

基于多模激光抽运的 1.70 μm 波段拉曼增益谱 实验研究

都权力^{1,2}, 张鹏^{1,2}, 吴迪², 贾青松²

¹长春理工大学空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 1.70 μm 波段光源在生物医疗、红外光源产生等方面具有巨大的应用前景, 1.70 μm 波段增益谱研究是近年来的热点。为避免受激布里渊散射, 采用自制多模光纤激光器作为拉曼抽运源, 经 1550 nm/1650 nm 波分复用器抽运高非线性光纤和色散位移光纤产生拉曼增益谱。首先分析了多模激光抽运产生增益谱的原理, 然后通过实验分析不同功率下各种长度高非线性光纤、色散位移光纤组合产生的前向谱和后向谱。实验结果表明, 1 km 长高非线性光纤和 6 km 长色散位移光纤的组合可得到输出功率最大、峰值波长接近 1700 nm 的后向增益谱, 这为实现 1.70 μm 波段连续激光器和超快激光器提供了技术参考。

关键词 激光器; 1.70 μm 波段; 增益谱; 多模激光; 受激拉曼散射; 受激布里渊散射

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.121405

Raman Gain Spectrum in 1.70 μm Band Pumped by Multimode Laser

Du Quanli^{1,2}, Zhang Peng^{1,2}, Wu Di², Jia Qingsong²

¹National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology,
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²College of Optoelectronics Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract 1.70 μm band laser sources have larger applications in many fields, such as biomedical medicine, infrared light generation and so on; the gain spectrum in 1.70 μm band is an international hotspot. A home-made multimode fiber laser is applied as the Raman pump in order to avoid stimulated Brillouin scattering. The pumped signal is injected into the high nonlinear fiber (HNLF) and dispersion shifted fiber (DSF) through 1550 nm/1650 nm wavelength division multiplex (WDM). Firstly, the principle of generating gain spectrum using the multimode laser is analyzed. Then, the forward and backward spectra are analyzed, these spectra are produced by HNLF and DSF with different lengths under the condition of different powers. The results show that, 1 km long HNLF and 6 km long DSF can be used to obtain the best backward gain spectrum with maximum power and peak wavelength of near 1700 nm. The experimental results provide technical reference for 1.70 μm band continuous wave lasers and ultrafast lasers.

Key words lasers; 1.70 μm band; gain spectrum; multimode laser; stimulated Raman scattering; stimulated Brillouin scattering

OCIS codes 140.3550; 140.3460; 140.3510

收稿日期: 2017-06-19; **收到修改稿日期:** 2017-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(91438204, 61705019)、吉林省青年人才托举工程(2017-2018)、吉林省科技厅项目(20150623024TC-07, 20150101044JC, 20160204012GX, 20170414041GH)、吉林省优秀青年人才基金(20170520161JH)

作者简介: 都权力(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器技术方面的研究。E-mail: 1812427274@qq.com

导师简介: 张鹏(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光通信及光纤激光器等方面的研究。

E-mail: zhangpeng@cust.edu.cn(通信联系人)

1 引言

1.70 μm 波段处于 1.45 μm 和 1.90 μm 两个水吸收峰间的波谷,同时处于脂肪和胶原的高吸收峰。由于生物组织中含有大量水分子,基于 1.70 μm 波段光源的探测成像仪器吸收损耗低,成像深度大,因此 1.70 μm 波段光源在光学相干层析成像(OCT)、多光子荧光显微成像(MFLM)、激光手术等领域具有重要应用^[1-3]。此外,由于 1.70 μm 波段覆盖了某些聚合分子的共振波段(1720 nm),可以被用于激光加工和激光成型^[4-6]。1.70 μm 波段高功率激光器也可用作 4 μm 波段抽运源,产生中红外激光输出^[7-8]。另外,为解决现有通信波段日趋饱和的问题,需要探索新的技术手段来满足日益增加的通信容量,更长波段(如 1.70 μm 波段)的推进就成为了必要^[9-10]。因此,1.70 μm 波段(1650~1750 nm)的激光光源受到了广泛关注,国内外已有大量学者对其进行了研究^[11]。

