, 采用截断法测试的损耗谱如图 1 所示。采用电感耦合

等离子体原子发射光谱仪 (Thermo iCAP 6300) 表征纤芯中 P₂O₅ 含量。以已知 Bi 含量的溶胶凝胶结合高温烧结技术制备的石英玻璃为标样, 在相同测试条件下, 采用电子探针显微分析仪 (EPMA, JXA8230) 测试标样玻璃和纤芯中 Bi 元素分布情况, 根据强度比推算纤芯中 Bi 元素质量分数约为 0.02%。实验制备了 6/125 μm 的单模光纤, 纤芯和包层在 632.8 nm 处的折射率差约为 0.006 5。采用上海光机所冯衍团队崔淑珍搭建的可调谐拉

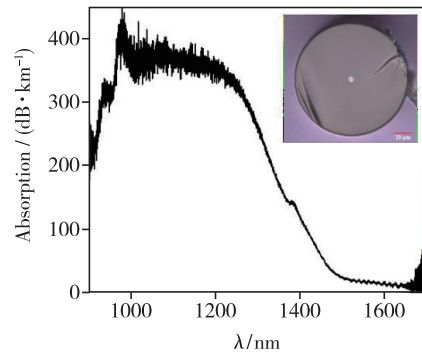


图 1 掺铋高磷石英基光纤吸收谱

Fig. 1 The absorption spectrum of the highly phosphorus and bismuth co-doped silica fiber

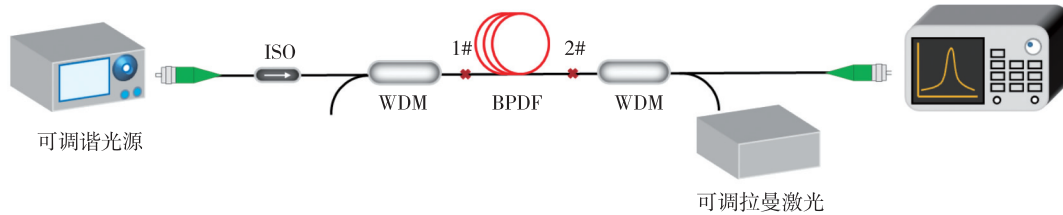


图 2 掺铋高磷石英基光纤放大器光路图

Fig. 2 The experimental setup of the highly phosphorus and bismuth co-doped silica fiber amplifier

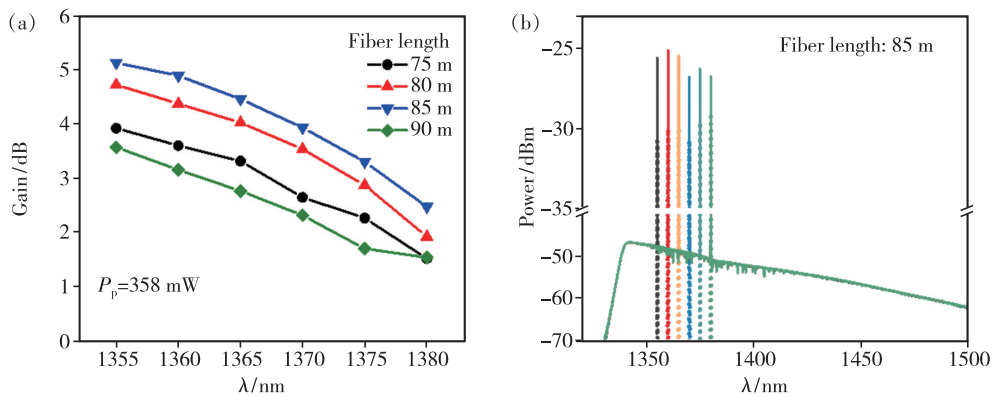


图 3 (a) 采用不同长度掺铋高磷石英基光纤搭建的放大器在不同波长处的净增益; (b) 采用 85 m 掺铋高磷石英基光纤搭建放大器放大前后信号谱。

Fig. 3 (a) The gain of the highly phosphorus and bismuth co-doped silica fiber amplifier at different signal wavelengths with different lengths of fiber. (b) The comparison between the input and the amplified signals from the highly phosphorus and bismuth co-doped silica fiber with the length of 85 m.

曼激光器泵浦自制 Bi 掺杂高磷石英基光纤,在 1 355 ~ 1 380 nm 波段实现净增益。

为验证自制低损耗掺铋高磷石英基光纤的放大性能,搭建了图 2 所示的一级放大光路。以可调谐拉曼激光器为泵浦源反向泵浦 Bi 掺杂高磷石英基光纤,泵浦波长为 1 240 nm,2#位置的泵浦光功率约为 358 mW。种子源为可调谐半导体激光器(Santec,1 355 ~ 1 485 nm),种子光经隔离器(ISO)和波分复用器(WDM)耦合进光纤,1#位置的种子光功率约为 -30 dBm。

图 3(a)为 1 240 nm,358 mW 泵浦条件下,采用 75,80,85,90 m 四种不同长度掺铋高磷石英基光纤搭建的放大器在不同信号光波长处的净增益。光纤长度为 85 m 时,该放大器在 1 355 nm 处实现了最高 5.14 dB 的净增益。虽然增益和增

益平坦性尚待优化,但这是国内首次基于国产掺铋石英光纤实现近红外波段的净增益放大。由图 3(b)可知,当信号光波长更短时,增益有望更高,但受测试装置限制无法表征更短波长的增益性能,后续将进一步优化光纤性能和测试条件以提高增益及其平坦度。

本文采用改进的化学气相沉积技术结合液相掺杂工艺制备了低损耗 Bi 掺杂高磷石英基光纤,并基于该光纤在 E 波段实现了净增益,在 1 355 nm 波长处的最高增益为 5.14 dB,后续将进一步优化该光纤的增益性能。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20210409>.

