

# 超宽带、高增益、低噪声 L-band 扩展掺铒光纤及其放大性能研究

褚应波<sup>1</sup>, 娄阳<sup>1</sup>, 陈阳<sup>1</sup>, 辜之木<sup>1</sup>, 邱强<sup>1</sup>, 刘长波<sup>2</sup>, 戴能利<sup>1</sup>, 李进延<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup>武汉长进激光技术有限公司, 湖北 武汉 430074

**摘要** 报道了一种采用改进化学气相沉积(Modified Chemical Vapor Deposition, MCVD)技术制备的 L-band 扩展掺铒光纤。实验测试了该掺铒光纤的基本光学参数及其宽带放大性能,其数值孔径为 0.2,在 980 nm 处的吸收系数为 11.04 dB/m,在 1535 nm 处的吸收系数为 38.8 dB/m,在 1200 nm 处的背景损耗为 15 dB/km。采用两级放大结构测试该掺铒光纤的 L-band 放大性能,其中第一级铒纤长度为 11 m,第二级铒纤长度为 25 m。当输入信号范围为 1570~1622 nm,输入信号的功率为-1 dBm 时,在 980 nm 半导体激光器泵浦下 20 dB 增益带宽长波段可扩展到 1622 nm,最大噪声指数为 5.3 dB,饱和输出功率为 24.5 dBm。

**关键词** 光纤光学; 掺铒光纤; L-band 扩展掺铒光纤; 宽带放大; MCVD

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0715001

## 1 引言

随着全球移动互联、超清视频、物联网(IoT)和云计算的不断发展以及移动通信网络的升级换代,数据通信需求呈现爆炸式增长<sup>[1-2]</sup>。现有密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)通信系统已经不能满足日益增长的数据传输需求,因此如何充分挖掘光纤通信系统潜在的传输容量已成为亟待解决的关键问题<sup>[3]</sup>。

随着信息容量的不断增加,传统 C 波段(C-band)和 L 波段(L-band)掺铒光纤放大器(EDFA)的增益带宽无法满足数据传输需求,已成为限制 DWDM 通信系统传输容量的瓶颈<sup>[4-7]</sup>。目前 C 波段基本实现了 48 nm 的宽带放大,但由于掺铒光纤的限制,L-band 只能实现 36 nm 的增益带宽。因此,扩展系统传输带宽最直接最有效的方法就是制备 L-band 扩展掺铒光纤,实现 L-band 的宽带放大输出<sup>[8]</sup>。限制 L-band 铒纤增益带宽的关键因素是激发态吸收(Excited State Absorption,

ESA)<sup>[9]</sup>,近年来研究人员基于不同的基质材料研究了 L-band 扩展掺铒光纤。2000 年,日本 NTT 公司报道了一种基于碲酸盐玻璃的 L-band 掺铒光纤,实现了 1581~1616 nm 的宽带放大,最大噪声指数为 6 dB,输出功率为 20.5 dBm<sup>[10]</sup>。2002 年,日本 Asahi 玻璃公司基于铋基玻璃制备了掺铒光纤,将 L-band 带宽扩展到 1620 nm。但由于铋基掺铒光纤与通信光纤的兼容性差,因此熔接损耗大,增益不高<sup>[11]</sup>。2008 年,日本 NTT 公司报道了一种基于硅酸盐玻璃的 L-band 扩展放大方案,实现了 1562.2~1619.6 nm 的宽带放大,噪声指数为 6.1 dB<sup>[12]</sup>。2020 年,加拿大拉瓦尔大学报道了一种用 C-band 泵浦的 L-band 扩展掺铒光纤方案,20 dB 增益带宽长波段可扩展到 1620 nm,噪声指数为 5.7 dB<sup>[13]</sup>。该方案采用 C-band 可调谐激光器作为泵浦源,提升了泵浦效率,降低了噪声。

本文采用改进的化学气相沉积(Modified Chemical Vapor Deposition, MCVD)技术,并结合离子共掺技术在光谱调控方面的优势,制备了 L-

收稿日期: 2020-12-08; 修回日期: 2020-12-28; 录用日期: 2021-01-27

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(61805093)