目前,国内外 1.70 μm 波段光纤光源的研究刚起步,产生 1.70 μm 波段增益谱的方法主要包括以下几类:1) 首先通过抽运掺铊光纤产生宽范围增益谱(1650~2100 nm),再通过光子晶体光纤等对增益谱滤波,从而产生 1.70 μm 波段的增益谱^[10,12-14];2) 基于非线性效应的方法产生增益谱,例如通过超快激光或连续光源注入非线性光纤产生连续谱^[15-17]。近些年,国外相关研究部门针对 1.70 μm 波段光源的需求设计了特殊离子掺杂光纤(如铊铯共掺光纤^[18]、铊铯共掺光纤^[10]和掺铋光纤^[19]),通过抽运可直接得到 1.70 μm 波段增益谱。

由上述分析可知,基于拉曼等非线性效应产生 1.70 μm 波段增益谱的方法比较传统,而且简单;该方法多采用长光纤来增加拉曼增益和降低拉曼阈值,但长光纤同时也降低了受激布里渊阈值。相同长度光纤的受激布里渊阈值远远小于拉曼阈值。因此,如何在降低拉曼阈值的同时避免产生受激布里渊散射(SBS)是拉曼增益谱研究的难点之一。

本课题组以自制多模激光掺铊光纤(EDF)激光器作为抽运源,该抽运源在产生拉曼增益的同时提高了 SBS 阈值,有效地避免了 SBS。首先分析多模激光抽运抑制布里渊散射的原理,再通过实验分析不同功率下各种长度高非线性光纤(HNLF)、色散位移光纤(DSF)组合产生的前向谱和后向谱,最后得到最优化的增益谱。

2 实验结构及原理

2.1 实验结构

抽运光源为自制的掺铊光纤激光器,掺铊光纤激光器结构如图 1 所示。掺铊光纤激光器由最大调谐功率为 200 mW 的 980 nm 抽运源、980 nm/1550 nm 波分复用器(WDM)、5 m 长掺铊光纤、三端口光纤环形器、反射率为 97% 的 1550 nm 波段反射式光纤布拉格光栅(FBG)和 3 dB 光纤耦合器组成。该激光器能输出稳定的连续多模激光,输出激光的中心波长 λ_c 为 1549.52 nm,3 dB 线宽 $\Delta\lambda$ 为 0.05 nm,其光谱如图 2 所示。

增益谱实验结构如图 3 所示,多模激光经过掺铊光纤放大器(EDFA)进行功率放大后由 1550 nm/1650 nm WDM 将抽运光注入 HNLF 中。1550 nm 高功率隔离器用来防止反向增益光对放大器和抽运源的损坏。HNLF 在 1550 nm 处的模场直径为 3.96 μm ,衰减为 1.06 dB·km⁻¹。HNLF 的另一端作为输出端,接入光谱分析仪(AQ6375 型)中测量其前向增益谱,WDM 的另一端也作为输出端,接入光谱分析仪中测量其后向增益谱。

2.2 基本原理

由于掺杂光纤的增益谱波长范围有限,受激拉曼散射(SRS)常用于产生新波段光源。石英光纤的拉曼增益范围为 40 THz,峰值波长为 13 THz,若采用 193 THz(1549 nm)光源抽运产生拉曼效应,则峰值波长约为 180 THz(1666 nm)^[20]。因此,SRS 效应可用于 1.70 μm 波段(1650~1750 nm)的增益谱实验。

SRS 前向阈值可表示为^[20-21]

$$\frac{g_R P_0^{\text{cr}} L_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}} \approx 16, \quad (1)$$

式中 $g_R \approx 1 \times 10^{-13} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$ 为拉曼增益系数; P_0^{cr} 为阈值抽运功率; $A_{\text{eff}} \approx 11.7 \mu\text{m}^2$ 为光纤的有效纤芯面积;

