

基于倾斜 FBG 的光纤受激布里渊散射抑制

田鑫¹, 赵晓帆¹, 王蒙^{1,2,3}, 王泽锋^{1,2,3*}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

²脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;

³高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 当前窄线宽光纤激光器的输出功率已经达到数千瓦,但是受激布里渊散射(SBS)仍然是制约其功率提升和系统稳定性的主要因素。基于倾斜光纤 Bragg 光栅(TFBG)对 SBS 产生的后向斯托克斯(Stokes)光的滤波作用,实验验证了 TFBG 对 SBS 的抑制作用。将经优化设计并制备的倾斜光纤光栅置于单模光纤放大器和一段长 150 m 的单模传能光纤之间,发现后向传输的 Stokes 光的滤除率接近 10 dB,同时观测到了明显的 SBS 阈值提升,阈值约为不加 TFBG 时的 1.25 倍,前向输出的信号功率提升了约 20%。该研究对于高功率窄线宽全光纤激光器的功率提升具有积极的作用,同时在光纤通信和光纤传感中也有潜在的应用价值。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 倾斜光纤布拉格光栅; 光纤激光器; 受激布里渊散射

中图分类号 TN24

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1706001

Suppression of Stimulated Brillouin Scattering in Fiber Using the Tilted Fiber Bragg Grating

Tian Xin¹, Zhao Xiaofan¹, Wang Meng^{1,2,3}, Wang Zefeng^{1,2,3*}

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Currently, narrow linewidth fiber lasers with output powers of several kilowatts have been developed; however, their power improvement and system stability are still majorly restricted by stimulated Brillouin scattering (SBS). Based on our previous verification, the tilted fiber Bragg grating (TFBG) can effectively filter the backward-propagating Stokes wave owing to SBS in fibers. This study further verified its suppression effect on SBS through experiments. With an optimized and fabricated TFBG being inserted between a single-mode fiber (SMF) amplifier and a 150-m-length single-mode energy-transmitting fiber, the backward-propagating Stokes wave is strongly rejected with a filtering ratio of approximately 10 dB. Meanwhile, an obvious increasing of the SBS threshold is observed with a value 1.25 times than that in the case without the TFBG, which increases the effective laser output power by approximately 20%. This study provides new insights into the SBS suppression in fibers. Furthermore, it is extremely useful in the further power scaling of high-power narrow bandwidth all-fiber lasers. It also has potential applications in fiber-optic communication and fiber-optic sensing.

Key words fiber optics; fiber Bragg gratings; tilted fiber Bragg gratings; fiber lasers; stimulated Brillouin scattering

OCIS codes 060.3735; 290.5910; 140.3510

1 引言

高功率窄线宽光纤激光器在引力波探测、激光雷达、频率转换以及相干光束合成等领域有重要的

应用价值^[1-4],是国内外激光领域的研究热点。近年来,窄线宽光纤激光器获得了快速发展,输出功率得到了大幅提升,已达数千瓦。2017年,德国耶拿大学 Beier 等^[5]基于低数值孔径增益光纤,实现了

收稿日期: 2020-04-24; 修回日期: 2020-05-07; 录用日期: 2020-05-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61974427)、湖南省自然科学基金杰出青年科学基金项目(2019JJ20023)

* E-mail: zefengwang_nudt@163.com

3.5 kW 近衍射极限激光输出,线宽为 0.17 nm,斜率效率达 90%。2018 年,中国工程物理研究院 Li 等^[6]利用相位调制种子激光及双向泵浦结构,也实现了 3.5 kW 的窄线宽光纤放大器。同年,国防科技大学 Ma 等^[7]通过同带泵浦的主振荡器功率放大(MOPA)结构,实现了 4 kW 的功率输出,线宽为 0.89 nm,斜率效率达 78%。2019 年,中国科学技术大学 Lin 等^[8]报道了 3.7 kW 近衍射极限单模激光输出的全光纤放大器,线宽为 0.30 nm。

