

基于倾斜光纤 Bragg 光栅的受激布里渊散射滤波器

田鑫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 受激布里渊散射(SBS)是制约窄线宽光纤激光器功率和系统稳定性提升的重要因素,后向传输的斯托克斯(Stokes)光可能会损坏种子和前级放大系统,如何有效抑制 SBS 或滤除 SBS 产生的后向 Stokes 光是高功率窄线宽激光系统必须解决的关键问题。根据光纤激光器的工作波长和 SBS 频移特性,设计并采用紫外激光加相位掩模板法制备了单模光纤倾斜光纤 Bragg 光栅(TFBG),搭建系统,开展了 SBS 信号滤除验证实验。实验结果表明,TFBG 对后向 SBS 信号的平均滤除率大于 16 dB,可以很好地保护前级系统,有助于系统稳定工作。

关键词 光纤光学; 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/AOS202040.1006002

Stimulated Brillouin Scattering Filters Based on Tilted Fiber Bragg Gratings

Tian Xin¹, 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 Stimulated Brillouin scattering (SBS) is one of the primary factors that limit the output power and stability of narrow-linewidth high-power fiber laser systems. Backward scattered Stokes light would damage the seed and preamplifier system; therefore, suppressing SBS or filtering the Stokes light is a key problem that needs to be addressed. In this study, we design and prepare a matched tilted fiber Bragg grating (TFBG) using an ultraviolet laser and phase masks in a single mode fiber based on the operating wavelength and the tiny frequency shift of SBS, and perform an SBS signal filtering verification experiment. Experimental results show that the average filtering rate of the TFBG to the backward SBS signal is more than 16 dB, which can well protect the front system and help stabilize the system.

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

OCIS codes 060.3735; 060.3510; 290.5900

1 引 言

光纤激光器由于其转换效率高、光束质量好、结构紧凑、热管理方便等优点受到广泛的关注^[1-3]。窄线宽、高功率、高光束质量的全光纤系统在相干光束合成、激光雷达、非线性频率转换、引力波探测等领域中有重要应用^[4-7]。随着种子激光器和有源光纤的改进,窄线宽光纤激光器的输出功率得到了显著

提高^[8-11]。目前,全光纤单频偏振激光器的输出功率已超过 400 W^[8],线宽为 2 GHz 的光纤激光器输出功率已达千瓦^[9],而几十 GHz 的光纤激光器的输出功率已超过 3 kW^[10-11],线偏振光纤激光器最高功率也已达 2.62 kW^[12]。然而,广泛的研究表明,受激布里渊散射(SBS)是窄线宽光纤激光器功率提升的首要限制因素^[13-15]。在窄线宽光纤激光中,当 SBS 达到阈值后,激光输出功率就会出现滞涨现象,

收稿日期: 2019-11-29; 修回日期: 2020-02-10; 录用日期: 2020-02-18

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

前向传输的激光功率快速向后向传输的 Stokes 光功率转换,会影响前级放大器和种子激光器的正常工作,导致输出功率不稳定,严重时还会对系统造成损坏。因此,当窄线宽光纤激光系统的功率超过一定水平时,滤除后向 Stokes 光或抑制 SBS 变得至关重要。

关于光纤激光系统中抑制 SBS 的方法有很多,如增大光纤模场面积^[16]、特殊设计有源光纤^[17]、采用相位调制展宽种子激光线宽^[18],或通过施加温度^[19]、应力^[20]或声场裁剪等技术^[21]展宽布里渊增益谱,除上述方法外,还有采用啁啾种子^[22]、增大放大器增益系数^[7]和使用两个不同种子激光增益竞争^[23]等一系列方法也被用于 SBS 抑制。然而,在大模场光纤中,高阶模通常随着光纤模场面积的增大而出现,光纤芯径过大将导致光纤激光器横向模式不稳定,阈值降低,限制了激光器输出功率。采用有源光纤或声场裁剪技术提升 SBS 阈值时需要对其结构进行独特设计但又受限于制造工艺。采用相位调制技术提升 SBS 阈值时需要大量的调制函数和实验数据才能得到较好的效果。展宽布里渊增益谱可以通过有效降低布里渊增益的峰值来提高阈值,但系统结构复杂,控制较难。而采用外部主动调制方式,整个系统会非常复杂。此外,滤波器在理论上可以用来滤除 SBS 产生的 Stokes 光,因为它在 Stokes 波长处的损耗等效于布里渊增益系数的降低,并且除此之外系统中没有任何变化,但是 SBS 的微小频移使其很难在系统中应用。

