

磷硅酸盐掺铋光纤实现 O+E 波段放大

殷晓科, 何乐, 刘少坤, 褚应波, 戴能利*, 李进延

华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074

摘要 由于数据流量需求的逐年增加, 现有光纤放大器的传输带宽已很难应对光纤通信系统的容量危机, 实现扩展波段的光放大被认为是一种解决容量危机的有效方案。不同基质的掺铋光纤的发光范围可以覆盖大部分的传输窗口, 因此具有重要的研究意义和广阔的应用前景。报道了一种基于改进的化学气相沉积技术制备的磷硅酸盐掺铋光纤, 并测试了其基本参数及放大性能。该掺铋光纤在 1550 nm 处的背景损耗为 21 dB/km, 在 1240 nm 处的吸收系数达 0.58 dB/m, 非饱和损耗占比为 13.6%。通过搭建单级前向泵浦结构测试了该掺铋光纤的放大性能, 当输入信号功率为 -15 dBm 时, 采用泵浦功率为 460 mW 的 1240 nm 半导体激光器进行泵浦, 将光纤长度优化至 140 m, 实现了 O+E 波段 (1270~1480 nm) 的净增益, 并在 1340 nm 处得到了最大增益 (21.2 dB), 其 3 dB 带宽约为 55 nm (1310~1365 nm)。

关键词 光纤光学; 掺铋光纤; 宽带放大; O 波段; E 波段

中图分类号 TN913.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230605

1 引言

由于 5G、大数据、云计算、物联网等技术的出现, 数据流量需求逐年增加, 现有的光纤通信网络正面临容量危机, 开发和实现高通信容量传输系统已成为当前的迫切需求^[1-2]。但受铋离子能级结构的限制, 目前光纤通信系统中广泛使用的掺铒光纤放大器 (EDFA) 仅可实现 C 波段和 L 波段的光放大, 而其他石英基光纤的低损耗传输窗口 (O、E、S、U 波段) 则无法得到有效利用^[3]。因此, 扩展光纤放大器的传输带宽被认为是一种解决容量危机的直接有效的方案^[4]。

目前受到广泛关注的光纤放大器有拉曼光纤放大器和稀土掺杂光纤放大器等。研究表明, 拉曼光纤放大器在理论上可实现任意波段的光放大, 但由于其对泵浦波长和泵浦功率的要求高等, 一般只能配合 EDFA 在一些特殊场景中使用^[5-6]。其他稀土离子掺杂光纤, 如氟化物基质掺镨光纤^[7]、掺钕微结构光纤^[8]、掺铊光纤^[9], 可实现 O、E、S 波段的光放大, 但是由于制备难度、系统的复杂性和适配性等特性, 其同样未得到广泛应用。近年来, 研究人员发现, 铋离子在不同的玻璃基质中可呈现出不同的发光特性。通过采用铝硅酸盐、磷硅酸盐、锗硅酸盐及高掺锗 (GeO₂ 的摩尔分数大于 50%) 硅酸盐基质, 可以分别实现 1150、1300、1450、1700 nm 波长附近的光放大。此类光纤以石英玻璃作为基质, 可使用改进的化学气相沉积 (MCVD)

技术制备, 且与现有通信光纤兼容^[10-11]。其中, 磷硅酸盐掺铋光纤 (BPSF) 的发光范围覆盖了第二传输窗口, 受到了研究人员的广泛关注。2009 年, Dianov 等^[12]首次报道了一种磷锗硅酸盐掺铋光纤, 采用单级前向泵浦结构在 1320 nm 处实现了最大增益为 24.5 dB、噪声系数为 5 dB 的光放大, 3 dB 增益带宽达 37 nm。2016 年, 南安普敦大学报道了一种 BPSF, 采用单级双向泵浦在 1320~1360 nm 波长范围内实现了 (25±1) dB 的平坦增益, 噪声系数为 4~6 dB^[13]。2021 年, 南安普敦大学报道了一种在 1345~1460 nm 波长范围内可提供大于 20 dB 增益的 BPSF, 但在该光纤制备过程中未采取任何除水工艺, 导致增益在 1380 nm 处受 OH⁻ 的影响较大^[14]。2022 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所成功制备出低损耗铋磷共掺光纤, 在双向泵浦结构下实现了 E 波段 30 nm 带宽的净增益, 且在 1355 nm 处得到接近 20 dB 的最大增益^[15]。