然而,在高功率窄线宽光纤激光器中,由于光纤传输的功率高、距离长、纤芯截面积小,在激光放大过程中极易产生受激布里渊散射(SBS)、自相位调制(SPM)、四波混频(FWM)等非线性效应,进而对光纤激光的性能产生一定的影响。其中,SBS 的阈值低,是限制窄线宽激光系统输出功率提升的最主要因素^[9-11]。在光纤中,当 SBS 阈值达到后,输出的激光功率将出现滞涨现象,继续注入的绝大部分前向信号光都将转换成后向传输的 Stokes 光,既限制了激光功率的提升、降低了激光效率,同时也严重威胁系统的稳定工作。因此,对于高功率光纤激光系统,如何有效滤除后向 Stokes 光或抑制 SBS 变得至关重要。根据 SBS 的产生机制及特性,最主要的抑制方法就是提高光纤中 SBS 的阈值。到目前为止,已经有很多方法用于抑制高功率窄线宽光纤激光系统的 SBS,主要包括增大光纤的模场面积以降低信号光的功率密度^[12],利用特殊设计的有源光纤^[13],通过施加温度^[14]、应力^[15]或声场裁剪等技术^[16]展宽布里渊增益谱,采用相位调制展宽种子源谱线宽度^[17]或使用双波长种子^[18]和特殊的种子^[19]等。在前期的研究中,本课题组^[20]提出利用倾斜光纤 Bragg 光栅(TFBG)来滤除光纤中 SBS 产生的后向 Stokes 光,并通过实验验证了其滤波功能,对后向 Stokes 光的滤除比达 16 dB,可以对系统起到很好的保护作用。

本文实验验证 TFBG 对光纤中 SBS 的抑制作用。通过对 TFBG 的透射光谱特性进行深入分析,给出了实际应用中 TFBG 的设计要求和选点原则,同时指出对 TFBG 进行必要的温度控制是确保其稳定工作的关键。搭建了含温度控制装置的验证实验系统,将优化设计和制备的 TFBG 置于单模光纤放大器和一段长 150 m 的单模传能光纤之间,后向传输的 Stokes 光滤除率接近 10 dB,同时观测到了明显的 SBS 阈值提升,阈值约为不加 TFBG 时的 1.25 倍,前向输出的有效信号功率提升了约

20%,而且非常稳定,波动约为 $\pm 2\%$ 。

2 原理分析

1972 年,人们首次观察到光纤的 SBS 现象^[21],此后进行了广泛的研究,SBS 已经成为光纤中的主要非线性效应之一,布里渊频移 ν_B 和布里渊增益谱是描述 SBS 的重要参数。在光纤中有 $\nu_B = 2n v_a / \lambda_p$ ^[10],其中 n 为波长 λ_p 时的光纤纤芯折射率, v_a 为光纤中的声速, λ_p 为入射光的波长。在熔石英光纤中,若取 $v_a = 5.96$ km/s,可以得到布里渊频率 $\nu_B = 11.3$ GHz,即对应波长间隔 $\Delta\lambda_B \approx 0.09$ nm。一般地,布里渊增益谱 g_B 具有洛伦兹型谱线分布,谱线宽度 $\Delta\nu_B$ 取决于声子寿命 T_B ,具体表达式为 $\Delta\nu_B = (2\pi T_B)^{-1}$,当入射光波长 $\lambda_p = 1550$ nm 时,理论计算和实验测量的布里渊增益线宽均为 $\Delta\nu_B \approx 17$ MHz^[10]。

同时,SBS 效应也具有明显的阈值性,只有当入射光强度超过一定激励阈值时才会发生 SBS。考虑到偏振特性和泵浦光线宽等因素,可将 SBS 阈值表达为^[10]

$$P_{th}^{SBS} = 21 \frac{KA_{eff}}{g_B L_{eff}} \left(1 + \frac{\Delta\nu_S}{\Delta\nu_B} \right), \quad (1)$$

