

高吸收锗硅酸盐掺铋光纤及其增益性能研究

刘少坤, 何乐, 殷晓科, 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 目前基于掺铋光纤放大器(EDFA)的光纤通信骨干网络仅能有效利用C+L波段(1524~1625 nm)。在E+S波段, 锗硅酸盐掺铋光纤可进一步扩展放大器的增益带宽, 具有重要研究价值, 但其过长的使用长度严重制约了其应用。报道了一种高吸收锗硅酸盐掺铋光纤, 其使用长度得到大大缩短, 同时具有高增益。基于前向泵浦结构测试了掺铋光纤的增益性能, 泵浦功率和波长分别为367 mW和1310 nm, 输入信号总功率为-20 dBm。结果表明, 50 m长的光纤在1414~1479 nm实现了大于20 dB的增益, 65 m长的光纤的增益在1450 nm处达到最大(33 dB), 单位长度增益系数达0.51 dB/m。研究结果证明了锗硅酸盐掺铋光纤在WDM光纤通信网络中的实际应用潜力。

关键词 光纤光学; 锗硅酸盐掺铋光纤; 高吸收; E+S波段; 放大

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230666

1 引言

掺铋光纤(BDF)在1150~1500 nm和1600~1800 nm范围内显示出巨大的应用潜力^[1-5], 吸引了研究人员的广泛关注。在不同的玻璃基体上可以形成具有不同光谱性质的铋活性中心(BACs)^[6-10], 主要有BACs-Al、BACs-P、BACs-Si、BACs-Ge四种, 分别在1150、1300、1450、1700 nm附近发光^[10-15]。近几年, 掺铋光纤的性能纪录不断被刷新。2021年, Ososkov等^[16]报道了一种磷硅酸盐掺铋光纤。该光纤优化了磷的掺杂含量, 使得BACs-P、BACs-Si活性中心在光纤中同时存在, 通过制备工艺和掺杂工艺的优化, 抑制了OH⁻的含量, 显著降低了1380 nm附近增益的凹陷程度, 进而在1325~1441 nm范围内获得了大于23 dB的增益, 实现了泵浦功耗、增益平坦度、增益带宽和使用长度(150 m)等性能的显著优化。2021年, Donodin等^[17]报道了一种锗硅酸盐掺铋光纤, 该掺铋光纤在1405~1460 nm范围内实现了大于20 dB的增益, 在1430 nm处的最大增益达30.36 dB, 所用光纤长度为320 m。从上述研究可以看出, 掺铋光纤在E和S波段的使用长度为150~320 m, 这是因为目前掺铋光纤中的有效活性铋离子的质量分数($<10^{-4}$)偏低。相较于目前商用掺铋光纤放大器(EDFA)所用光纤, 增益光纤的成本及器件集成度严重阻碍了掺铋光纤的实用化, 且掺铋光纤使用长度过长的问题一直未被解决。为了缩短掺铋光纤的使用长度, Gumenyuk等^[18]报道了一种高吸收锗硅酸盐掺铋光纤, 在泵浦波长为1320 nm、泵浦功

率为360 mW的条件下, 在1430 nm处实现了4.4 dB/m的单位长度增益, 但其非饱和损耗过高, 在1430 nm处达2.8 dB/m, 这严重影响了光纤的放大性能, 说明该研究并未解决高BACs和高非饱和损耗之间的矛盾。因此, 为了拓展传输带宽、减小光纤使用长度, 研究高吸收锗硅酸盐掺铋光纤具有重要意义。

国内研究者针对掺铋光纤也开展了一系列研究并取得了一定成果。2012年, 廖雷^[19]研究了掺铋光纤制备方法及光纤在不同泵浦波长下的荧光特性。2021年, 师娟娟等^[20]制备了磷硅酸盐掺铋光纤和硅酸盐掺铋光纤, 采用532、808、976 nm半导体激光器测试了光纤的超宽带荧光性能, 并在1348 nm泵浦光激发下实现了光谱覆盖1400~1600 nm的宽带荧光。2022年, Tian等^[21]报道了一种低损耗磷硅酸盐掺铋光纤, 该研究采用1240 nm双向泵(泵浦功率为870 mW, 输入信号强度为-30 dBm), 实现了E波段信号的放大, 1355 nm处的最大净增益接近20 dB, 所用光纤长度为190 m。2023年, 郭梦婷等^[22]报道了一种锗硅酸盐掺铋光纤, 在1430 nm处的最大增益为11.2 dB, 使用光纤长度为300 m, 但该光纤依然存在使用长度过长的问题, 性能指标与国际报道水平仍有较大差距。