本文采用 MCVD 技术, 通过优化掺杂工艺, 成功制备了 BPSF, 并测试了光纤的基本参数。为了研究光纤中非活性中心铋离子引起的损耗, 搭建了非饱和损耗测试实验装置, 测得光纤在 1240 nm 处的非饱和损耗占比为 13.6%。采用单级前向泵浦放大结构对该 BPSF 的增益性能进行了测试, 在 1340 nm 处测得光纤的最大增益达 21.2 dB, 3 dB 带宽约为 55 nm, 净增益范围覆盖 O+E 波段。研究结果有利于掺铋光纤的产业化应用, 为我国宽带光纤放大器的发展提供了技术

收稿日期: 2023-03-09; 修回日期: 2023-04-28; 录用日期: 2023-05-16; 网络首发日期: 2023-07-04

基金项目: 国家自然科学基金 (11875139)

通信作者: *dainl@mail.hust.edu.cn

支持。

2 光纤制备及基本参数

本文中的磷硅酸盐掺铋光纤预制棒是采用 MCVD 技术制备的,在制备过程中通过对反应温度、管内压力、气氛等条件进行调控来控制铋离子的价态,从而得到相应的铋发光活性中心。测试了掺铋光纤预制棒的折射率剖面,结果如图 1 所示。芯层中磷的引入可提高芯层折射率,波导结构中芯层与包层的折射率差(Δn)为 0.0045,中心折射率凹陷是由制备过程中磷的挥发导致的。

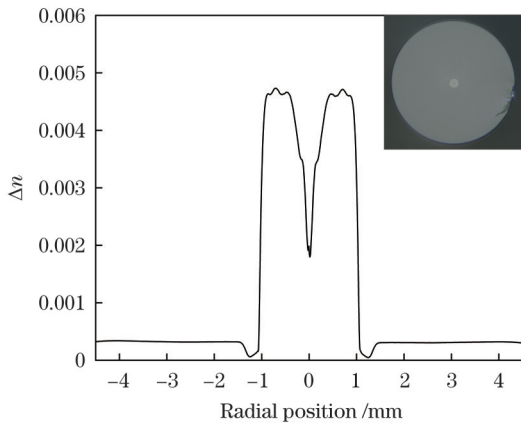


图 1 掺铋光纤预制棒的折射率剖面,插图为光纤端面图
Fig. 1 Refractive index profile of Bi-doped fiber preform with cross-sectional image of BPSF shown in inset

将预制棒拉制成纤芯直径和包层直径分别为 $9\ \mu\text{m}$ 和 $120\ \mu\text{m}$ 的光纤,光纤端面如图 1 中的插图所示,其截止波长计算值为 $1000\ \text{nm}$,可保证光纤在 O+E 波段单模运转。使用吸收谱测试仪,采用截断法测试光纤的吸收系数及背景损耗,测得光纤在 $1240\ \text{nm}$ 处的吸收系数为 $0.55\ \text{dB/m}$,在 $1550\ \text{nm}$ 处的背景损耗为 $21\ \text{dB/km}$,其吸收光谱如图 2 所示。

铋的发光中心受到组分的影响,在不同玻璃基质中会产生不同的发光中心。在 BPSF 中,铋离子分别与磷、硅结合,产生铋磷活性中心(BACs-P)和铋硅活性中心^[14](BACs-Si),其中 BACs-P 和 BACs-Si 的吸收峰分别位于 $1240\ \text{nm}$ 和 $1400\ \text{nm}$ 附近。从吸收光谱可

以得出,该掺铋光纤中 BACs-P 的吸收系数大于 BACs-Si,可以推断出光纤中 BACs-P 的含量多于 BACs-Si 的含量。而在 BPSF 中,铋离子在 $1550\ \text{nm}$ 处没有吸收,因此选择该位置的光纤损耗作为背景损耗。由于制备工艺的优化,光纤中残留的 OH^- 含量减少,故吸收谱在 $1380\ \text{nm}$ 处未出现明显的水峰。