\*E-mail: ljy@hust.edu.cn

band 扩展掺铒光纤。对该光纤的基本光学参数进行了测试和分析。搭建一级及两级放大结构,测试了其在 L-band 的宽带放大性能。

## 2 研究方案

图 1 为铒离子的能级图。由于铒离子  $^4I_{13/2}$  能级的荧光寿命为 10 ms 左右,该能级除了向下跃迁到  $^4I_{15/2}$  能级产生 1550 nm 放大自发辐射 (Amplified spontaneous emission, ASE) 外,很容易吸收 L-band 的信号光并向更高能级  $^4I_{9/2}$  跃迁,形成 ESA。虽然吸收峰值在 1680 nm 附近,由于该跃迁光谱的宽度很宽,其尾部严重影响到 L-band (波长大于 1600 nm 的波段) 的发光<sup>[14-15]</sup>。因此,要实现 L-band 的扩展,必须抑制铒离子  $^4I_{13/2}$  到  $^4I_{9/2}$  的激发态吸收<sup>[16]</sup>。本文采用 MCVD 工艺并结合液相掺杂技术,通过 P/Al 共掺抑制  $Er^{3+}$  的激发态吸收,从而扩展铒离子在 L-band 的增益带宽。同时,通过调控 P 和 Al 的掺杂量和掺杂比例来扩展 L-band 的增益带宽并提升  $Er^{3+}$  的掺杂浓度,最终  $Er_2O_3$  的掺杂浓度(质量分数,全文同)达到 0.25%。

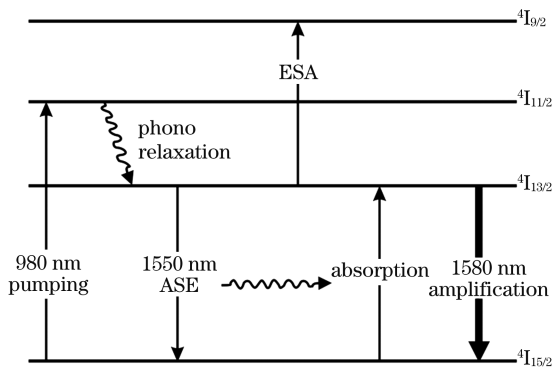


图 1 铒离子的能级图

Fig. 1 Energy level diagram of  $Er^{3+}$

## 3 实验测试结果及分析

本文研制的掺铒光纤的结构参数如下:光纤的数值孔径为 0.2,纤芯直径为 5.4  $\mu m$ ,包层直径为 125  $\mu m$ ,在 980 nm 的吸收系数为 11.04 dB/m,在 1535 nm 的吸收系数为 38.8 dB/m,在 1200 nm 处的背景损耗为 15 dB/m。图 2 为研制的 L-band 扩展铒纤的吸收截面和发射截面测试曲线,其中发射截面和吸收截面的差值表征了光纤在 L-band 的增益性能。从图 2 中可以看出,当波长大于 1622 nm 时,发射截面和吸收截面的差值未出现明显下降,说明该掺铒光纤的 ESA 得到了很好的抑制,其在 L-band 具有很强的增益能力。另外,该掺铒光纤的主要成分为  $SiO_2$ ,与常规通信光纤的兼容性好,熔接损耗低至 0.06 dB。

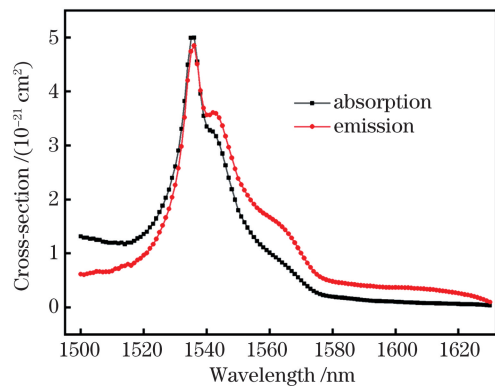


图 2 掺铒光纤的吸收截面和发射截面

Fig. 2 Absorption and emission cross-sections of erbium-doped fiber

为了验证掺铒光纤在 L-band 的放大性能,首先搭建了一级放大系统,如图 3(a)所示。放大系统的信号由一个 L-band 的 ASE 光源和一个光交叉波分复用器 (ITL) 产生,输入功率为 -1 dBm;隔离器