本文成功制备出在E+S波段实现高增益放大的高吸收锗硅酸盐掺铋光纤(若无特殊说明, 后文中所述“掺铋光纤”即指该光纤), 通过搭建测试平台, 测试了该光纤的非饱和损耗(UL), 1310 nm处的UL为0.19 dB/m, 占小信号吸收(1.16 dB/m)的16.4%。在输入信号总功率为-20 dBm的条件下, 基于前向泵浦

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-04-30; 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

(泵浦功率和波长分别为 367 mW 和 1310 nm) 结构测试了光纤的增益性能。结果表明: 所设计的 50 m 长光纤可在 1414~1479 nm 区间实现大于 20 dB 的增益; 当光纤长度为 65 m 时, 其在 1450 nm 处的增益达到最大 (33 dB)。

2 光纤基本参数及增益测试

首先基于改进的化学气相沉积 (MCVD) 法结合液相掺杂技术制备出预制棒。采用预制棒折射率分布测试仪测试预制棒的折射率剖面, 结果如图 1(a) 所

示。然后利用拉丝塔拉丝得到本文掺铋光纤。纤芯直径/包层直径为 8 μm /125 μm , 光纤截面如图 1(a) 中的插图所示。采用光纤综合特性测试仪, 通过标准截断法测试光纤吸收谱, 结果如图 1(b) 中实线所示。同时展示了文献 [17] 所用光纤 (OFSR) 的吸收谱以作对比, 如图 1(b) 中虚线所示, 可以看到, 本文掺铋光纤的吸收率整体高于 OFSR。利用电子探针显微分析仪 (EPMA) 测试纤芯中 Bi 和 Ge 的掺杂摩尔分数, 测试结果如表 1 所示, 其中 R_{UL} 为 UL 占小信号吸收的百分比。

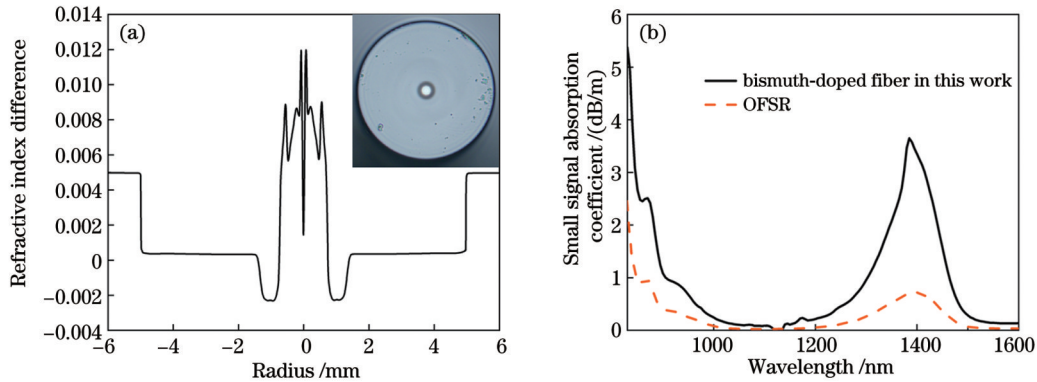


图 1 预制棒与光纤的特征。(a) 预制棒的折射率剖面, 插图为光纤截面图; (b) 吸收谱

Fig. 1 Characteristics of preform and optical fibers. (a) Refractivity profile of preform with cross-sectional image of fiber shown in inset; (b) absorption spectra

表 1 光纤的基本参数

Table 1 Basic characteristics of fibers

Fiber	Numerical aperture	Mole fraction of Ge / %	Mole fraction of Bi / %	Absorptivity / (dB/m) (1310 nm)	$R_{\text{UL}} / \%$
Bismuth-doped fiber in this work	0.15	6.63	0.017	1.16	16.5
OFSR ^[17]	0.14	5.88	<0.01	0.30	