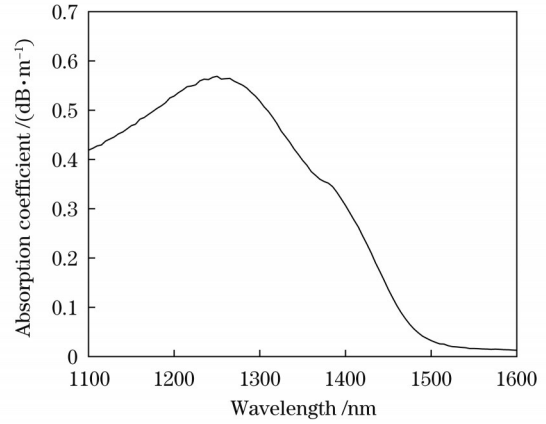


图 2 磷硅酸盐掺铋光纤的吸收谱
Fig. 2 Absorption spectrum of BPSF

3 实验结果与分析

非饱和损耗(UL)是衡量光纤性能的重要指标,在掺铋光纤中并非所有铋离子均为活性中心,铋离子之间的团簇、铋离子与光纤中缺陷或杂质的作用等都会导致光纤中反转粒子数的减少,引起额外的损耗。UL 与小信号吸收(SSA)的比值即非饱和损耗占比反映了光纤中 UL 在总损耗中的占比。一般而言,随着光纤中铋离子浓度的增加,UL 增加,从而光纤增益和效率降低。因此,高 SSA、低 UL、低非饱和损耗占比有利于提升掺铋光纤的增益性能。

为了验证该掺铋光纤的性能,首先搭建了图 3 所示的实验装置,测试了光纤在 BACs-P 吸收峰处的 SSA 与 UL。其中 $1240\ \text{nm}$ 半导体激光器(LD)可提供最大 $500\ \text{mW}$ 的输出功率,通过调节衰减器(ATT),控制输入光纤的实际泵浦光功率。泵浦光经由 10/90 耦合器的一端注入待测光纤,其另一端与积分球相连接,通过光功率计测量输出功率的变化情况。

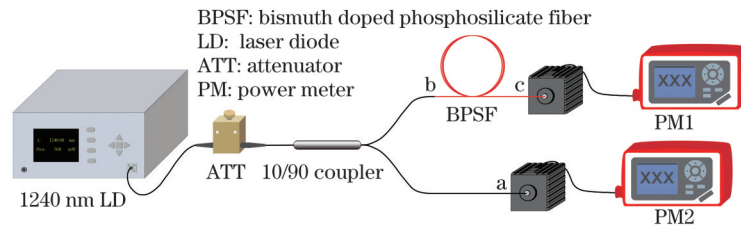


图 3 非饱和损耗测试实验装置

Fig. 3 Experimental setup for unsaturated loss measurement

具体测试方法如下:将 $1240\ \text{nm}$ LD 的输出功率调节至 $500\ \text{mW}$,在未接入 BPSF 时,利用 PM1 和 PM2

分别测量 b 点和 a 点的功率,调节衰减器,使得 b 点功率由 $-30\ \text{dBm}$ 逐渐增加至 $+23\ \text{dBm}$,记录 b 点功率

(P_{in}) 以及对应的 a 点功率。在接入 BPSF 后, 利用 PM1 测量 c 点功率, 通过调节衰减器并监测 a 点功率来调节输入光纤功率, 记录输入功率为 P_{in} 时对应的 c 点输出功率 (P_{out})。计算得出光纤损耗 (L_o) 随泵浦功率的变化趋势, 结果如图 4 所示。计算公式为

$$L_o = \frac{10}{L} \lg \frac{P_{in}}{P_{out}}, \quad (1)$$

式中: L 为待测光纤长度。

测得该光纤在 1240 nm 处的 SSA 为 0.58 dB/m。在充分泵浦的条件下测得 UL 为 0.079 dB/m, 非饱和损耗占比计算值为 13.6%。而在文献 [14] 中, 当 BPSF 在 1240 nm 处的 SSA 为 0.55 dB/m 时, 非饱和损耗占比为 16.4%。通过对比可以发现, 在同等吸收系数水平下, 本文所制备的 BPSF 的非饱和损耗占比更低。结果表明, 该掺铋光纤中的大部分铋离子与磷结合产生了 BACs-P, 仅小部分铋离子产生了非活性中心, 引起了损耗。