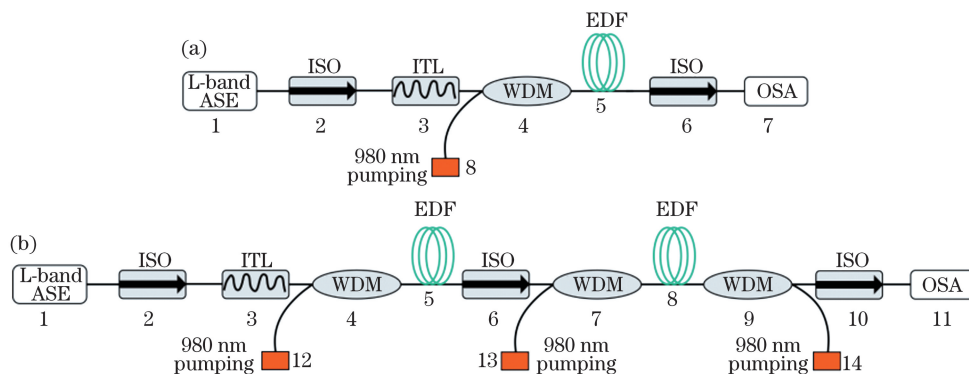


图 3 掺铒光纤放大器的结构图。(a)一级放大系统;(b)二级放大系统

Fig. 3 Structural diagrams of EDFA. (a) One-stage amplification system; (b) two-stage amplification system

(ISO)主要是为了防止后向 ASE 对噪声的影响<sup>[17]</sup>。泵浦源主要采用 980 nm 半导体激光器,泵浦功率为 600 mW,激光通过波分复用器(WDM)耦合进掺铒光纤(EDF)。输出结果由光谱分析仪(OSA)分析,单级增益和噪声指数(NF)如图 4 所示,最大噪声指数为 5.1 dB,1622 nm 处的增益为 8.4 dB。

为了取得更好的噪声和增益特性,搭建了二级放大系统,如图 3(b)所示。第一级采用 980 nm 半导体激光器进行前向泵浦,第二级采用 980 nm 半导体激光器进行双向泵浦。利用一级和二级之间的串联光隔离器,阻挡二级掺铒光纤产生的反向 ASE 进入一级掺铒光纤,使一级掺铒光纤处于高反转的低噪声放大状态,二级掺铒光纤处于低反转的高功率放大状态,从而同时实现低噪声和高功率的放大。另外,一级产生的 C-band ASE 作为二次泵浦源,可提升第二级掺铒光纤在 L-band 的抽运效率。

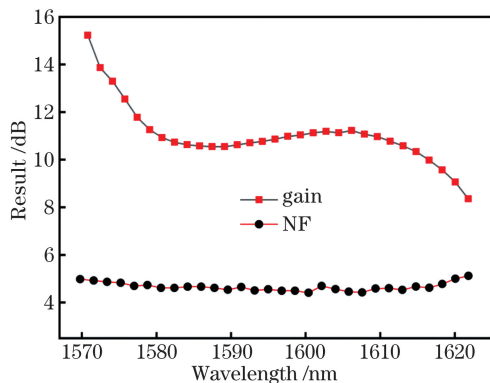


图 4 单级 EDFA 的增益和噪声指数随波长的变化

Fig. 4 Gain and NF of one-stage EDFA versus wavelength

图 5 所示为掺铒光纤的增益和噪声指数。信号范围为 1570~1622 nm,总输入功率为 -1.0 dBm。第一级前向 980 nm 泵浦功率为 450 mW,第二级前向 980 nm 泵浦功率为 450 mW,第二级后向泵浦功

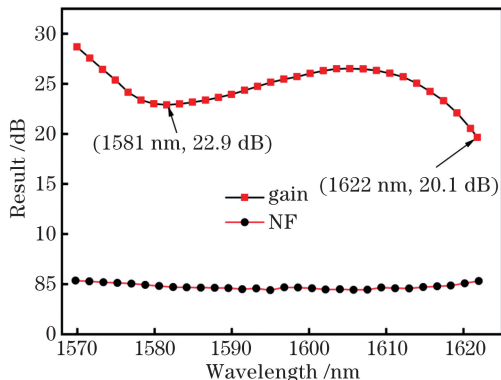


图 5 掺铒光纤的增益和噪声指数随波长的变化

Fig. 5 Gain and NF of erbium-doped fiber versus wavelength

率为 650 mW。通过优化,该掺铒光纤的一级长度为 11 m,第二级长度为 25 m 时增益达到最大。如图 5 所示,两级放大增益达到 20 dB 的最大波长达到 1622 nm,噪声指数最大值为 5.3 dB,饱和输出功率为 24.5 dBm。