UL 是表征掺铋光纤性能的重要指标之一, 对掺铋光纤的增益性能有着重要的影响。具体 UL 测试流程如下: 首先将耦合器同侧的一端 (point 1) 直接插入功率计 2 (PM-2) 中, 同侧另一端插入功率计 1 (PM-1) 中, 从而可同时监测耦合器两个输出臂的功率。然后打开 1310 nm 的激光二极管 (LD), 保持一定功率不变, 调节可调光衰减器 (VOA), 使 point 1 监测到的功率从 -30 dBm 逐渐增大至 24 dBm, 每隔 3 dBm 记录一次 PM-1 和 PM-2 的监测值。再将 BDF 的一端与 point 1 熔接, 另一端插入 PM-2 中。根据前面记录的检测值, 调节 VOA, 使 PM-1 与检测值保持一致, 从而确定输入 BDF 的功率, 同时记录 PM-2 的监测值, 计算得出掺铋光纤在 1310 nm 处的吸收系数随输入功率的变化。当输入功率足够高时, 吸收系数趋于饱和, 此时的吸收系数即为 UL, 小信号吸收与 UL 的差值就是 BACs 带来的有效吸收, 因此可以通过小信号吸收与 UL 的差值来判断光纤中 BACs 的含量高低, 差值越大表明 BACs 含量越高。为了实

现掺铋光纤的高增益性能, 我们希望掺铋光纤中 BACs 的含量足够高、UL 尽可能低。在这里测试了掺铋光纤在 1310 nm 处的 UL 并计算了其占小信号吸收的百分比, UL 测试系统结构如图 2 所示, 测试结果如图 3 所示。

从本文的掺铋光纤和 OFSR 的吸收谱 (图 1) 可以看到, 谱线在 1400 nm 处有一个高峰, 对应 BACs-Si 的吸收峰。本文掺铋光纤吸收峰的高度比 OFSR 高, 以 1310 nm 处的小信号吸收系数作对比, 本文掺铋光纤在 1310 nm 处的小信号吸收系数为 1.16 dB/m, 是 OFSR (0.3 dB/m) 的 3.87 倍。为了进一步确定小信号吸收中 BACs-Si 的有效吸收, 对 1310 nm 处的 UL 进行了测试, 仅为 0.19 dB/m, 占小信号吸收的 16.4% (图 3)。通过对 1310 nm 处的小信号吸收 (1.16 dB/m) 与 UL (0.19 dB/m) 进行作差, 可知 BACs-Si 的吸收系数达 0.97 dB/m。由于缺乏公开的数据, 尚不确定 OFSR 在 1310 nm 处的 UL 值, 但其 UL 一定大于 0, 故 BACs-Si 的吸收系数小于 0.3 dB/m, 远小于本文

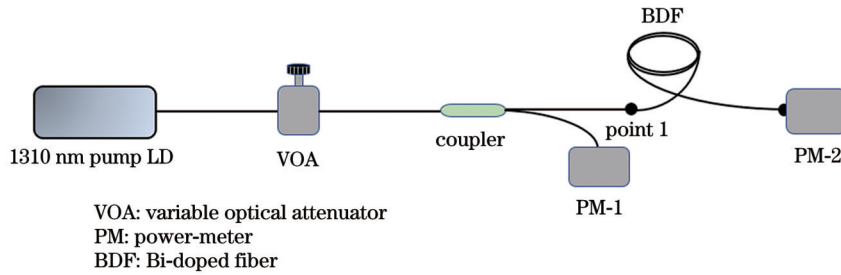


图 2 UL 测试系统结构示意图
Fig. 2 Structural diagram of UL test system

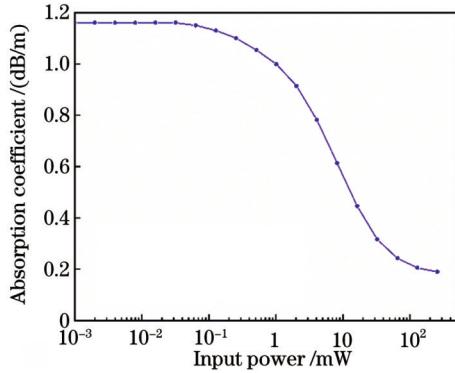


图 3 1310 nm 处的吸收与输入功率的关系
Fig. 3 Relationship between absorption at 1310 nm and input power