为了评估光纤的增益性能, 搭建了图 5 所示的放大系统。工作波长为 1260~1485 nm 的可调谐光源提

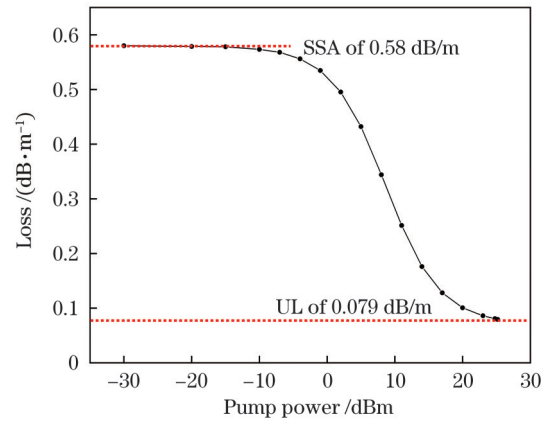


图 4 光纤损耗随 1240 nm 泵浦功率的变化
Fig. 4 Fiber loss versus 1240 nm pump power

供 O+E 波段的信号, 1240 nm 波长的 LD 充当泵浦源, 其最大输出功率为 500 mW。信号光和泵浦光经由波分复用器 (WDM) 耦合进入掺铋光纤, 隔离器 (ISO) 则用于防止后向放大自发辐射 (ASE) 的影响。最终, 使用光谱分析仪 (OSA) 测量输入输出光谱并计算光纤增益。

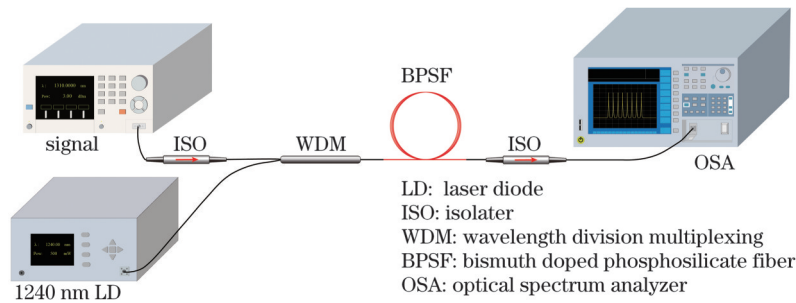


图 5 掺铋光纤增益性能测试实验装置

Fig. 5 Experimental setup for gain measurement of Bi-doped fiber

在 1240 nm 的泵浦下, 其 ASE 光谱如图 6(a) 所示, ASE 峰值波长位于 1345 nm 附近。当输入光纤的信号功率设置为 -15 dBm, 1240 nm 泵浦光的功率为