式中: A_{eff} 代表光纤有效模场面积; K ($1 < K < 2$)为保偏系数,当泵浦光为线偏振光时 K 取 1,自然光时取 2,其典型值取 1.5; $\Delta\nu_B$ 和 $\Delta\nu_S$ 分别为布里渊增益谱带宽和注入的信号激光谱线宽度; L_{eff} 为光纤有效长度。从(1)式中可以看出,增大光纤有效模场面积、减小光纤有效长度、减小布里渊增益、增加信号光线宽等都是提高 SBS 阈值最直接的手段。

由于 TFBG 光栅平面与光纤的切向成一定倾角 θ ,前向传输的纤芯模不仅会与后向传输的纤芯模发生耦合,还会与后向传输的包层模发生耦合,光栅透射谱中短波区域会出现许多带宽极窄的谐振峰,如图 1 所示。第 i 阶包层谐振波长 $\lambda_{cladding,i} = (n_{eff}^{co} + n_{eff,i}^{cl})\Delta_g / \cos\theta$ ^[22],其中 n_{eff}^{co} 是纤芯模的有效折射率, $n_{eff,i}^{cl}$ 是第 i 阶包层模的有效折射率, Δ_g 是光栅的周期。

图 1 所示的各谐振峰 3 dB 带宽均为 0.08 nm 左右,远大于光纤中布里渊增益谱宽,与前面计算得到的光纤中 SBS 频移 0.09 nm 非常接近。因此,如果合理选择工作点,可以让 SBS 产生的 Stokes 波长处于某个谐振峰的波谷,此时对应的信号光波长处于谐振峰带外(理论上可以无损耗),如图 1 的中间插入图所示。这样,可以对后向传输的 Stokes 光引

入一个很大的损耗,使得光纤中后向传输的 Stokes 光的积累中断而必须重新开始,该方法等效于缩短了光纤的有效布里渊增益长度,提升了 SBS 阈值,从而达到抑制 SBS 的目的。实际应用中,如何选择合理的 TFBG 工作点对于实现 SBS 的有效抑制非常重要。根据包层模耦合公式,由于 TFBG 各阶包层模有效折射率的非线性变化,且越靠近 Bragg 波长,包层模式越多,因此其谐振峰的中心波长间隔并非均匀,沿短波方向波长间隔越来越大,如图 1 仿真结果所示。从图中还可以看到,由于不同包层模与

纤芯模耦合系数的不同,透射谱中各谐振峰深度的不一样,存在极值深度。此外,透射谱的长波段(靠近 Bragg 波长的区域)谐振峰非常密集,使得通带内的损耗相对不稳定,如图 1 右侧插入图所示。综合考虑 TFBG 透射谱的这些特性,将工作波长设置在靠近中间抑制深度最大的区域比较合适,如图 1 的中间插入图所示。因此,针对实际应用刻写 TFBG 时,应根据工作波长选择周期合适的相位模板和倾斜角度,以达到最佳的抑制效果。

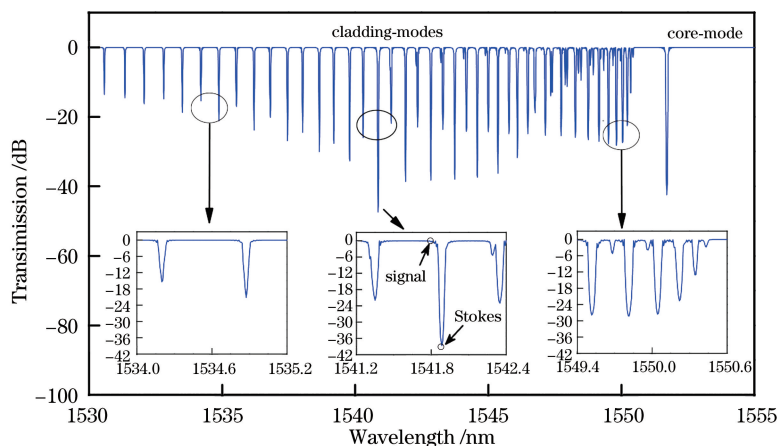


图 1 1.5 μm 波段 TFBG 典型透射谱(倾斜角度 4°)

Fig. 1 Calculation transmission spectrum of TFBG at 1.5 μm band at tilt angle of 4°