## 4 结 论

报道了一种基于 MCVD 技术制备的 L-band 扩展高掺铒光纤。光纤的尺寸为  $5.4 \mu\text{m} / 125 \mu\text{m}$ ,掺铒光纤的数值孔径为 0.2。光纤在 980 nm 处的吸收系数为 11.04 dB/m,在 1535 nm 处的吸收系数为 38.8 dB/m,在 1200 nm 处的背景损耗为 15 dB/km。基于两级放大系统,当输入信号的功率为 -1 dBm 时,在 980 nm 泵浦下实现了 1570~1622 nm 范围内的 20 dB 放大输出,最大噪声指数为 5.3 dB,饱和输出功率达到 24.5 dBm。测试结果显示,该掺铒光纤有望应用于 L-band 扩展掺铒光纤放大器中,为进一步扩展传输带宽、提升传输容量打下坚实基础,具有重要的科学意义和应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Winzer P J, Neilson D T, Chraplyvy A R. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years [J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 24190-24239.
- [2] Lü X D, Liang X R, Yu Q C, et al. Research status and development trend of optical communication technology [J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(2): 70-78.  
吕向东, 梁雪瑞, 喻千尘, 等. 光通信技术研究现状及发展趋势 [J]. *电信科学*, 2019, 35(2): 70-78.
- [3] Aisawa S, Sakamoto T, Fukui M, et al. Ultra-wideband, long distance WDM demonstration of 1 Tbit/s ( $50 \times 20$  Gbit/s), 600 km transmission using 1550 and 1580 nm wavelength bands [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(11): 1127-1129.
- [4] Massicott J F, Armitage J R, Wyatt R, et al. High gain, broadband,  $1.6 \mu\text{m}$   $\text{Er}^{3+}$  doped silica fibre amplifier [J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(20): 1645-1646.
- [5] Karasek M. Gain enhancement in gain-shifted erbium-doped fiber amplifiers for WDM applications [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(9): 1111-1113.
- [6] Sun Y, Sulhoff J W, Srivastava A K, et al. A gain-flattened ultra wide band EDFA for high capacity WDM optical communications systems [C] // 24th European Conference on Optical Communication,

- September 20-24, 1998, Madrid, Spain. New York: IEEE, 1998: 53-54.
- [7] Ono H, Yamada M, Kanamori T, et al. 1.58  $\mu\text{m}$  band gain-flattened erbium-doped fiber amplifiers for WDM transmission systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(3): 490-496.
- [8] Kakui M, Ishikawa S. Long-wavelength-band optical amplifiers employing silica-based erbium doped fibers designed for wavelength division multiplexing systems and networks [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2000, 83(6): 799-815.
- [9] Bolshtyansky M, Mandelbaum I, Pan F. Signal excited-state absorption in the L-band EDFA: simulation and measurements [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(9): 2796-2799.
- [10] Mori A, Sakamoto T, Shikano K, et al. Gain flattened  $\text{Er}^{3+}$ -doped tellurite fibre amplifier for WDM signals in the 1581-1616 nm wavelength region [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(7): 621-622.
- [11] Sugimoto N, Ochiai K, Ohara S, et al. Highly efficient and short length Lanthanum co-doped  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -based EDF for extended L-band amplification [C] // *Optical Amplifiers and Their Applications*, July 14-17, 2002, Vancouver, Canada. Washington, D. C.: OSA, 2002: PD5.
- [12] Masuda H, Miyamoto Y. Low-noise extended L-band phosphorus co-doped silicate EDFA consisting of novel two-stage gain-flattened gain blocks [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(18): 1082-1083.
- [13] Lei C M, Feng H L, Messaddeq Y, et al. Investigation of C-band pumping for extended L-band EDFAs [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37(8): 2345-2352.
- [14] Zhang Y B, Peng J D, Liu X M. L-band erbium doped fiber amplifier with intrinsic gain flattening bandwidth of  $> 33 \text{ nm}$  [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(11): 987-990.  
张岩滨, 彭江得, 刘小明. 本征平坦增益带宽  $> 33 \text{ nm}$  的高增益、低噪声 L-波段铒光纤放大器 [J]. *中国激光*, 2002, 29(11): 987-990.
- [15] Zhang Y B, Peng J D, Liu X M, et al. Characteristics of L-band erbium doped fiber amplifier gain spectra [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(11): 1013-1016.  
张岩滨, 彭江得, 刘小明, 等. L-波段掺铒光纤放大器增益谱特性研究 [J]. *中国激光*, 2001, 28(11): 1013-1016.
- [16] Ren X G, Xu G P, Dong T L. Effect of ESA in erbium: doped fiber amplifier [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1992, 9(4): 394-396.  
任新根, 徐国萍, 董天临. 激发态吸收(ESA)对掺铒光纤放大器的影响 [J]. *量子电子学*, 1992, 9(4): 394-396.
- [17] Song M M, Feng S J, Mao Q H. Influences of pump schemes on gain properties of L-band double-pass erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 681-685.  
宋梅梅, 冯素娟, 毛庆和. 抽运方案对 L 波段双通掺铒光纤放大器增益特性的影响 [J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 681-685.