掺铋光纤中 BACs-Si 的吸收系数 (0.97 dB/m), 这充分说明了本文掺铋光纤相较于 OFSR 含有较高浓度

的 BACs-Si。

增益测试的系统结构如图 4 所示。在这里采用 10 通道点光源 (1330~1510 nm, 波长间隔为 20 nm) 的多波长合波作为输入信号源, 这是因为常用的可调谐激光器 (TSL) 只能实现单波长信号的放大性能测试, 而在实际通信系统中放大器主要面向的是多波长合波输入信号。由于不同波长增益竞争的影响, 多波长合波输入信号的增益测试结果较单波长输入信号小, 但采用多波长合波输入信号进行增益测试更能获得光纤的真实增益水平。值得注意的是, 本文旨在表征光纤在一个简单的光纤放大器中的增益性能, 因此没有讨论双向泵浦、双波长泵浦和其他复杂结构, 而是采用前向泵浦结构进行测试。测试主要参数如下: 采用 1310 nm 激光器作为泵浦源, 泵浦功率为 367 mW, 输入信号总功率为 -20 dBm。

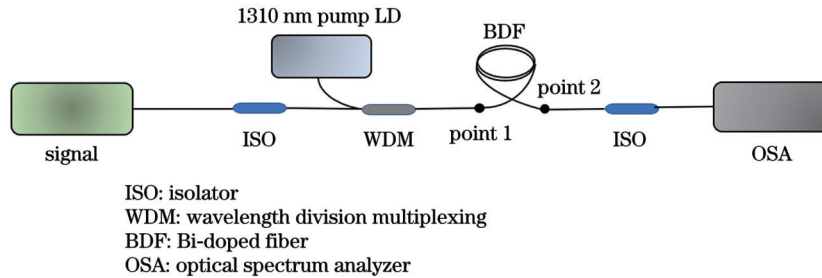


图 4 增益测试系统结构示意图
Fig. 4 Structural diagram of gain test system

3 实验结果与讨论

为了说明掺铋光纤的增益性能, 在 367 mW 的 1310 nm 泵浦光功率和 -20 dBm 的信号光功率条件下进行了增益性能测试。分别采用 70、65、60、55、50 m 长的掺铋光纤进行测试, 结果如图 5 所示。图 5 插图显示了掺铋光纤长度为 65 m 时的输入和输出光谱。从图 5 可以看出, 在 1410~1510 nm 范围内存在净增益, 这是由于在掺铋光纤中存在大量活性中心 BACs-Si。随着光纤长度的缩短, 1450 nm 附近的增益峰值逐渐增大, 随后缓慢减小。这是因为当光纤过长时, 被放大的短波信号会被重吸收而产生长波信号; 当光纤长度变短时, 短波信号的重吸收减弱, 从而短波信号得到增强, 长波信号略微减弱, 20 dB 增益带宽轻微增大。当

光纤长度优化至 50 m 时, 20 dB 增益带宽达到最大, 为 65 nm。具体 20 dB 增益范围如表 2 所示。

当光纤长度为 65 m 时, 1450 nm 处的增益达到最高, 为 33 dB。值得注意的是, 本文掺铋光纤的增益峰位于 1450 nm 附近, 而 OFSR 的增益峰位于 1430 nm (表 1)。原因如下: 一方面铋原子的电子结构为 $4f^{14}5d^{10}6s^26p^3$, 外部的 6s 和 6p 电子层处于未饱和状态, 这种电子结构使得铋原子易受周围晶体场的影响, 这也导致掺铋光纤的近红外发光性能极易受制备条件和玻璃成分的影响。而本文掺铋光纤中 Ge 的摩尔分数 (6.63%) 高于 OFSR, 这使得铋离子周围的局部晶体场环境发生细微变化, 近红外发光向长波方向移动^[6]。另一方面是受泵浦波长的影响, 本文泵浦波长为 1310 nm, 不同于 OFSR (1320 nm), 该差异也会导致