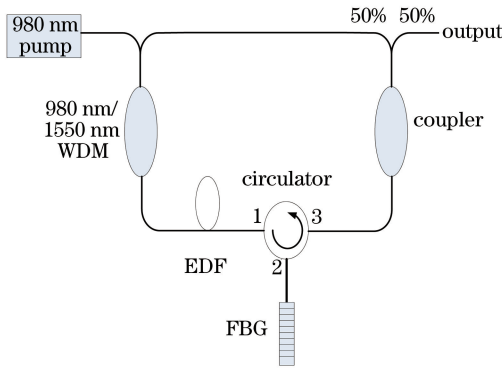


图 1 掺铒光纤激光器结构

Fig. 1 Structure of erbium doped fiber laser

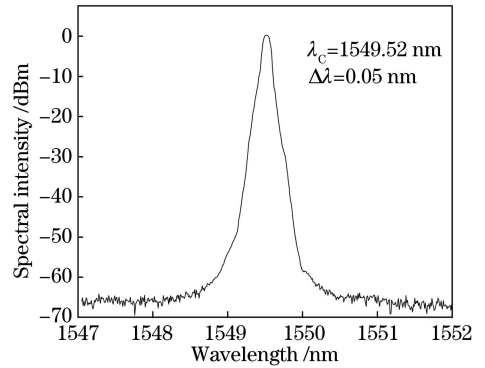


图 2 自制掺铒光纤激光器输出多模激光光谱

Fig. 2 Output spectrum of home-made erbium doped multimode fiber laser

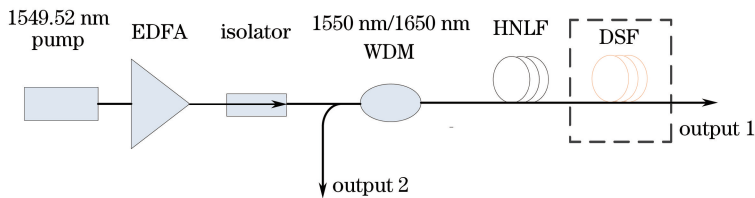


图 3 1.70 μm 波段增益谱实验结构

Fig. 3 Experimental structure of 1.70 μm band gain spectrum

$L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha$ 为有效光纤长度, $\alpha = 0.93 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 为光纤损耗系数, L 为光纤总长度, 16 为 SRS 前向数值因子。当计算 SRS 后向阈值时将数值因子改成 20 即可, 即 SRS 后向阈值可表示为^[20]

$$\frac{g_R P_0^{cr} L_{eff}}{A_{eff}} \approx 20. \tag{2}$$

SBS 与后向 SRS 之间存在竞争, 这种竞争取决于抽运激光脉宽是否大于声子寿命, 而声子寿命通常小于 10 ns^[22-24]。在不考虑抽运线宽的情况下, SBS 阈值远小于 SRS 阈值^[22]。

SBS 阈值可表示为^[20]

$$\frac{g_B P_{cr} L_{eff}}{A_{eff}} \approx 21, \tag{3}$$

式中 $g_B \approx 3 \times 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$ 为布里渊增益系数, P_{cr} 为阈值抽运功率。根据(2)式与(3)式可计算得到不同光纤长度下 SBS 阈值与后向 SRS 阈值, 如图 4 所示。