此外,由于 TFBG 的透射谱会随着纤芯温度的变化(由外界环境温度变化或光纤中传输的激光功率增加引起)或受应力的变化而发生漂移,故实际的抑制效果会受到不同程度的影响。本研究实验测量了 TFBG(在单模光纤 SMF-28 上刻写)透射谱随温度的漂移量,发现所有谐振峰中心波长的漂移率基本相同,约为 11 pm/°C,其中 1547.8 nm 附近的谐振峰的测量结果如图 2 所示。室温环境下,如果 TFBG 的初始状态工作点选择如图 1 所示,则当纤

芯温度由于外界环境或激光功率增加等因素升高 10 °C 时,TFBG 光谱的漂移量将大于 0.1 nm,而 SBS 的频移非常小,此时对应的 Stokes 波长完全移出了谐振峰的抑制带宽,工作失效。同时,信号波长的损耗也可能发生变化。因此,实验中必须考虑 TFBG 的温度敏感性,以确保 TFBG 透射谱的稳定。必要的时候,可以采取 TFBG 抗应力和具有温度补偿的封装设计。本文采用一个商用的热电冷却器(TEC)来控制 TFBG 的温度。

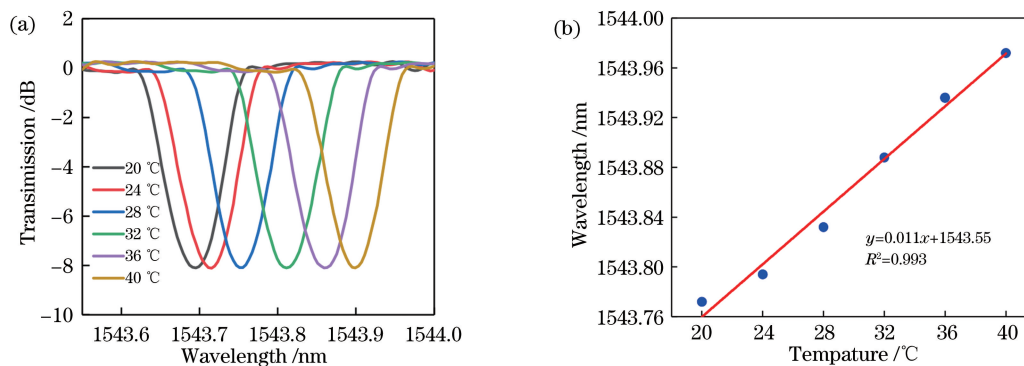


图 2 TFBG 的温度特性。(a)光谱随温度的漂移;(b)波长随温度的漂移

Fig. 2 Temperature characteristics of TFBG. (a) Shift of spectra with temperature; (b) shift of wavelength with temperature

3 实验系统

图 3 为含温度控制装置的实验系统结构示意图。采用一个可调谐的窄线宽连续激光种子源与掺铒光纤放大器 (EDFA) 产生 SBS 的信号激光。EDFA 后接入一个高功率隔离器 (ISO) 以防止后向回光。为了研究光纤中的 SBS 效应, 将一个环形器接入系统, 环形器的 2 端口接入一个 90:10 的分束器, 90% 的激光注入到用于产生 SBS 的 150 m 传能光纤 (SMF-28e), 功率标记为 P_2 , 150 m 光纤的实际注入功率可通过监测分束器另一端口得到, 功率标记为 P'_2 。SBS 效应产生的后向 Stokes 光在环形器 3 端口处监测获取, 功率标记为 P_3 。为了研究 TFBG 对 SBS 的抑制作用, 在环形器 2 口和分束器之间加入 TFBG。为了避免 TFBG 透射谱随纤芯温度的漂移对抑制效果的影响, 采用一个商用的 TEC 来控制 TFBG 的温度, 同时分束器可监测注入功率的变化情况, 借此判断 TFBG 光谱是否发生漂移。为了确保加入 TFBG 前后对比实验的有效性, 除 TFBG 之外系统各部分状态完全一样。与之前的实验系统相比^[20], 这里的 EDFA 可以输出更高的信号激光功率, 传能光纤从数千米缩短至百米, 以便更好地观测 TFBG 对 SBS 的抑制效果。