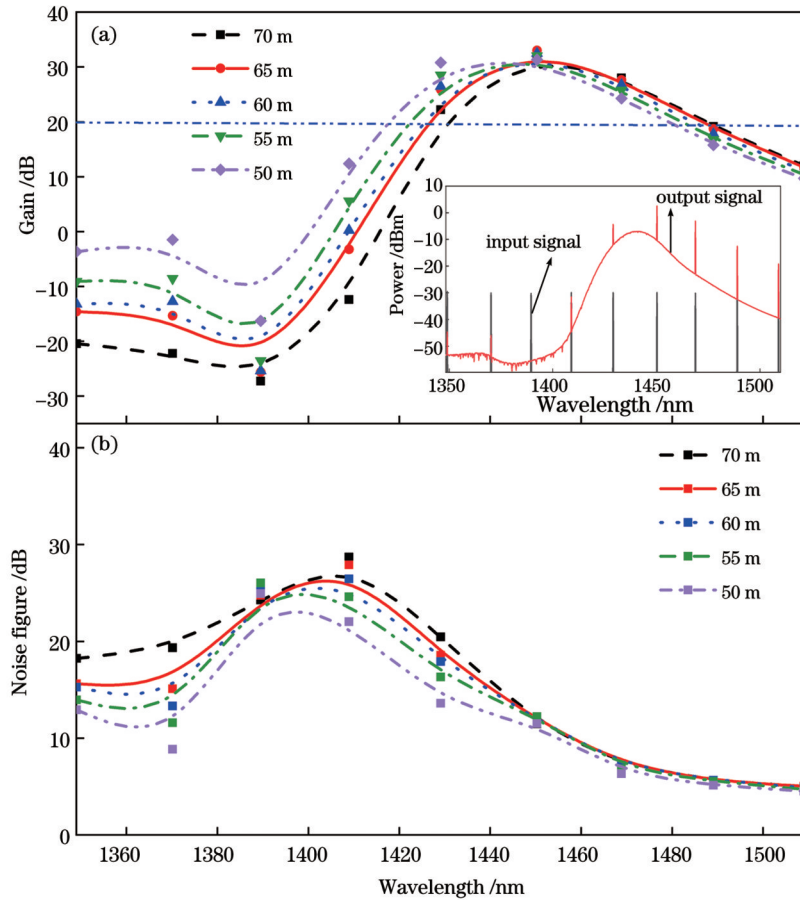


图 5 当泵浦功率为 367 mW,输入信号总功率为 -20 dBm 时,不同掺铋光纤长度下的增益和噪声谱。(a)增益,插图为光纤长度为 65 m 时的输入信号和输出信号;(b)噪声谱

Fig. 5 Gain values and noise spectra of bismuth-doped fibers with different lengths when pump power is 367 mW and signal power is -20 dBm. (a) Gain with input signal spectrum and output signal spectrum shown in inset when fiber length is 65 m; (b) noise spectra

表 2 不同长度掺铋光纤的 20 dB 增益范围和带宽

Table 2 20 dB gain ranges and bandwidths of bismuth-doped fibers with different lengths

Parameter	Fiber length of 50 m	Fiber length of 55 m	Fiber length of 60 m	Fiber length of 65 m	Fiber length of 70 m
20 dB gain range /nm	1414-1479	1419-1482	1419-1482	1423-1486	1427-1487
20 dB gain bandwidth /nm	65	63	63	63	60

本文掺铋光纤的发光谱向长波方向移动。此外,可以看到,在增益谱 1370~1410 nm 范围内,存在一个明显的增益凹陷,这是光纤中的 OH⁻ 吸收导致的。同时,此处噪声谱有明显的突起,一方面是 OH⁻ 吸收引起的,另一方面是由于短波比长波更快达到增益饱和,当光纤长度相同时短波 NF 比长波更高。可以看到,随着光纤长度缩短至 50 m,噪声明显减小,尤其是在短波处。