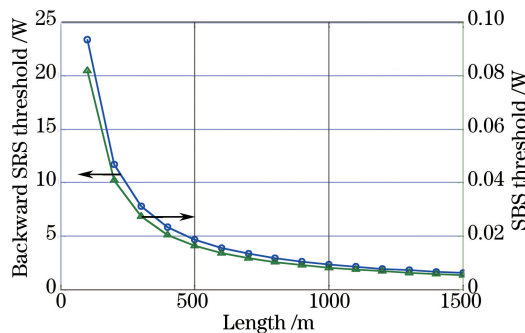


图 4 不同长度 HNLF 的后向 SRS 阈值和 SBS 阈值

Fig. 4 Thresholds of backward SRS and SBS for HNLF with different lengths

如图 4 所示, 在不考虑抽运线宽的情况下, 相同长度增益介质 HNLF 下的 SBS 阈值低于 SRS 阈值约 2 个量级。如果考虑抽运线宽, SBS 阈值功率 P_{th} 可表示为^[25-27]

$$P_{th} = 21 \frac{A_{eff} K}{g_B L_{eff}} \left(1 + \frac{\Delta\nu_P}{\Delta\nu_B} \right), \quad (4)$$

式中 K 为偏振因子, $1 \leq K \leq 2$ (在保偏光纤中, 若抽运光和斯托克斯光沿相同方向偏振, 则 $K = 1$; 在常规单模光纤中, 若抽运光和斯托克斯光之间的相对偏振角随机变化, 则 $K = 2$); $\Delta\nu_P$ 为入射光线宽; $\Delta\nu_B$ 为受激布里渊线宽。拟采用多模激光作为抽运光, 入射光线宽 $\Delta\nu_P$ 为 0.05 nm (6.247 GHz), 该值远大于受激布里渊带宽 $\Delta\nu_B$ 。假定增益光纤 HNLF 的长度为 1 km, 受激布里渊线宽 $\Delta\nu_B = 10$ MHz。在考虑抽运线宽的情况下, 布里渊增益以因子 $1 + \Delta\nu_P/\Delta\nu_B$ 减小, SBS 阈值以同样的因子增大, 由(4)式可计算得到 SBS 阈值为 5 W。而根据(2)式计算得到的 SRS 阈值为 2.32 W。由此可知, 采用多模激光作为抽运光可极大地提高 SBS 阈值, 从而在保证产生 SRS 的同时抑制了 SBS。

3 实验结果与讨论

实验结构如图 3 所示 (不含 DSF), 多模激光通过 EDFA 放大后经由 WDM 注入到 HNLF 中产生拉曼效应。其中 HNLF 为 500 m, HNLF 后端接入光谱分析仪测量前向增益谱, 其前向谱如图 5(a) 所示。当 EDFA 输出功率调节为 31~33 dBm 时, 峰值波长为 1668 nm 的前向拉曼增益不明显, 且有大量抽运光通过, 通过(1)式计算得到前向 SRS 阈值约为 3.74 W, 在 EDFA 最大放大功率和其他器件工作阈值限制下没有达到阈值功率, 所以拉曼增益不明显。在 WDM 另一端测量得到的后向增益谱如图 5(b) 所示, 残余抽运光被 WDM 隔离, 光谱范围为 1590~1680 nm。当 EDFA 输出功率调节为 31~33 dBm 时, 峰值波长为 1668 nm 的后向拉曼增益功率不断增加, 通过(2)式计算得到后向 SRS 阈值约为 4.68 W, 同样没有达到 SRS 阈值的要求。由图 5 可知拉曼增益效果不理想, 这是由于器件连接中存在一定的损耗, 而且 500 m 长的 HNLF 提供的非线性效应不足, 在 EDFA 最大放大功率和器件工作最大功率阈值的限制下, 要想提高非线性效应, 只能通过增加 HNLF 的长度或借助其他可提供非线性效应的介质来实现。