实验所用的 TFBG 采用紫外激光和相位模板

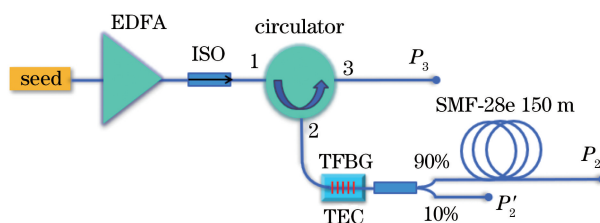


图 3 倾斜光纤光栅 SBS 抑制验证实验结构示意图

Fig. 3 Experimental setup for the suppression of SBS in fiber 的方法进行刻写^[23-24]。相位掩模板周期为 1069.3 nm, 对应 Bragg 谐振波长为 1548.1 nm, 光纤光栅倾斜角度为 4°。刻写光栅所用的光纤在室温环境下经过 2 周的高压载氢 (12 MPa)。光栅刻写过程中, 采用超高斯振幅模板进行切趾与补偿, 以获得更优的透射谱, 如图 4 所示, 透射谱由分辨率为 0.1 nm 的可调谐扫频激光器 (81960A) 测量得到。测量时 TFBG 放在 TEC 的温控板上并呈自然伸直状, 温度设为 22 °C。从透射谱上可以看出, 相比于之前的 TFBG^[20], 经过切趾和补偿后, 光谱短波区域的一系列谐振峰更为陡峭, 这非常有利于实验中工作点的选择, 在确保 SBS 频移处具有较大损耗的同时, 尽可能减小信号激光的损耗。实现中, 选择 1539.434 nm 作为 TFBG 的工作波长, 相应的布里渊 Stokes 光波长为 1539.532 nm, 对应的透射谱深度分别为 -0.33 dB 和 -11.2 dB。

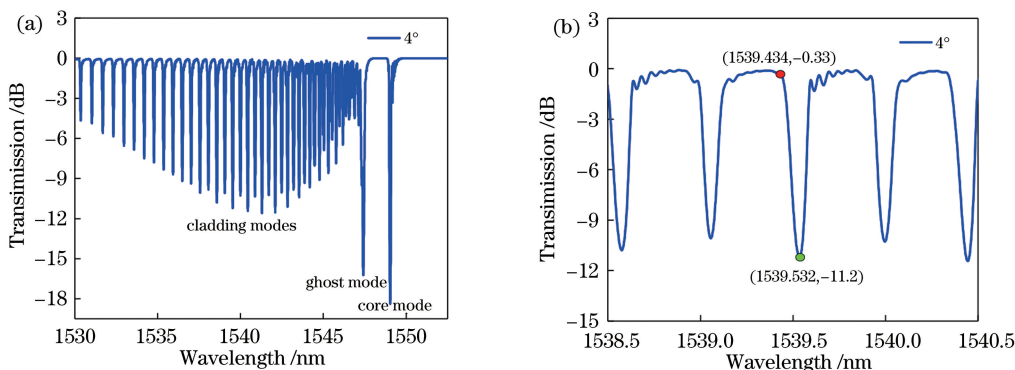


图 4 实验中使用的倾斜光栅光谱。(a) 总体图; (b) 局部图

Fig. 4 Measured spectra of TFBG in SMF-28e. (a) General vision; (b) enlarged vision

4 实验结果与分析

实验中, 利用光谱仪 (Yokogawa AQ6370D, 600~1700 nm, 最大波长分辨率为 0.02 nm) 在 150 m 单模光纤输出端 (P_2) 和环形器的 3 口 (P_3) 测量了输出激光光谱, 如图 5 所示。需要说明的是, 受光谱仪波长分辨率的限制, 单模光纤输出端和分束器另一端测得的光谱几乎是一样的。图 5 仅用于