为了进一步说明掺铋光纤的增益性能,图 6 显示了当光纤长度为 65 m 时,不同泵浦功率下掺铋光纤在 1450 nm 处的增益变化和增益效率。可以看出,当输入信号功率为 -20 dBm 时,单位泵浦功率增益效率达 0.23 dB/mW。随着泵浦功率的提高,1450 nm 处增益

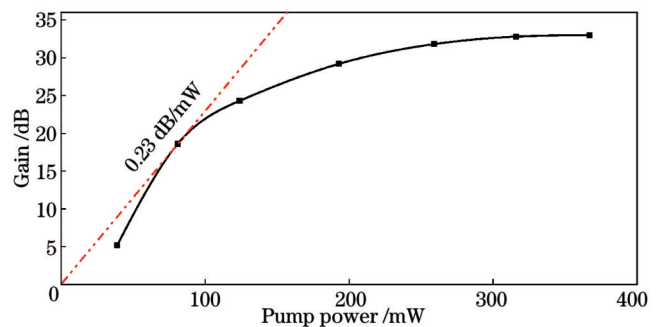


图 6 当输入信号总功率为 -20 dBm,光纤长度为 65 m 时,掺铋光纤在 1450 nm 处的增益与泵浦功率的关系

Fig. 6 Gain of bismuth-doped fiber at 1450 nm versus pump power when total input signal power is -20 dBm and fiber length is 65 m

的上升速度逐渐变慢,这是因为增益饱和使得增益效率随着泵浦功率的提高而逐渐降低,从 0.23 dB/mW 下降为 0.09 dB/mW,此时单位长度增益系数达 0.51 dB/m,这是锗硅酸盐掺铋光纤的记录指标。一般来说,提高光纤中的铋掺杂含量可提高 BACs 浓度,但也会导致 UL 的显著增大,这反而会损失光纤的单位泵浦功率增益效率、增益带宽和最大增益等放大性能。本文掺铋光纤既保证了各项放大性能处于较高水平(1450 nm 处的最大增益为 33 dB、20 dB 增益带宽为 63 nm,单位泵浦功率增益效率为 0.23 dB/mW),也显著缩短了光纤的使用长度,这主要得益于光纤高 BACs 浓度、低 UL 的特点。

4 结 论

基于 MCVD 法,结合溶液掺杂技术,制备了高吸收锗硅酸盐掺铋光纤,其具有高 BACs-Si 浓度、低 UL 的特点。在 1310 nm 处小信号吸收高达 1.16 dB/m,且 1310 nm 处的 UL 仅为 0.19 dB/m,占小信号吸收的 16.4%。在输入信号总功率为 -20 dBm、1310 nm 前向泵浦功率为 367 mW 的条件下,所制备的 50 m 长光纤可在 1414~1479 nm 范围内实现大于 20 dB 的增益;当光纤长度为 65 m 时,1450 nm 处的增益达到最大(33 dB),单位长度增益系数达 0.51 dB/m。相比于现有报道水平,光纤使用长度显著缩短。