460 mW 时, 测得不同光纤长度下的输出光谱。当光纤长度为 140 m 时, 输出光谱如图 6(b) 所示, 其中插图为输入信号光谱。

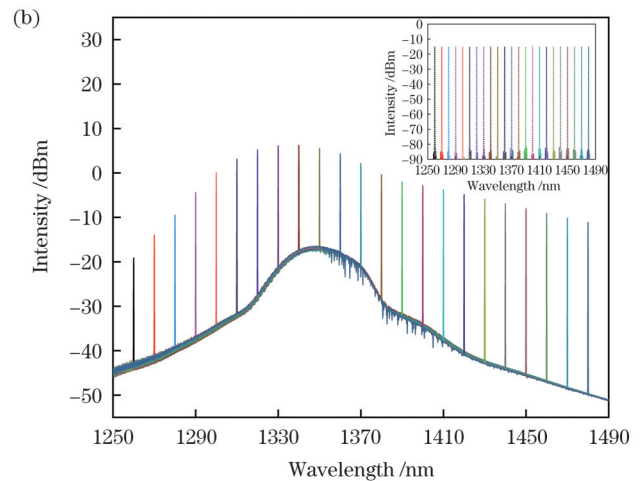
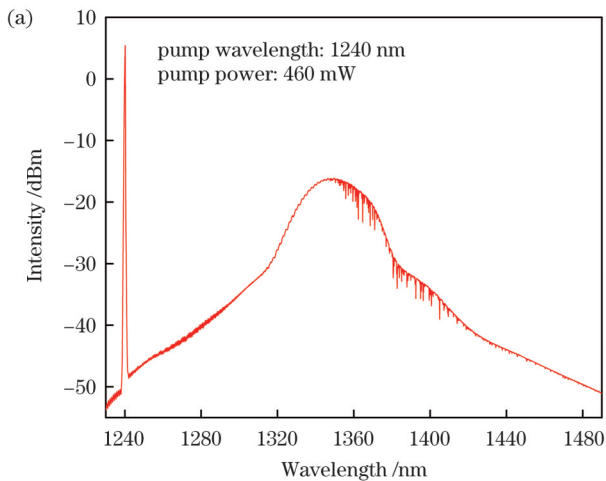


图 6 测量结果。(a) 1240 nm 泵浦下的 ASE 光谱; (b) 光纤长度为 140 m 时的输出光谱 (插图为输入光谱)

Fig. 6 Measurement results. (a) ASE spectrum under 1240 nm pump; (b) output spectrum when fiber length is 140 m with input spectrum shown in inset

基于所测得的输入光谱与不同光纤长度下的输出光谱,通过 OSA 计算得出光纤增益谱,如图 7 所示。随着光纤长度的减小,短波处的增益值呈现上升趋势。但光纤长度的减小会引起饱和输出功率减小,使得最大增益值减小,且最大增益波长点向短波方向移动。当光纤长度优化至 140 m 时,在 1340 nm 处得到最高增益,为 21.2 dB,最终在 1270~1480 nm 波长范围内可实现净增益,其 3 dB 带宽约为 55 nm (1310~1365 nm)。

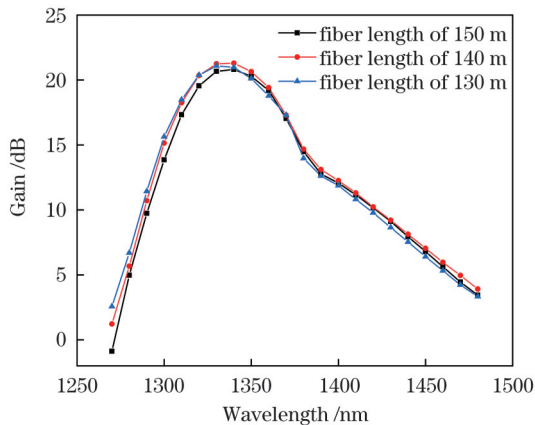


图 7 磷硅酸盐掺铋光纤放大性能的测试结果

Fig. 7 Measured results of BPSF amplification performance

在 BPSF 中, BACs-P 和 BACs-Si 的发光中心分别位于 1330 nm 和 1430 nm 附近,从光纤吸收系数可以推断出,光纤中 BACs-P 的含量大于 BACs-Si 的含量,且测得光纤在 1240 nm 处具有较小的非饱和损耗占比,光纤中的 BACs-P 含量高。因此,在 1240 nm LD 泵浦下,从增益谱可以看出,光纤在 O 波段的增益系数明显大于其在 E 波段的增益系数,且增益谱在 1380 nm 附近未出现明显的增益凹陷,其主要原因是制备过程中工艺的优化减小了光纤中的 OH^- 含量,其对增益的影响减弱。而在文献[14]中,放大器为双向泵浦结构,前后向泵浦波长分别为 1310 nm 和 1270 nm,总泵浦功率高达 850 mW,并且由于掺铋光纤的增益峰会随着泵浦波长的增加向长波方向移动,更长波长的泵浦充分激发了 BACs-Si,提高了 E 波段的增益,因此实现了 O 波段和 E 波段增益的均衡,但由于未采用任何除水工艺,在 1380 nm 附近出现了明显的增益凹陷。综上所述,将 BPSF 中的 BACs-P 与 BACs-Si 含量保持在同等水平、使用合适的泵浦波长及泵浦方式、减少光纤中的 OH^- 含量等均可使光纤性能得到提升。