本文首次采用倾斜光纤 Bragg 光栅(TFBG)来滤除光纤激光中 SBS 产生的后向 Stokes 光。为了验证 TFBG 对后向 Stokes 光的滤波效果,根据 1.5 μm 光纤激光器的工作波长及其 SBS 频移特性,基于紫外激光相位掩模板法,在单模光纤上刻写了 TFBG,并搭建了实验系统开展验证实验。实验中,通过精确选择工作波长,很好地实现了 TFBG 对后向 SBS 信号滤除,平均滤除率大于 16 dB,对整个系统的最大输出功率几乎没有影响。实验结果表明,TFBG 可以很好地保护前级系统,有助于系统稳定工作。本文提出的方案为光纤激光 SBS 的滤除提供了新思路,有望进一步提升全光纤窄线宽激光系统的输出功率。

2 基本原理

从经典理论出发,SBS 可以描述为泵浦光和 Stokes 光经声波场进行的非线性相互作用。光纤

中泵浦光场通过电致伸缩过程产生声波,声波反过来调制介质的折射率,形成折射率光栅,且光栅以声速 v_A 移动。该光栅通过布拉格衍射散射泵浦光,经由多普勒效应形成频率下移的后向 Stokes 光;后向 Stokes 光与泵浦光发生干涉,进一步通过电致伸缩过程增大声波强度,反过来又促进了对泵浦光的散射,加强了后向 Stokes 光的强度。光纤中,布里渊频移通常可以表达为^[14]

$$\nu_B = \frac{\Omega_B}{2\pi} = \frac{2nv_A}{\lambda_p}, \quad (1)$$

式中: ν_B 为布里渊频移; Ω_B 为泵浦光与 Stokes 光的圆频率差且满足 $\Omega_B = \omega_p - \omega_s$; λ_p 为入射光的波长; n 为波长为 λ_p 时的光纤纤芯折射率。布里渊增益谱与声子寿命或声波衰减时间有关,其增益线宽非常窄^[14]。对于石英光纤,当入射光波长满足 $\lambda_p = 1550$ nm 时,布里渊增益线宽 $\Delta\nu_B \approx 17$ MHz^[14]。若取 $v_A = 5.96$ km/s,可以得到布里渊频移 $\nu_B = 11.2$ GHz,即对应波长间隔 $\Delta\lambda_B \approx 0.09$ nm。

倾斜 Bragg 光纤光栅的光栅平面与光纤的切向成一定倾角 θ ,如图 1 所示。在光栅中,由于倾斜角度的存在,前向传输的纤芯模不仅会与后向传输的纤芯模发生耦合,也会与后向传输的包层模发生耦合,因此透射光谱中短波区域会出现许多分立的谐振峰,谐振波长可表示^[24]

$$\lambda_{\text{coupling},i}^{\text{co}} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} + n_{\text{eff},i}^{\text{cl}})\Lambda_g / \cos \theta, \quad (2)$$

式中: $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 为光纤芯模的有效折射率; $n_{\text{eff},i}^{\text{cl}}$ 为第 i 阶包层模的有效折射率; Λ_g 为光栅的周期。