分析中心波长的相对移动。从图中可以看到, Stokes 光的中心波长相对于注入激光的中心波长向长波长方向移动了约 0.09 nm, 对应 11.4 GHz, 与理论值 11.3 GHz 非常吻合。

有无 TFBG 时的输出功率 (P_2) 和后向 Stokes 功率 (P_3) 随输入功率变化的测量结果如图 6(a) 所示。这里定义 SBS 阈值为输出功率出现滞涨时的输入功率。从图中可以看到, 达到 SBS 阈值前, 输

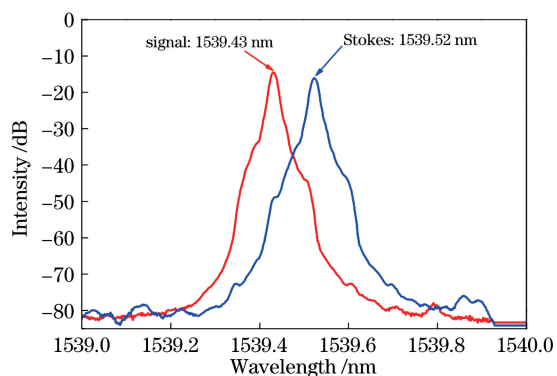


图 5 150 m SMF-28e 光纤输出端和环形器 3 口测得的激光光谱

Fig. 5 Measured optical spectra at the end of 150 m SMF-28e fiber and port 3 of the circulator

出的激光功率随输入功率的增加而增加,后向 Stokes 光功率非常弱。但是,一旦达到 SBS 阈值,输出功率不再增加,未加 TFBG 时,后向 Stokes 光功率将迅速增长,再注入的光功率几乎完全被转换为后向 Stokes 光;加入 TFBG 后,随注入功率继续增加,后向 Stokes 光功率大幅降低,这意味着 TFBG 滤除了大部分后向光,滤除率随注入功率的变化如

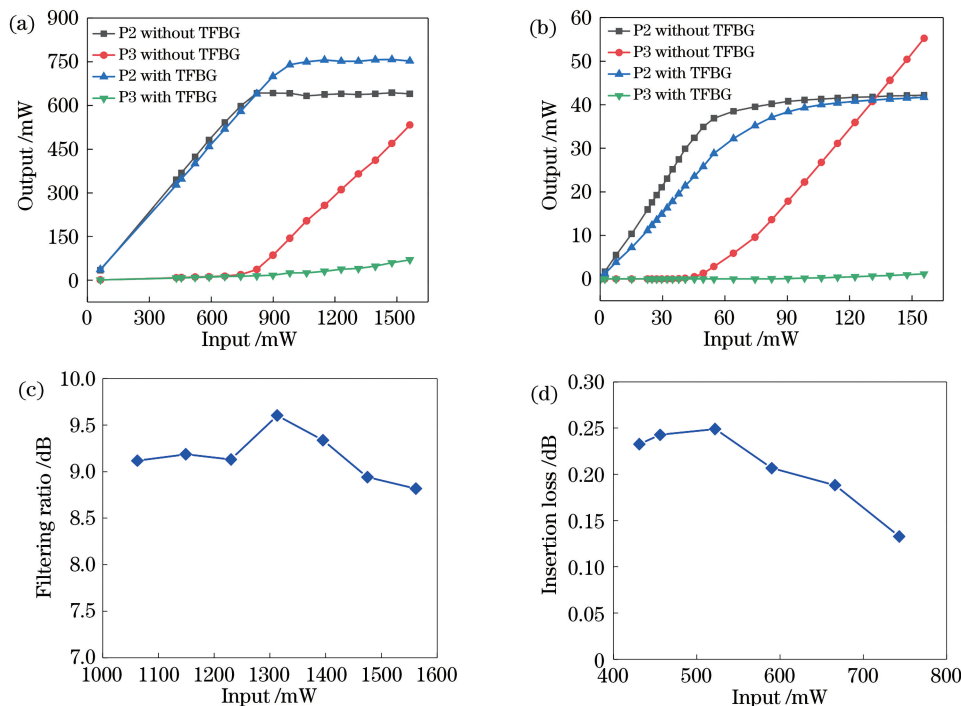


图 6 实验结果。(a)有无 TFBG 时输出信号光和后向 Stokes 光功率随注入激光功率的变化;(b)前期的实验结果^[20];(c)后向 Stokes 光滤除比随注入激光功率的变化;(d)TFBG 插入损耗随注入功率的变化