参 考 文 献

- [1] Bufetov I A, Dianov E M. Bi-doped fiber lasers[J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(7): 487-504.
- [2] Fujimoto Y. Local structure of the infrared bismuth luminescent center in bismuth-doped silica glass[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, 93(2): 581-589.
- [3] Xiao G, Yan B B, Luo Y H, et al. Co-doping effect of lead or erbium upon the spectroscopic properties of bismuth doped optical fibres[J]. *Journal of Luminescence*, 2021, 230: 117726.
- [4] Dianov E M. Amplification in extended transmission bands using bismuth-doped optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(4): 681-688.
- [5] Riumkin K E, Melkumov M A, Bufetov I A, et al. Superfluorescent 1.44- μm bismuth-doped fiber source[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(23): 4817-4819.
- [6] Thipparapu N K, Wang Y, Wang S, et al. Bi-doped fiber amplifiers and lasers[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(6): 2446-2465.
- [7] Bufetov I A, Melkumov M A, Firstov S V, et al. Bi-doped optical fibers and fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 111-125.
- [8] Dianov E M. Bismuth-doped optical fibers: a challenging active medium for near-IR lasers and optical amplifiers[J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(5): e12.
- [9] Dianov E M. Bismuth-doped optical fibres: a new breakthrough in near-IR lasing media[J]. *Quantum Electronics*, 2012, 42(9): 754-761.
- [10] Bufetov I A, Firstov S V, Khopin V F, et al. Bi-doped fiber lasers and amplifiers for a spectral region of 1300 - 1470 nm[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(19): 2227-2229.
- [11] Dianov E M. Nature of Bi-related near IR active centers in glasses: state of the art and first reliable results[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(9): 095106.
- [12] Fujimoto Y. Local structure of the infrared bismuth luminescent center in bismuth-doped silica glass[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, 93(2): 581-589.
- [13] Firstov S V, Alyshev S V, Khopin V F, et al. Effect of heat treatment parameters on the optical properties of bismuth-doped GeO_2 : SiO_2 glass fibers[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(5): 2165.
- [14] Khagai A, Afanasiev F, Ososkov Y, et al. The influence of the MCVD process parameters on the optical properties of bismuth-doped phosphosilicate fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(21): 6114-6120.
- [15] 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.
- [16] Ososkov Y, Khagai A, Firstov S, et al. Pump-efficient flat-top O+E-bands bismuth-doped fiber amplifier with 116 nm -3 dB gain bandwidth[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 44138-44145.
- [17] Donodin A, Dvoyrin V, Manuylovich E, et al. Bismuth doped fibre amplifier operating in E- and S- optical bands[J]. *Optical Materials Express*, 2020, 11(1): 127-135.
- [18] Gumenyuk R, Melkumov M A, Khopin V F, et al. Effect of absorption recovery in bismuth-doped silica glass at 1450 nm on soliton grouping in fiber laser[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7044.
- [19] 廖雷. 掺铋光纤及其超宽带荧光光源[C]//第六届中国功能玻璃学术讨论会暨新型光电子材料国际论坛. 北京: 中国硅酸盐学会, 2012: 15.
- [20] Liao L. Bi-doped glass optical fibers and its ultrabroad fluorescent light source[C]//The 6th Symposium on Functional Glasses and International Forum on New Photoelectric Materials. Beijing: The Chinese Ceramic Society, 2012: 15.
- [20] 师婵娟, 褚应波, 李进延. 掺铋磷硅酸盐光纤超宽带荧光特性研究[C]//第二届全国光电材料与器件学术研讨会摘要集. 北京: 中国稀土学会, 2021: 223.
- [21] Shi C J, Chu Y B, Li J Y. Study on ultrawideband fluorescence characteristics of bismuth-doped phosphosilicate fiber[C]//The second National Symposium on Optoelectronic Materials and Devices. Beijing: The Chinese Society of Rare Earths, 2021: 223.
- [21] 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.
- [22] 郭梦婷, 田晋敏, 王璠, 等. 基于自研锗铋共掺石英光纤的 E+S 波段放大输出[J]. *中国激光*, 2023, 50(6): 0616002.
- [22] Guo M T, Tian J M, Wang F, et al. Amplification output in E+S band based on self-developed Ge-Bi co-doped Shi Ying fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(6): 0616002.

Research on High Absorption Germanosilicate Bi-Doped Fiber and Its Gain Performance

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

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

Abstract

Objective The advent of optical communication technology in the information age has significantly increased data traffic demand. However, the current fiber communication backbone, which employs wavelength-division multiplexing (WDM) and erbium-doped fiber amplifiers (EDFAs), utilizes only the C+L bands (1520–1620 nm) with a bandwidth of approximately 100 nm, resulting in a low efficiency of 20% in spectrum bandwidth resource utilization. To effectively use the O, E, S, and U bands other than C+L bands, communication networks must be equipped with optical fiber amplifiers to amplify the signals in the corresponding bands to compensate for transmission loss. However, to date, no fiber amplifier exists that can effectively satisfy the commercial requirements of these frequency bands. To further expand fiber amplifier gain bandwidth, germanosilicate bismuth-doped fibers have attracted attention owing to their unique luminescence characteristics, which are expected to address the commercial requirements of communication in E+S bands. However, because of the unknown formation mechanism and source of luminescent active centers (i.e., active bismuth ions) in germanosilicate bismuth-doped fibers, the mass fraction of effective active bismuth ions in the fibers is low ($<10^{-4}$). As a result, the lengths of fibers used in the E- and S-bands range from 150 m to 320 m, compared to the 5–10 m length of commercial EDFA fibers, making the application cost of germanosilicate bismuth-doped fibers and the miniaturization difficulty of manufacturing devices significantly higher. Therefore, it is necessary to study high-absorption germanosilicate bismuth-doped fibers to expand their transmission bandwidths and shorten their lengths.