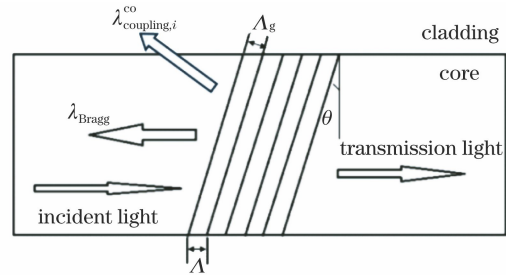


图 1 倾斜光纤光栅结构图

Fig. 1 Structure diagram of a TFBG

图 2 是倾斜角度为 4° 时仿真得到的倾斜光栅透射谱。仿真中对应的光纤为康宁公司生产的单模光纤 SMF-28e,纤芯折射率设为 1.4682,纤芯直径设为 8.2 μm,包层折射率设为 1.4629,直径设为 125 μm,相位模板的周期为 1075.9 nm,光栅长度为 50 mm,折射率调制深度为 0.0005。根据理论,在 1550 nm 处的布里渊频移 $\nu_B = 11.2$ GHz,对应波长变化为 $\Delta\lambda_B \approx 0.09$ nm,而图 2 透射谱上的谐振峰

3 dB带宽为 0.1 nm 量级,可以在不损耗信号光的前提下,在 SBS 频移处提供足够的损耗,因此可将其作为光纤光栅极窄带滤波器滤除后向传输的 Stokes 光,使用时必须将信号光波长位于其透射谱通带上,Stokes 波长位于谐振峰损耗处,以获得最佳滤波效果。

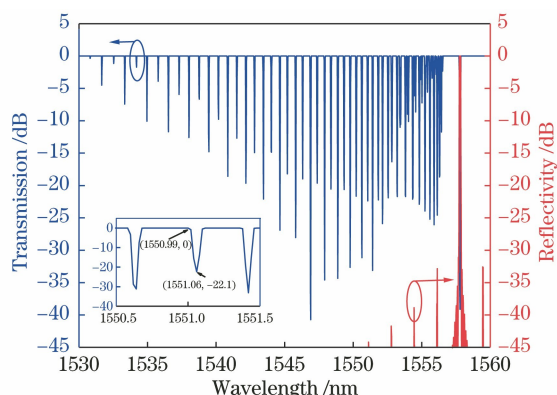


图 2 仿真倾斜角度 4°时的倾斜光纤光栅光谱

Fig. 2 Calculation transmission and reflection spectrum of TFBG with tilt angle 4°

为进一步确定制作 TFBG 的最佳倾斜角度,在较小的波长范围内,对倾斜角度为 4°、6°和 8°的倾斜光纤光栅进行了精细仿真,其透射谱的对比如图 3 所示,折射率调制深度均为 0.0005。由图可得,随着倾斜角度的增大,谐振峰波长间隔变大,单个谐振峰的 3 dB 带宽减小。对倾斜光纤光栅而言,特定波长的透射谱深度直接决定了其滤波能力。考虑到谐振峰的透射谱深度和 3 dB 带宽,实验选择制作倾斜角度为 4°的 TFBG,此时,单个谐振峰从 0 dB 至谷底的波长变化约为 0.06 nm,满足布里渊频移条件。同时,对于同一倾斜光纤光栅,当其用作极窄带滤波