Fig. 6 Experimental results. (a) Changing of the forward output signal and backward Stokes power with the input power with or without TFBG; (b) previous results^[20]; (c) Stokes wave filtering ratio and (d) insertion loss of TFBG with the input laser power

图 6(c)所示。因此,在 TFBG 到环形器 3 口这段光纤中(长约 4 m),Stokes 信号将从一个相对低得多的功率水平重新开始积累[从图 6(a)也能看到,最大注入功率情况下环形器 3 口探测到的 Stokes 光约为 70 mW],使得总的等效布里渊增益长度减小,从而 SBS 阈值从未加光栅时的 820 mW 提升到 1050 mW,提升约 1.25 倍;相应地,有效输出功率从 640 mW 提升到 750 mW,提升了约 20%。而之前的实验结果,如图 6(b)所示^[20],SBS 阈值没有明显的变化,随着注入功率的增加,最终饱和输出的激光功率几乎一样,TFBG 仅仅起到了滤除后向 Stokes 光的作用。究其原因,主要是之前的实验中使用了 3.8 km 长的光纤,TFBG 到环形器 3 口的长度可以(约 4 m)忽略不计,因此对输出的有效功率几乎不产生影响,只表现出图 6(b)所示的滤波效果。图 6(d)为达到 SBS 阈值前,TFBG 插入损耗随输入功率变化的情况,平均值约为 0.2 dB。实验中 Stokes 光滤除比和信号光的实际损耗都比图 4(b)中选择的工作点低,这是由光栅温度控制不够精确、光谱微小漂移引起的。

另外,还测量了有 TFBG 时,最高注入激光功率为 1.75 W 情况下输出激光的稳定性,结果如图 7 所示,测量过程中,TEC 温度设置为 22 °C。图 7 显示在测量的半小时内,输出激光功率非常稳定,功率波动约为 $\pm 2\%$,验证了单模 TFBG 在较高功率下可通过温度控制实现稳定工作,这对于 TFBG 的实际应用至关重要。此外,必要时还可以采用特殊的封装技术,避免 TFBG 不受外界温度或应变干扰,以保证 TFBG 高功率下的稳定工作。

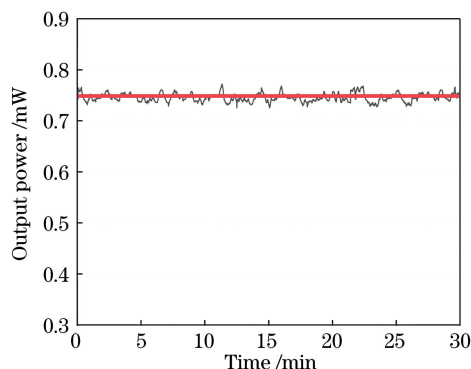


图 7 最高注入功率时输出功率稳定性测试结果

Fig. 7 Measured stability of the output signal with TFBG at the maximum input power

5 结 论

通过深入分析 TFBG 透射谱的特性,给出了实际应用中 TFBG 的设计要求和在工作点选择原则,同时指出 TFBG 温度控制是确保其稳定工作的关键,尤其对于将来在大功率窄线宽光纤激光器中的应用。搭建了研制实验系统,除观测到后向传输的 Stokes 光近 10 dB 的滤除率,同时还观测到了明显的 SBS 阈值提升,约为不加倾斜光栅时的 1.25 倍,有效前向输出功率提升了约 20%。实验过程中使用了温控装置,故其功率稳定性非常好,波动约为 $\pm 2\%$ 。本研究对于窄线宽全光纤激光器功率的进一步提升具有积极的作用。后续将会把 TFBG 应用在实际的高功率光纤激光系统中,验证其对输出功率提升的效果。此外,TFBG 在光纤通信和光纤传感中也有重要的潜在应用价值。

