

## 基于自研铋共掺石英光纤的 E+S 波段放大输出

光通信关键技术的发展趋势是频谱宽频化,即传统光放大器向全谱化方向发展。传统光纤放大器受稀土离子 4f 窄带禁戒跃迁特性的限制,工作波段无法完全覆盖石英光纤低损耗传输窗口 O+E+S+L+U 波段,发展新离子掺杂激光材料成为必然趋势。1999 年,日本学者在掺铋玻璃中发现了近红外波段的宽带发光。以俄罗斯科学院光纤光学研究中心(FORC)及英国南安普敦大学光电子研究中心为代表的研究机构基于掺铋石英光纤实现了 1100~1700 nm 波段的宽带放大,得到了新波段激光。国内浙江大学和华南理工大学等单位在铋离子发光和掺铋光纤方面开展了长期研究工作。但在掺铋石英光纤近红外波段激光和宽带放大方面,国内研究仍落后于国外。2022 年中国科学院上海光学精密机械研究所在国内率先制备出低损耗掺铋高磷石英基光纤,在 1355~1385 nm 波段实现了 ~20 dB 净增益放大。

为了将掺铋光纤的放大频段拓展至 E+S 波段,近期中国科学院上海光学精密机械研究所采用共掺

铋调控铋离子配位环境,在低损耗铋共掺石英光纤中实现了 1370~1480 nm 波长范围内的净增益放大。该铋共掺石英光纤由改进的化学气相沉积法结合溶液掺杂技术制备,光纤尺寸为 8  $\mu\text{m}$ /125  $\mu\text{m}$ ,光纤由纯石英玻璃包层、含氟石英玻璃过渡层和铋铋共掺石英玻璃纤芯组成,纤芯数值孔径达 0.21, Bi 的质量分数约为 0.017%,光纤性能参数如图 1 和表 1 所示。采用 1280 nm 的半导体激光器(LD)双向泵浦方式,总泵浦功率为 817 mW,输入种子光功率(1#位置)为 -30 dBm,相应的掺铋光纤放大器(BDFA)装置如图 2 所示。增益谱如图 3 所示,300 m 长的铋共掺石英光纤在 1370~1480 nm 波段的最高增益为 11.2 dB@1430 nm,噪声指数(NF)为 4.66 dB,3 dB 带宽为 52 nm。因光纤的羟基含量高,在 1380 nm 处增益出现一个极低值。表 1 对比了本文研制的光纤与 FORC 在 2022 年最新报道的铋共掺石英光纤的关键性能指标。在本文研制的光纤中,铋近红外发光中心含量少,吸收系数偏低,导致

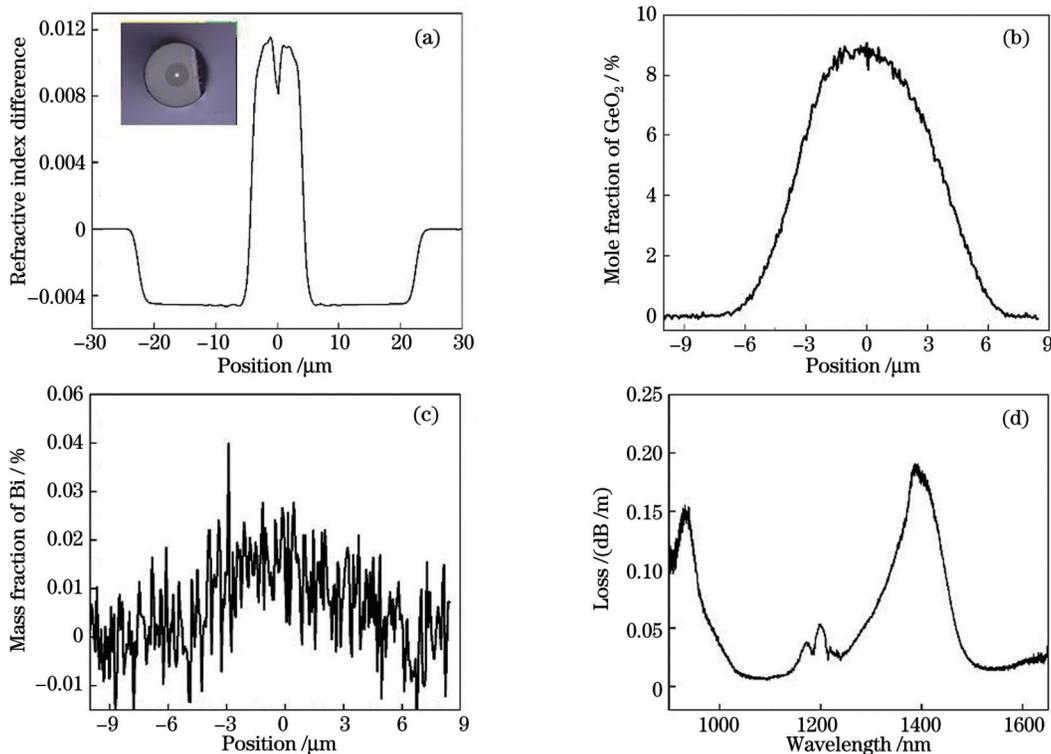


图 1 铋共掺石英光纤性能。(a) 折射率; (b)  $\text{GeO}_2$  的径向分布; (c) Bi 的径向分布; (d) 吸收谱

Fig. 1 Properties of Ge/Bi-co-doped silica fiber. (a) Refractive index; (b) radial distribution of  $\text{GeO}_2$ ; (c) radial distribution of Bi; (d) absorption spectrum