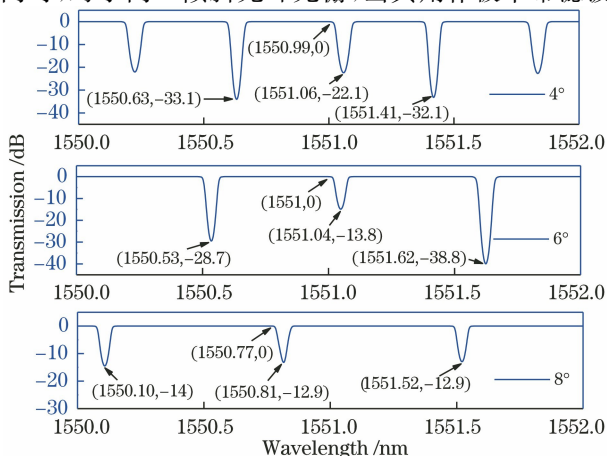


图 3 不同倾斜角度下倾斜光纤光栅透射谱对比图

Fig. 3 Comparison of transmission spectrum with tilt angles 4°, 6° and 8°

器时,对多个工作波长的 Stokes 光都有滤除效果,具有较好的通用性。

3 实验结果与分析

图 4 为实验系统结构示意图。采用一波长可调谐窄线宽连续激光器作为种子源,其型号为 CoBrite DX1,由 ID photonics 公司生产,波长调谐范围为 1527~1608 nm,最大输出功率约为 40 mW,线宽小于 100 kHz。用一单模光纤输出、最大输出功率为 9 W 的 980 nm LD 作为掺铒光纤放大器泵浦源,其输出与种子光一起经由一波分复用器件注入到 11 m 掺铒放大光纤 (EDFA) 中。在 EDFA 后接入一隔离器 (ISO) 以防止后向回光。为了研究光纤中的 SBS 效应,将一环形器接入系统,其 1 端口接入隔离器输出,2 端口接入一盘 3.8 km 的 SMF-28e 传能光纤,则由 SBS 效应产生的后向 Stokes 可在 3 端口处监测获取。TFBG 在 3.8 km 传能光纤前加入,除此之外,加入光栅前后对系统无任何改动,以确保对比有效性。为了方便比较讨论,分别将其标记为端口 2、3。

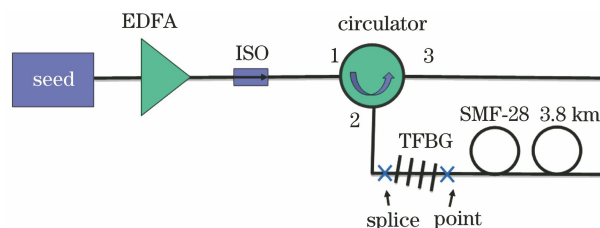


图 4 倾斜光纤光栅 SBS 滤波验证实验结构示意图

Fig. 4 Experimental setup for the filtering of SBS in TFBG

实验所用的倾斜 Bragg 光纤光栅采用紫外激光加相位掩模板的方法进行刻写。相位掩模板周期为 1075.9 nm,栅区长度为 27 mm,旋转角度为 2.8°,对应实际光纤光栅倾斜角度为 4°。实验在 12 MPa 环境下载氢 2 周的 SMF-28e 光纤上进行了倾斜光纤光栅刻写。实验中采用光波万用表 (Keysight 公司生产,型号为 8163B,包括一个分辨率为 0.1 nm 的可调谐扫频激光器 81960A) 对其进行精细测量,其透射谱与反射谱如图 5 所示。从透射谱或反射谱中可以看出,其本身的布拉格谐振波长为 1557.880 nm;短波区域出现了一系列只能在透射谱上观察到的包层模谐振峰,其 3 dB 带宽为 0.2 nm,远大于理论仿真结果,这主要受限于刻写工艺。因此要谨慎选择激光的工作波长且需尽量保证激光在信号波长处的损耗小,在 SBS 频移处损耗大。为了有效验证 TFBG 的滤波效果,实验选择 1551.628 nm 作为倾