## Ultra-Broadband, High Gain, and Low Noise Extended L-Band Erbium-Doped Fiber and Its Amplification Performance

Chu Yingbo<sup>1</sup>, Lou Yang<sup>1</sup>, Chen Yang<sup>1</sup>, Gu Zhimu<sup>1</sup>, Qiu Qiang<sup>1</sup>, Liu Changbo<sup>2</sup>,  
Dai Nengli<sup>1</sup>, Li Jinyan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>2</sup> Wuhan Changjin Laser Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China

### Abstract

**Objective** With the rapid development of 5G communications, global cloud computing, ultrahigh-definition videos, and internet of things, the demand for data communications has increased exponentially. Moreover, the traditional communication systems are unable to meet the current data transmission requirements. The communication capacity of a single channel is close to Shannon's limit and is challenging to increase. Therefore, expanding the transmission bandwidth, particularly for the L-band, is currently an effective solution based on the existing transmission systems.

**Methods** A modified chemical vapor deposition (MCVD) technology was used to fabricate the extended L-band erbium-doped fibers. To extend the L-band gain bandwidth, P/Al was introduced into the fiber core to suppress the

excited state absorption (ESA) of  $\text{Er}^{3+}$ . In addition, the optical parameters of the fibers were measured and analyzed, and the L-band amplification performance was investigated based on the two-stage amplification structure.

**Results and Discussions** The erbium-doped fiber has the core and cladding diameters of 5.4  $\mu\text{m}$  and 125  $\mu\text{m}$ , respectively. The fiber's numerical aperture is approximately 0.2, the absorption coefficients at 980 nm and 1535 nm are 11.04 dB/m and 38.8 dB/m, respectively, and the background loss at 1200 nm is 15 dB/km. Figure 2 shows the absorption and emission cross-sections of the extended L-band erbium-doped fiber. The difference between emission and absorption in the L-band region reflects the gain capability of the fiber in the L-band. Ostensibly, when the wavelength is longer than 1622 nm, the difference between emission and absorption is negligible, indicating that the ESA of the erbium-doped fiber is well suppressed and it has a strong gain ability in the extended L-band region. Based on the two-stage amplification structure in Fig. 3, the input signal power is -1 dBm, the 20 dB gain output is extended to 1622 nm, the maximum noise figure is 5.3 dB, and the saturated output power is 24.5 dBm.

**Conclusions** We demonstrated an extended L-band erbium-doped fiber fabricated via the MCVD technology. Based on the two-stage amplification structure for the first and second stages with lengths of 11 m and 25 m, respectively, the long-wavelength of the 20 dB gain output was extended to 1622 nm under a 980 nm excitation. The maximum noise figure was 5.3 dB, and the saturated output power was 24.5 dBm.

**Key words** fiber optics; erbium-doped fiber; extended L-band  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber; wideband amplification; MCVD

**OCIS codes** 060.2290; 060.2280; 060.2320; 060.2330