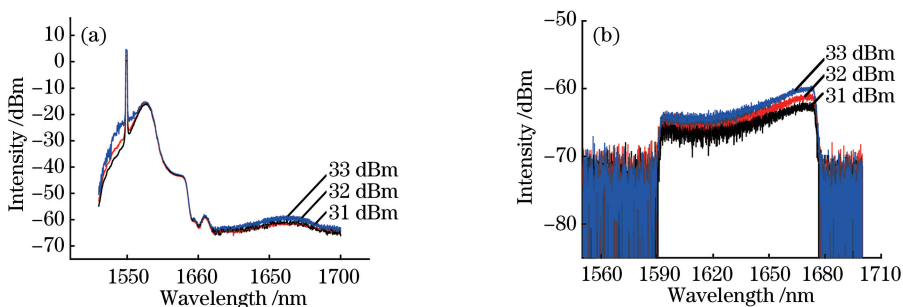


图 5 500 m 长 HNLF 的拉曼增益谱。(a) 前向谱; (b) 后向谱

Fig. 5 Raman gain spectra for 500 m long HNLF. (a) Forward spectra; (b) backward spectra

在上述实验结构的基础上, 增益介质改变为 1 km 长的 HNLF。光谱分析仪测量得到的前向和后向拉曼增益谱如图 6(a) 和图 6(b) 所示。对比 500 m 长 HNLF 的实验结果可知, 当 EDFA 输出功率调节为 29~33 dBm 时, 1 km 长 HNLF 实验所得的前向和后向增益谱效果更加明显, 峰值波长为 1668 nm 处的前向和后向拉曼增益峰值功率有所增加, 并且谱形有所改善。实验得到的前向 SRS 阈值约为 32 dBm, 与(1)式的计算值 (1.87 W) 相符; 实验得到的后向 SRS 阈值约为 33 dBm, 与(2)式计算值 (2.34 W) 相符。

1 km 长 HNLF 拉曼增益得到的结果虽然有所改善, 但仍有待提高, 需要继续优化。考虑到不同光纤组合可能得到更好的结果^[28], 在 1 km 长 HNLF 后分别接入 3 km 长 DSF 和 6 km 长 DSF, 再用光谱分析仪测量得到前向和后向增益谱, 结果如图 7 和图 8 所示。

DSF 能够提供非线性效应, 并能减小 SRS 阈值。随着 EDFA 调节功率从 29 dBm 调节到 33 dBm, 拉曼增益不断增强, 增益谱效果明显优于图 6。在接入 6 km 长 DSF 后, 拉曼增益效果显著, 尤其在 EDFA 输出功率固定在 33 dBm 时, 拉曼增益效果最为明显, 且谱形得到显著优化, 中心波长为 1668 nm, 前向拉曼增益峰值功率约为 -27 dBm, 后向拉曼增益峰值功率约为 -24 dBm, 如图 9 所示。

图 9 所示增益谱的光谱范围为 1620~1680 nm, 产生的增益谱不平滑, 出现了不稳定的激光振荡现象。

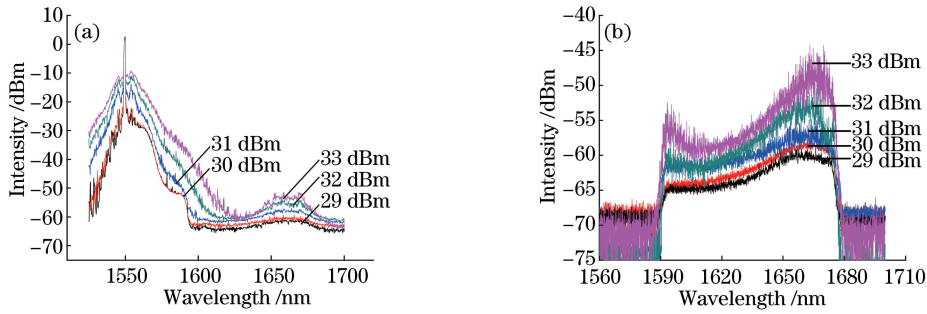


图 6 1 km 长 HNLF 的拉曼增益谱。(a)前向谱;(b)后向谱

Fig. 6 Raman gain spectra for 1 km long HNLF. (a) Forward spectra; (b) backward spectra