斜光纤光栅滤波器的工作波长,相应布里渊 Stokes 光波长为 1551.708 nm,对应透射谱深度分别为 1.4 dB和 18.5 dB。

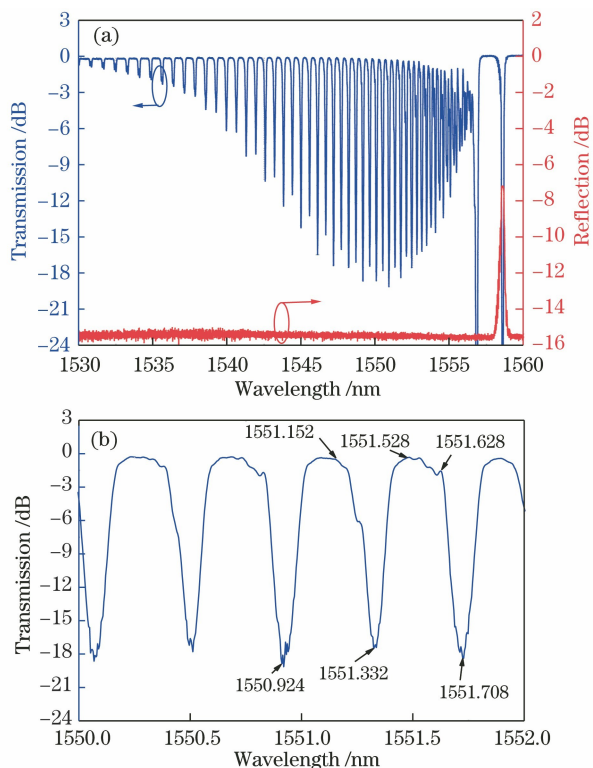


图 5 实验中使用的倾斜光栅光谱。(a)总体图;(b)局部图
Fig. 5 Measured spectrum of TFBG in SMF-28e.
(a) General vision; (b) enlarged vision

未加光栅时,端口 2 和端口 3 的功率(P_2, P_3)变化如图 6(a)所示。当注入功率 P_{in} 超过一定值时,端口 2 处的输出功率保持恒定,由端口 3 处监测得到的后向 Stokes 光功率迅速增长,其余注入光完全转换为后向 Stokes 光。将 TFBG 加入系统后,端口 2 和端口 3 的输出功率变化如图 6(b)所示。在相同的注入功率下,由端口 3 处监测到的后向 Stokes 光功率有明显降低,即意味着 TFBG 滤除了大部分后向光,并且系统最终的输出功率恒定值与未加入 TFBG 时一致。图 7 为计算得到的加入 TFBG 前后的后向功率滤除比。当注入功率为 130 mW 时,端口 2 处输出功率到达其恒定值,此时滤除比约为 18 dB。滤除比随注入功率的升高而降低,主要原因可能是 TFBG 的工作功率过小,导致测量误差较大所致。图 8 为计算得到的倾斜光栅插入损耗,在功率增长的线性区域,工作波长处倾斜光栅插入损耗与测量的光谱能够很好地对应,约 1.5 dB。通过改善制作技术,控制实验条件,降低 TFBG 的插入损耗,滤波效果将会进一步

的提升,这为窄线宽全光纤激光器中 SBS 后向光的滤除提供了一种实用的方法。

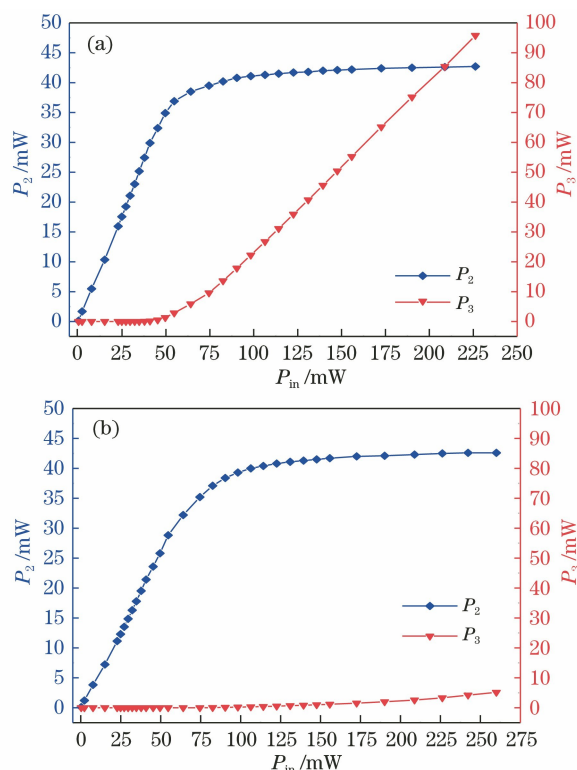


图 6 两种系统下的输出功率数据图。
(a)未加入 TFBG;(b)加入 TFBG

Fig. 6 Output power for two systems without and with TFBG.
(a) Without TFBG; (b) with TFBG