表 1 本文研制的光纤与 FORC 在 2022 年最新报道的铋锗共掺石英光纤的关键性能指标对比

Table 1 Comparison of key performance indicators between Ge/Bi-co-doped silica fiber reported by FORC in 2022 and proposed fiber

Work	Background loss	Absorption coefficient @ 1280 nm	-3 dB gain bandwidth	Pump wavelength	Gain coefficient per unit length	Gain coefficient per unit power
This work	7 dB/km @1095 nm	48 dB/km	52 nm	1280 nm	0.037 dB/m @1430 nm	0.014 dB/mW @1430 nm
FORC	20 dB/km @1150 nm	106 dB/km	~40 nm	1330 nm	~0.25 dB/m @1445 nm	0.52 dB/mW @1445 nm

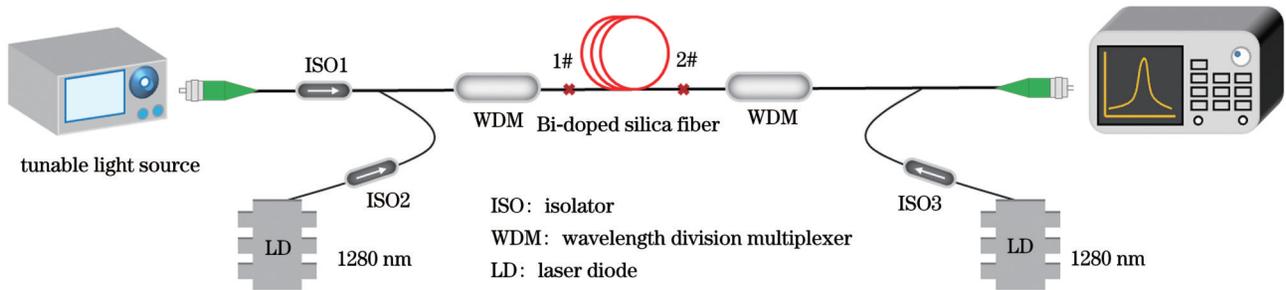


图 2 BDFA 装置图

Fig. 2 BDFA device diagram

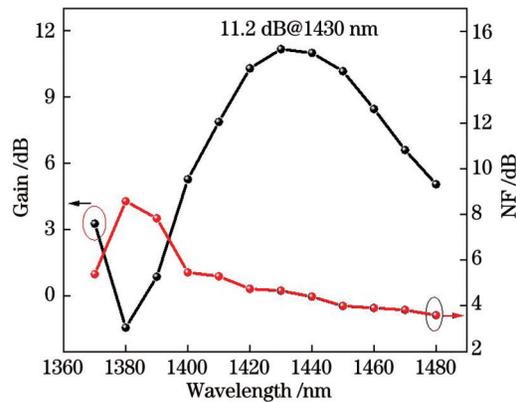


图 3 单级 BDFA 的增益谱和 NF

Fig. 3 Gain spectrum and NF value of single-stage BDFA

增益系数小于国外报道的最高值,但光纤背景损耗和-3 dB 带宽指标优于国外报道。据我们所知,这是国内首次基于国产掺铋石英光纤实现 E+S 波段光放大输出。该类光纤的成功研制有望加快我国全波段光纤放大器的研制进程,以满足超宽带放大

器对掺铋宽带增益光纤材料国产化的迫切需求。后续研究团队将从优化铋离子浓度和锗硅比例、调控铋离子价态、降低羟基含量等方面提升光纤单位长度和单位泵浦功率的增益性能,并进一步拓展增益带宽。

郭梦婷<sup>1</sup>, 田晋敏<sup>1,4</sup>, 王璠<sup>1</sup>, 王孟<sup>1</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 崔淑珍<sup>2,3</sup>, 于春雷<sup>1,3,5\*</sup>, 胡丽丽<sup>1,3,5\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光单元技术实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>3</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

<sup>4</sup>中国科学技术大学物理学院, 安徽 合肥 230026;

<sup>5</sup>国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024

通信作者: \*sdyclcy@163.com; \*\*hulili@siom.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB1805902)

收稿日期: 2022-12-20; 修回日期: 2023-01-11; 录用日期: 2023-02-08; 网络首发日期: 2023-02-18