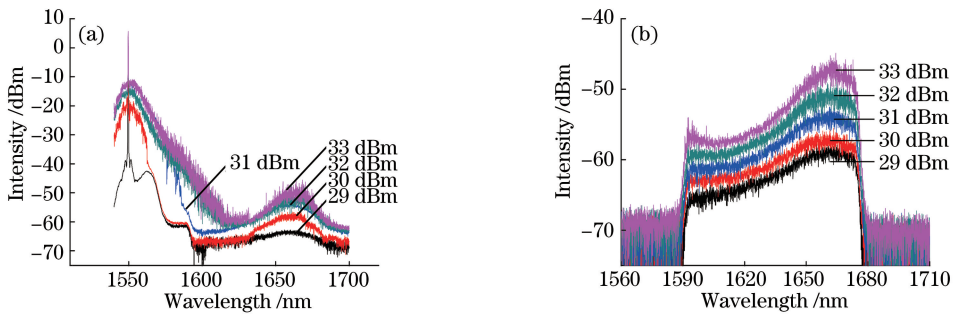


图 7 1 km 长 HNLF 接 3 km 长 DSF 的拉曼增益谱。(a)前向谱;(b)后向谱

Fig. 7 Raman gain spectra for 1 km long HNLF and 3 km long DSF. (a) Forward spectra; (b) backward spectra

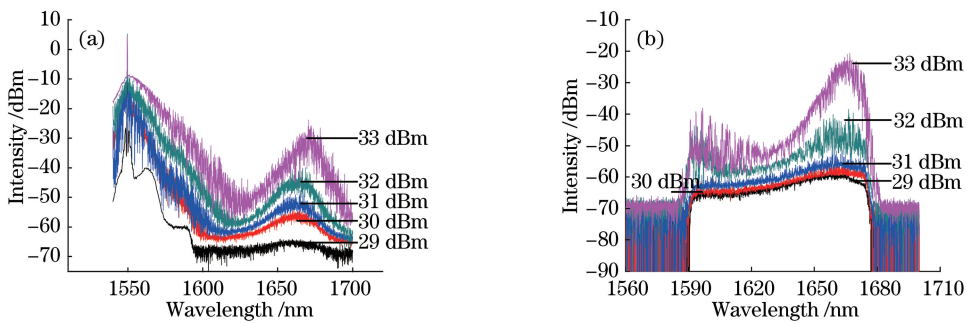


图 8 1 km 长 HNLF 接 6 km 长 DSF 的拉曼增益谱。(a)前向谱;(b)后向谱

Fig. 8 Raman gain spectra for 1 km long HNLF and 6 km long DSF. (a) Forward spectra; (b) backward spectra

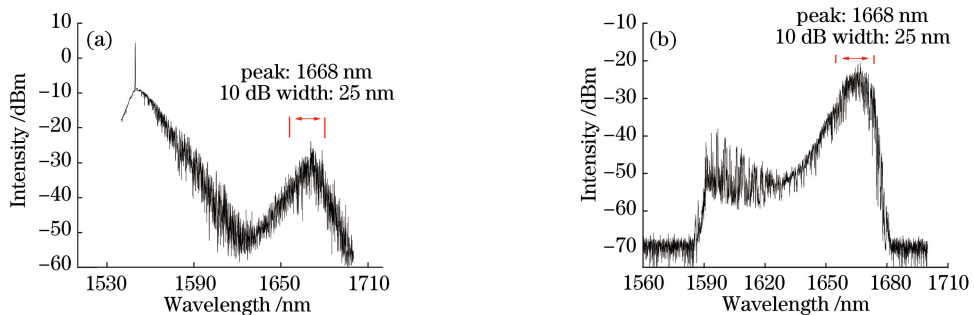


图 9 EDFA 输出功率为 33 dBm 时,1 km 长 HNLF 接 6 km 长 DSF 的拉曼增益谱。(a)前向谱;(b)后向谱

Fig. 9 Raman gain spectra for 1 km long HNLF and 6 km DSF under the condition of input power of 33 dBm.