参 考 文 献:

- [1] FUJIMOTO Y, NAKATSUKA M. Infrared luminescence from bismuth-doped silica glass: optical properties of condensed matter [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001,40(3B):L279-L281.
- [2] THIPPARAPU N K, WANG Y, WANG S, et al. Bi-doped fiber amplifiers and lasers [J]. *Opt. Mater. Express*, 2019,9(6):2446-2465.
- [3] WANG Y, THIPPARAPU N K, RICHARDSON D J, et al. Ultra-broadband bismuth-doped fiber amplifier covering a 115-nm bandwidth in the O and E bands [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2021,39(3):795-800.
- [4] DIANOV E M, BUFETOV I A. Progress in bismuth-doped silica-based fiber lasers and amplifiers [C]. *Proceedings of the 2012 Asia Communications and Photonics Conference, Guangzhou*, 2012:1-3.
- [5] KHEGAI A, OSOSKOV Y, FIRSTOV S, et al. O-band bismuth-doped fiber amplifier with 67 nm bandwidth [C]. *Proceedings of the 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, San Diego*, 2020:1-3.
- [6] WANG Y, THIPPARAPU N K, RICHARDSON D J, et al. High gain Bi-doped fiber amplifier operating in the E-band with a 3-dB bandwidth of 40 nm [C]. *Proceedings of 2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, San Francisco*, 2021:1-3.
- [7] FIRSTOV S V, KHEGAI A M, KHARAKHORDIN A V, et al. Compact and efficient O-band bismuth-doped phosphosilicate fiber amplifier for fiber-optic communications [J]. *Sci. Rep.*, 2020,10(1):11347-1-9.
- [8] TAENGNOI N, BOTTRILL K R H, HONG Y, et al. Experimental characterization of an O-band bismuth-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Express*, 2021,29(10):15345-15355.
- [9] PENG M Y, QIU J R, CHEN D P, et al. Bismuth- and aluminum-codoped germanium oxide glasses for super-broadband optical amplification [J]. *Opt. Lett.*, 2004,29(17):1998-2000.
- [10] MENG X G, PENG M Y, CHEN D P, et al. Broadband infrared luminescence of bismuth-doped borosilicate glasses [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005,22(3):615-617.
- [11] ZHENG Z X, PAN X P, JI W Z, et al. Broad spectrum characteristics of Bi/Er co-doped silica optical fiber in C-band [C]. *Proceedings of 2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks, Qufu*, 2021:1-3.
- [12] ZENG L Z, WEN J X, YANG L, et al. C + L band light sources based on Bi/Er/La co-doped silica fibers [C]. *Proceedings of 2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks, Qufu*, 2021:1-3.
- [13] 周时凤, 阮健, 邱建荣. 铋掺杂玻璃的红外发光机理和宽带光放大 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009,46(2):36.
ZHOU S F, RUAN J, QIU J R. Infrared luminescence mechanism and broadband optical amplification of bismuth-doped

glass [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2009,46(2):36. (in Chinese)

- [14] 王岩山, 蒋作文, 栾怀训, 等. 双包层掺 Bi 光纤的制备及其光谱特性研究 [J]. *物理学报*, 2021,61(8):084215-1-5.
WANG Y S, JIANG Z W, LUAN H X, *et al.* Preparation and spectral characteristics of Bi-doped double cladding fiber [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2021,61(8):084215-1-5. (in Chinese)
- [15] LUO Y H, YAN B B, ZHANG J Z, *et al.* Development of Bi/Er co-doped optical fibers for ultra-broadband photonic applications [J]. *Front. Optoelectron.*, 2018,11(1):37-52.



郭梦婷 (1994 -), 女, 湖北襄阳人, 博士后, 2021 年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位, 主要从事稀土掺杂石英玻璃结构和性能及稀土掺杂石英光纤预制棒制备工艺的研究。

E-mail: guomengting@siom.ac.cn



胡丽丽 (1963 -), 女, 江西南昌人, 博士, 研究员, 1990 年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位, 主要从事发光和激光玻璃应用基础研究、稀土掺杂特种光纤的研制。

E-mail: hulili@siom.ac.cn



于春雷 (1980 -), 男, 山东潍坊人, 博士, 研究员, 2008 年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位, 主要从事稀土掺杂特种玻璃及光纤的制备及光谱、激光性能和面向天基应用激光材料的抗辐照加固技术的研究。

E-mail: sdyclley@163.com