Methods In this study, the modified chemical vapor deposition (MCVD) method combined with liquid-phase doping is used to fabricate germanosilicate bismuth-doped fibers. The small-signal absorption spectra of the germanosilicate bismuth-doped fibers are measured through the standard truncation method. The Bi and Ge doping concentrations are measured using an electron probe microanalyzer (EPMA). The unsaturated fiber loss is characterized using an unsaturable loss (UL) test system (Fig. 2). In addition, a multi-wavelength division multiplexing light source (1330–1510 nm, interval of 20 nm) is used as the signal, and a single-stage forward pump structure (Fig. 4) is constructed to test the bismuth-doped fiber gain performance (Fig. 5) and efficiency (Fig. 6). The input pump power (wavelength of 1310 nm) and total input signal power are 367 mW and -20 dBm, respectively.

Results and Discussions As shown in Fig. 2, the absorption peak height of the bismuth-doped fiber is higher than that of the optical fiber sold in Russia (OFSR). At a wavelength of 1310 nm, it is 1.16 dB/m, which is 3.87 times higher than that (0.3 dB/m) of the OFSR for small signals. The effective absorption of BACs-Si in small signal absorption is further determined by measuring the unsaturated absorption coefficient at 1310 nm, which is only 0.19 dB/m, accounting for 16.4% of small signal absorption (Fig. 3). The absorption attributed to the bismuth active centers (BACs-Si) is subsequently calculated by subtracting UL (0.19 dB/m) from the small signal absorption (1.16 dB/m) at 1310 nm, yielding a value of 0.97 dB/m. Figure 5 shows that the peak gain of the bismuth-doped fiber is 33 dB at a wavelength of 1450 nm when the fiber length is 65 m. As the fiber length decreases, the gain peak gradually increases at 1450 nm and subsequently slowly decreases. This is because in long fibers, amplified shortwave signals are reabsorbed, producing long-wave signals. However, as the fiber length decreases, the reabsorption of the shortwave signal weakens, resulting in a strengthened shortwave and slightly decreased long-wave signal. Consequently, the 20 dB gain bandwidth widens slightly as the fiber length decreases. The specific 20 dB gain range for fiber lengths of 70, 65, 60, 55, and 50 m are 60, 63, 63, 63, and 65 nm, respectively, as shown in Table 2. Figure 6 shows the gain and gain efficiency of the bismuth-doped fibers at a wavelength of 1450 nm for different pumping powers when the fiber length is 65 m. The gain efficiency ranges from 0.09 dB/mW to 0.23 dB/mW, and the gain coefficient per unit length reaches 0.51 dB/m.

Conclusions In this study, the preparation and characteristics of a high-absorption germanosilicate bismuth-doped fiber are described. The fiber has a high concentration of BACs-Si and low UL, with small signal absorption at 1310 nm of 1.16 dB/m and UL at 1310 nm of only 0.19 dB/m, accounting for 16.4% of small signal absorption. A high-absorption germanosilicate bismuth-doped fiber is prepared based on the MCVD method and solution doping technology. When the total input power is -20 dBm and the forward input pump power is 367 mW at 1310 nm, the 50 m long optical fiber achieves a gain of over 20 dB at 1414–1479 nm. The maximum gain of 33 dB is achieved at 1450 nm when the fiber length is 65 m, and the gain efficiency ranges from 0.09 dB/mW to 0.23 dB/mW at different pumping powers. At 65 m length, the gain reaches its maximum (33 dB) at 1450 nm, and the gain coefficient per unit length reaches 0.51 dB/m. Compared to existing reports, the fiber usage length is significantly reduced, and the gain level is further improved.

Key words fiber optics; germanosilicate bismuth-doped fiber; high absorption; E+S bands; amplification