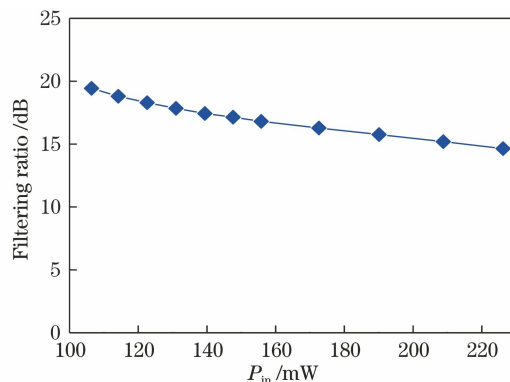


图 7 加入 TFBG 后的后向功率滤除比
Fig. 7 Filtering ratio of backward Stokes power after adding TFBG

4 结 论

提出一种利用 TFBG 滤除光纤中 SBS 产生的后向 Stokes 光的技术方案。为了验证该方案的有效性,自行设计并制备了与 1.5 μm 波段光纤激光精确匹配的 TFBG,搭建了实验系统,开展了验证性实验研究。结果表明,TFBG 对后向 Stokes 光有很好

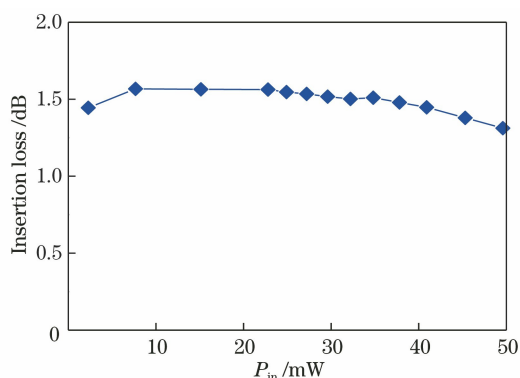


图 8 TFBG 的插入损耗

Fig. 8 Insertion loss generated in TFBG

的滤波效果,平均滤除率大于16 dB,可以有效地保护前级系统,同时不影响系统的正常工作。通过进一步改善刻写工艺,可以实现低损耗滤除。本文工作为高功率窄线宽光纤激光中 SBS 的滤除提供了新思路,通过合理设计 TFBG 和系统结构,有望进一步提升窄线宽光纤激光输出功率。

参 考 文 献

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited] [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63.
- [2] Nilsson J, Ramachandran S, Shay T M, et al. Introduction to the issue on high-power fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(1): 1-2.
- [3] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Huang L, Wu H S, Li R X, et al. 414 W near-diffraction-limited all-fiberized single-frequency polarization-maintained fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 1.
- [9] Dajani I, Angel F, Holten R, et al. Multi-kilowatt power scaling and coherent beam combining of narrow-linewidth fiber lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9728: 972801.
- [10] Yu C X, Shatrovov O, Fan T Y, et al. Diode-pumped narrow linewidth multi-kilowatt metalized Yb fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5202-5205.
- [11] 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.
- [12] Wang Y S, Ma Y, Sun Y H, et al. 2.62-kW, 30-GHz linearly polarized all-fiber laser with narrow linewidth and near-diffraction-limit beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1215001.
王岩山, 马毅, 孙殷宏, 等. 2.62 kW, 30 GHz 窄线宽线偏振近衍射极限全光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1215001.
- [13] Kobayakov A, Sauer M, Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, 2(1): 1-59.
- [14] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics: fifth edition* [M]. New York: Academic Press, 2015: 1-629.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Liu A P. Stimulated Brillouin scattering in single-frequency fiber amplifiers with delivery fibers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 15201-15209.
- [20] 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.
- [21] Robin C, Dajani I. Acoustically segmented photonic crystal fiber for single-frequency high-power laser applications [J]. *Optics Letters*, 2011, 36 (14): 2641-2643.
- [22] 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.
- [23] Naderi N A, Flores A, Anderson B M, et al. Beam combinable, kilowatt, all-fiber amplifier based on phase-modulated laser gain competition [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 3964-3967.
- [24] 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.