(a) Forward spectra; (b) backward spectra

一方面,由于 1549.52 nm 的抽运光没有被 HNLF 和 DSF 完全吸收用于产生增益,一部分未被吸收的抽运光在光纤尾端口 1 和 WDM 端口 2 处产生反射,连续反射产生的自激振荡消耗了大量的增益光纤反转粒子

数,从而间接减弱了抽运光的转换效率。另一方面,增益光纤中随机瑞利散射不断累积放大,输出最终呈现出随机激光特性。这两种不稳定机制共同导致光谱出现不平滑、类似多波长形态的前向和后向增益谱^[29]。

实验得到了中心波长为 1668 nm、10 dB 线宽约为 25 nm 的前向和后向增益谱。实验存在以下几个问题:1) 在前向谱中还存在残余抽运光,需要利用合适的滤波器进行滤波得到 1.70 μm 波段增益谱,可以利用掺铒光纤吸收多余的抽运光;2) 产生的后向增益谱的峰值波长没有达到 1.70 μm ,原因是 WDM 的光谱范围为 1590~1680 nm,限制了更高波长增益谱的输出,这一问题会随着 1.70 μm 波段光纤器件的发展而得到解决;3) 产生的增益谱的带宽不够宽,限制了 1.70 μm 波段宽带光源的研究,可以同时利用不同波长的抽运光产生非线性效应,得到更宽的增益谱。

4 结 论

利用多模激光抽运非线性光纤产生 1.70 μm 波段拉曼增益谱,在有效抑制 SBS 的同时能够产生 SRS。首先分析了多模激光抽运抑制布里渊散射的原理,然后通过实验分析了不同功率下各种长度 HNLF、DSF 组合产生的前向谱和后向谱。1 km 长 HNLF 和 6 km 长 DSF 的组合可得到最大峰值功率为 -24 dBm、峰值波长为 1668 nm、10 dB 谱宽约为 25 nm 的后向增益谱。研究结果为 1.70 μm 波段连续激光器和超快激光器提供了技术参考。

参 考 文 献

- [1] Obi H, Murashima K, Tanaka M, *et al.* 1.7- μm spectroscopic spectral-domain optical coherence tomography for imaging lipid distribution within blood vessel[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6645-6655.
- [2] Horton N G, Wang K, Demirhan K, *et al.* *In vivo* three-photon microscopy of subcortical structures within an intact mouse brain[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(3): 205-209.
- [3] Nguyen T N, Kieu K, Churin D, *et al.* High power soliton self-frequency shift with improved flatness ranging from 1.6 to 1.78 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(19): 1893-1896.
- [4] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, *et al.* Welding of polymers using a 2 μm thulium fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2095-2099.
- [5] Workman J, Weyer L. *Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy*[M]. Florida: CRC Press, Inc., 2007.
- [6] Maeda Y, Yamada M, Endo T, *et al.* 1700 nm ASE light source and its application to mid-infrared spectroscopy[C]. 19th Optoelectronics and Communication Conference (OECC) and 39th Australian Conference on Optical Fibre Technology (ACOFT), 2014: 410-411.
- [7] Quimby R S, Shaw L B, Sanghera J S, *et al.* Modeling of cascade lasing in Dy: chalcogenide glass fiber laser with efficient output at 4.5 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(2): 123-125.
- [8] Quimby R S, Saad M. Dy:fluoroindate fiber laser at 4.5 μm with cascade lasing[C]. *Advanced Solid State Lasers Congress*, 2013: AM2A.7
- [9] Yamada M, Ono H, Ohta K, *et al.* 1.7 μm band optical fiber amplifier[C]. *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, 2014: 1-3.
- [10] Li Z, Alam S U, Daniel J M O, *et al.* 90 nm gain extension towards 1.7 μm for diode-pumped silica-based thulium-doped fiber amplifiers[C]. *European Conference on Optical Communication*, 2014: 1-3.
- [11] Zhang Yan, Zhang Peng, Liu Peng, *et al.* Fiber light source at 1.7 μm waveband and its applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 090002.
张岩, 张鹏, 刘鹏, 等. 1.7 μm 波段光纤光源研究进展及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 090002.
- [12] Quan Z, Gao C, Guo H, *et al.* 400 mW narrow-linewidth Tm-doped silica fiber laser output near 1750 nm with volume Bragg grating[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12034.
- [13] Daniel J M, Tokurakawa M, Ibsen M, *et al.* Ultra-short wavelength operation of a two-micron thulium fiber laser[C]. *CLEO: Science and Innovations*, 2014: SW1N.2.
- [14] Li Z, Jung Y, Daniel J M O, *et al.* Extreme short wavelength operation (1.65-1.7 μm) of silica-based thulium-doped fiber amplifier[C]. *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, 2015: 1-3.