4 结 论

基于 MCVD 技术成功制备出高增益磷硅酸盐掺铋光纤。该光纤在 1550 nm 处的背景损耗为 21 dB/km。通过搭建非饱和吸收测试平台,测得光纤在 1240 nm 处的吸收系数达 0.58 dB/m,非饱和吸收为 0.079 dB/m,

非饱和吸收占比为 13.6%,说明光纤中转化为活性发光中心的铋离子数量较多,光纤损耗小。最后搭建了单级前向泵浦放大器结构,验证了光纤的增益性能,当输入信号功率和 1240 nm 泵浦功率分别为 -15 dBm 和 460 mW 时,在 1340 nm 处测得最大增益,为 21.2 dB,3 dB 带宽约为 55 nm (1310~1365 nm)。在该光纤中同时存在 BACs-P 和 BACs-Si,因此实现了 O+E 波段约 210 nm 波长范围的净增益。

参 考 文 献

- [1] 褚应波,李进延. 宽带放大光纤研究进展及发展趋势[J]. 发光学报, 2022, 43(11): 1678-1689.
Chu Y B, Li J Y. Research progress and development trend of broadband amplification fiber[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2022, 43(11): 1678-1689.
- [2] 裴丽,李祉祺,王建帅,等. 空分复用光纤放大器增益均衡技术研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106001.
Pei L, Li Z Q, Wang J S, et al. Review on gain equalization technology of fiber amplifier using space division multiplexing[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106001.
- [3] 褚应波,娄阳,陈阳,等. 超宽带、高增益、低噪声 L-band 扩展掺铋光纤及其放大性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0715001.
Chu Y B, Lou Y, Chen Y, et al. Ultra-broadband, high gain, and low noise extended L-band erbium-doped fiber and its amplification performance[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0715001.
- [4] Rapp L, Eiselt M. Optical amplifiers for multi-band optical transmission systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(6): 1579-1589.
- [5] Hazarika P, Tan M M, Donodin A, et al. 210 nm E, S, C and L band multistage discrete Raman amplifier[C]//2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 6-10, 2022, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2022.
- [6] Cai J X, Sun Y, Zhang H B, et al. 49.3 Tb/s transmission over 9100 km using C+L EDFA and 54 Tb/s transmission over 9150 km using hybrid-raman EDFA[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(13): 2724-2734.
- [7] Sakamoto T, Nishida Y, Kanamori T, et al. 1300 nm-band WDM transmission employing PDFAs[C]//Optical Amplifiers and their Applications, June 9 1999, Nara, Japan. Washington, D. C.: Optical Society of America, 1999: SN2.
- [8] Dawson J W, Kiani L S, Pax P H, et al. E-band Nd^{3+} amplifier based on wavelength selection in an all-solid micro-structured fiber [J]. Optics Express, 2017, 25(6): 6524-6538.
- [9] Wang J J, Jia Z X, Zhang C Z, et al. Thulium-doped fluorotellurite glass fibers for broadband S-band amplifiers[J]. Optics Letters, 2022, 47(8): 1964-1967.
- [10] Dianov E M, Firstov S V, Mel'kumov M A. Bismuth-doped fiber lasers covering the spectral region 1150-1775 nm[C]//Frontiers in Optics 2015, October 18-22, 2015, San Jose, California. Washington, D.C.: Optical Society of America, 2015: LTu2H.1.
- [11] 叶夫根尼·迪亚洛夫. 掺铋光纤的历史、发展和展望[J]. 光学与光电技术, 2020, 18(1): 1-4.
Dianov E M. History, development and prospect of bismuth-doped optical fiber[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2020, 18(1): 1-4.
- [12] Dianov E M, Mel'kumov M A, Shubin A V, et al. Bismuth-doped fibre amplifier for the range 1300-1340 nm[J]. Quantum Electronics, 2009, 39(12): 1099-1101.
- [13] Thipparapu N K, Umnikov A A, Barua P, et al. Bi-doped fiber amplifier with a flat gain of 25 dB operating in the wavelength band 1320 - 1360 nm[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1518-1521.
- [14] 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]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(3): 795-800.