参 考 文 献

- [1] Samson B, Carter A. Recent progress on power scaling narrow linewidth fiber amplifiers and their applications [J]. *The Review of Laser Engineering*, 2013, 41(9): 714-717.
- [2] Carlson C G, Dragic P D, Price R K, et al. A narrow-linewidth, Yb fiber-amplifier-based upper atmospheric Doppler temperature lidar [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 451-461.
- [3] Shi W, Leigh M A, Zong J, et al. High-power all-fiber-based narrow-linewidth single-mode fiber laser pulses in the C-band and frequency conversion to THz generation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 377-384.
- [4] Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, et al. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 546-551.
- [5] Beier F, Hupel C, Kuhn S, et al. Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14892-14899.
- [6] Li T L, Zha C W, Sun Y H, et al. 3.5 kW bidirectionally pumped narrow-linewidth fiber amplifier seeded by white-noise-source phase-modulated laser [J]. *Laser Physics*, 2018, 28(10): 105101.
- [7] Ma P F, Xiao H, Meng D R, et al. High power all-fiberized and narrow-bandwidth MOPA system by tandem pumping strategy for thermally induced mode instability suppression [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e57.
- [8] Lin H, Tao R, Li C, et al. 3.7 kW monolithic narrow linewidth single mode fiber laser through simultaneously suppressing nonlinear effects and mode instability [J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9716-9724.
- [9] Kobayakov A, Sauer M, Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, 2(1): 1-59.
- [10] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics Fifth Edition* [M]. New York: Academic Press, 2015: 1-629.
- [11] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [12] Gray S, Liu A P, Walton D T, et al. 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 17044-17050.
- [13] Pulford B, Ehrenreich T, Holten R, et al. 400-W near diffraction-limited single-frequency all-solid photonic bandgap fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(10): 2297-2300.
- [14] Liu A P. Stimulated Brillouin scattering in single-

- frequency fiber amplifiers with delivery fibers [J]. Optics Express, 2009, 17(17): 15201-15209.
- [15] Zhang L, Cui S Z, Liu C, et al. 170 W, single-frequency, single-mode, linearly-polarized, Yb-doped all-fiber amplifier[J]. Optics Express, 2013, 21(5): 5456-5462.
- [16] Robin C, Dajani I. Acoustically segmented photonic crystal fiber for single-frequency high-power laser applications [J]. Optics Letters, 2011, 36 (14): 2641-2643.
- [17] Harish A V, Nilsson J. Optimization of phase modulation formats for suppression of stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24 (3): 1-10.
- [18] Webels P, Adel P, Auerbach M, et al. Novel suppression scheme for Brillouin scattering [J]. Optics Express, 2004, 12(19): 4443-4448.
- [19] Liu C, Liu J, Zhang Y J, et al. Stimulated Brillouin scattering suppression of thulium-doped fiber amplifier with fiber superfluorescent seed source[J]. Optics Express, 2017, 25(9): 9569-9578.
- [20] Tian X, Wang M, Wang Z F. Stimulated Brillouin scattering filters based on tilted fiber Bragg gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1006002.
- 田鑫, 王蒙, 王泽锋. 基于倾斜光纤 Bragg 光栅的受激布里渊散射滤波器 [J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1006002.
- [21] Ippen E P, Stolen R H. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. Applied Physics Letters, 1972, 21(11): 539-541.
- [22] Erdogan T. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1997, 14(8): 1760-1773.
- [23] Zhang Y J, Wang M, Wang Z F, et al. Fabrication of chirped and tilted fiber Bragg gratings and investigation of Raman filtering effect [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0106002.
- 张宇菁, 王蒙, 王泽锋, 等. 啾啾倾斜 Bragg 光纤光栅制作及 Raman 滤除研究 [J]. 光学学报, 2017, 37 (1): 0106002.
- [24] Wang M, Zhang Y J, Wang Z F, et al. Fabrication of chirped and tilted fiber Bragg gratings and suppression of stimulated Raman scattering in fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 1529-1534.