- [15] Abeeluck A K, Headley C, Jørgensen C G. High-power supercontinuum generation in highly nonlinear, dispersion-shifted fibers by use of a continuous-wave Raman fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(18): 2163-2165.
- [16] Kawagoe H, Ishida S, Aramaki M, *et al.* Development of a high power supercontinuum source in the 1.7 μm wavelength region for highly penetrative ultrahigh-resolution optical coherence tomography[J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(3): 932.
- [17] Dong P, Gui L, Xiao X, *et al.* Experimental investigation of supercontinuum generation in highly nonlinear dispersion-shifted fiber pumped by spectrum-sliced amplified spontaneous emission[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(14): 3007-3011.
- [18] Xue G, Zhang B, Yin K, *et al.* All-fiber wavelength-tunable Tm/Ho-codoped laser between 1727 nm and 2030 nm[C]. *SPIE*, 2015, 9255: 92550U.
- [19] Dianov E M, Firstov S V, Alyshev S V, *et al.* A new bismuth-doped fibre laser, emitting in the range 1625-1775 nm [J]. *Quantum Electronics*, 2014, 44(6): 503-504.
- [20] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. California: Academic Press, 2007.
- [21] Long Q, Wu T, Hu S, *et al.* Threshold characteristics of forward-pumped fiber Raman amplifier [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 030603.
- [22] Wang G, Zhan L, Liu J, *et al.* Watt-level ultrahigh-optical signal-to-noise ratio single-longitudinal-mode tunable Brillouin fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(1): 19-21.
- [23] Hua X, Leng J, Yang H, *et al.* Highly efficient Raman conversion in O_2 , pumped by a seeded narrow band second-harmonic Nd:YAG laser[J]. *Applied Physics B*, 2005, 81(4): 525-530.
- [24] Shi J, Ouyang M, Chen X, *et al.* Stimulated Raman scattering enhanced by stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(7): 977-979.
- [25] Zhan L, Kuang Q, Gu Z, *et al.* High-energy passively mode-locked Raman fiber laser pumped by a CW multimode laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(2): 391-395.
- [26] Kuang Q, Zhan L, Wang Z, *et al.* Up to the 1552nd order passively harmonic mode-locked Raman fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(20): 2205-2208.
- [27] Wang Zhenbao, Shao Bibo, Zhang Lei, *et al.* Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 090603.
王振宝, 邵碧波, 张磊, 等. 光纤受激布里渊散射阈值分析与实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 090603.
- [28] Zhang Lei, Wang Zhaoying, Jia Dongfang. Studies on supercontinuum generation in different fiber compositions by using self-made sub-picosecond pulse[J]. *Optical Communication Technology*, 2009, 33(8): 39-41.
张蕾, 王肇颖, 贾东方. 不同光纤组合中产生的超连续谱研究[J]. *光通信技术*, 2009, 33(8): 39-41.
- [29] Zhu Junmei, Zhang Weili, Rao Yunjiang, *et al.* Output characteristics of low-threshold random distributed feedback fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0302007.
朱俊梅, 张伟利, 饶云江, 等. 低阈值随机分布反馈光纤激光器的输出特性[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0302007.