[15] Tian J M, Guo M T, Wang F, et al. High gain E-band amplification based on the low loss Bi/P co-doped silica fiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(10): 100602.

Bismuth-Doped Phosphosilicate Fiber for O+E Band Amplification

Yin Xiaoke, He Le, Liu Shaokun, Chu Yingbo, Dai Nengli*, Li Jinyan

Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China

Abstract

Objective With the rapid application of 5G, big data, cloud computing, internet of things (IoT), and other technologies, the demand for data traffic has greatly increased in recent decades. Current optical fiber amplifiers are no longer able to cope with the capacity crunch in communication systems, and extending the gain bandwidth of the amplifier is considered an economical and feasible solution. However, commercially available erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) can only achieve optical amplification in the C-band and the L-band, and 1260–1500 nm band is under-exploited. Recently, bismuth-co-doped glasses and fibers have attracted attention because of their various luminescence characteristics based on different host materials, which cover the wavelength range of most communication transmission windows. Currently, bismuth co-doped phosphosilicate fibers have great potential in the second transmission window (1260–1360 nm) owing to their excellent compatibility with silica communication fibers. Therefore, bandwidth extension using Bi-doped phosphosilicate fibers is an effective solution for increasing transmission capacity.

Methods Because of the characteristics of bismuth ions, such as unstable chemical valence and sensitivity to the glass matrix, it is difficult to prepare Bi-doped silica-based fibers. In this study, we demonstrate a Bi-doped phosphosilicate fiber fabricated using modified chemical vapor deposition (MCVD) technology. The refractive index profile of the preform is measured. The preform is then drawn to a fiber with core diameter/cladding diameter of 9 μm /120 μm . Optical parameters, such as background loss and absorption spectra, are recorded. Moreover, the ratio of the unsaturated loss to small-signal absorption indicates the extrinsic loss level of the Bi-doped fibers, which is measured by testing the output power variation with increasing pump power. Finally, an all-fiber experimental configuration of a Bi-doped fiber amplifier is constructed to evaluate the amplification properties of the fiber based on the single stage with forward-pumping scheme.

Results and Discussions To ensure adequate optical properties, the refractive index profile of the fiber is measured, and a cutoff wavelength of 1000 nm is calculated with a refractive index difference between the core layer and cladding layer of 0.0045. The absorption coefficient of 0.55 dB/m at 1240 nm and the background loss of 21 dB/km at 1500 nm are measured using the standard cutback method, and no significant water peak is observed. In addition, the variation in loss with increasing pump power is measured to estimate the unsaturated loss and the ratio of the unsaturated loss to small-signal absorption, which are 0.079 dB/m and 13.6%, respectively. The results indicate that only a small fraction of bismuth ions form inactive centers to induce loss, whereas most of them form bismuth active centers associated with phosphorus (BACs-P). Finally, the amplification characteristics of the Bi-doped fibers are measured using a single-stage amplifier configuration with a forward-pumping scheme. With the signal power of -15 dBm and the pump power of 460 mW at 1240 nm, the maximum gain of 21.2 dB is achieved using a fiber length of 140 m. A net gain with a bandwidth (1270–1480 nm) covering the O-band and E-band is obtained, and the 3 dB bandwidth from 1310 nm to 1365 nm is also achieved. It can be observed that the gain in the O-band is significantly greater than that in the E-band; thus, we believe the difference is attributable to the higher concentration of BACs-P than that of bismuth active centers associated with silicon (BACs-Si).

Conclusions We report a bismuth co-doped phosphosilicate fiber fabricated using MCVD technology. The maximum gain of 21.2 dB is achieved at 1340 nm for the 460 mW pump power of a 1240 nm laser diode and the signal power of -15 dBm in the single-stage and forward-pumping amplifier configuration. Meanwhile, a net gain bandwidth from 1270 nm to 1480 nm covering the O+E band is achieved, and the 3 dB bandwidth is approximately 55 nm.

Key words fiber optics; bismuth doped fiber; broadband amplification; O-band; E-band