

## 基于长周期光纤光栅的受激拉曼散射滤波器

胡琪浩<sup>1,2</sup>, 赵晓帆<sup>1,2</sup>, 田鑫<sup>1,2</sup>, 李宏业<sup>1,2</sup>, 王蒙<sup>1,2,3\*</sup>, 王泽锋<sup>1,2,3\*</sup>, 许晓军<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;<sup>2</sup>脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;<sup>3</sup>高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

**摘要** 受激拉曼散射(SRS)是制约高功率光纤激光器功率提升和系统稳定性的重要因素,如何有效滤除和抑制 SRS 是需要解决的关键问题。长周期光纤光栅(LPFG)可将特定波长的纤芯模耦合到包层模实现宽带滤波,有效滤除 SRS 产生的 Stokes 光。首次采用 CO<sub>2</sub> 激光结合振镜扫描的方法在双包层光纤上制备了 LPFG,用于高功率光纤振荡器输出激光中拉曼信号的滤除和抑制,取得了较好的实验效果,Stokes 光的滤除率大于 15 dB,大大提升了输出激光的纯度和系统的稳定性。采用的制备方法对纤芯几乎不产生影响,理论上具有极低的信号光传输损耗,在高功率光纤激光系统中有重要的应用价值。

**关键词** 光纤光学;长周期光纤光栅;光纤激光器;受激拉曼散射;非线性光学

中图分类号 TN24

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1806003

## Stimulated Raman Scattering Filters Based on Long Period Fiber Gratings

Hu Qihao<sup>1,2</sup>, Zhao Xiaofan<sup>1,2</sup>, Tian Xin<sup>1,2</sup>, Li Hongye<sup>1,2</sup>, Wang Meng<sup>1,2,3</sup>,  
Wang Zefeng<sup>1,2,3\*</sup>, Xu Xiaojun<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China;<sup>2</sup>State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;<sup>3</sup>Hunan Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** Stimulated Raman Scattering (SRS) is the primary restrictive factor in the improvement of output power and stability of high-power fiber laser. Effective filtering and suppressing of SRS are a key dilemma that need resolution. To effectively filter the Stokes light caused by SRS, long period fiber grating (LPFG) can couple core mode with special wavelength to cladding modes to realize bandwidth filtering. Hence, the CO<sub>2</sub> laser beam combined with scanning galvanometer is used to fabricate LPFG on double cladding fiber to filter and suppress Raman signal in high-power optical fiber oscillator and an evident inhibition is achieved. Results show that the filtering ratio of Stokes light beyond 15 dB, the purity of signal laser and stability of the system have improved considerably. Because there is no effect on fiber core, theoretically, the proposed method has a very low signal optical transmission loss, which is of great value in high-power fiber laser.

**Key words** fiber optics; long period fiber grating; fiber laser; stimulated Raman scattering; nonlinear optics

**OCIS codes** 060.2340; 140.3510; 290.5910; 190.4370

收稿日期: 2021-01-11; 修回日期: 2021-03-29; 录用日期: 2021-04-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11974427, 12004431)、湖南省自然科学基金杰出青年科学基金(2019JJ20023)、脉冲功率激光国家重点实验室主任基金(SKL-2020-ZR05)

通信作者: \*zefengwang\_nudt@163.com

## 1 引言

光纤激光器由于转换效率高、光束质量好、结构紧凑、热管理方便等优点受到广泛的关注<sup>[1-3]</sup>。随着双包层光纤和半导体泵浦源制备工艺的不断发展,光纤激光器的输出功率水平得到飞速提升<sup>[4]</sup>。2013年,美国 IPG 公司报道了输出功率为 20 kW 的单模光纤激光放大器<sup>[5]</sup>;2020年,日本藤仓公司实现了 8 kW 光纤振荡器功率输出<sup>[6]</sup>。近几年,国内高功率光纤激光技术也得到飞速发展<sup>[7-8]</sup>。然而,受激拉曼散射(SRS)是制约光纤激光器功率进一步提升的重要因素<sup>[1-3]</sup>。一方面,当泵浦功率达到 SRS 阈值后,泵浦光会大量转化为 Stokes 光,限制功率进一步提升,降低激光效率和输出光束质量;另一方面,后向传输的 Stokes 光会对系统的稳定性造成重要影响。因此,为了进一步提升光纤激光输出功率和系统的稳定性,必须有效抑制 SRS 和滤除后向 Stokes 光。

到目前为止,用于抑制 SRS 的方法有很多,比如增大光纤模场面积<sup>[9-10]</sup>、采用后向泵浦结构<sup>[6]</sup>、使用特殊损耗光纤<sup>[11]</sup>、调节激光时域特性<sup>[12-13]</sup>、接入光纤滤波器件<sup>[14-15]</sup>等。其中,光纤滤波器件主要包括长周期光纤光栅(LPFG)和啁啾倾斜光纤布拉格光栅(CTFBG),都能将特定波长的纤芯模式耦合到包层中形成损耗,通过合理设计相关参数,能够同时滤除光纤中 SRS 产生的前向和后向 Stokes 光。最近研究表明,CTFBG 在滤除和抑制受激布里渊散射(SBS)产生的 Stokes 光方面也有巨大的潜力<sup>[16-18]</sup>。自本课题组 2017 年首次报道采用 CTFBG 滤除拉曼信号以来<sup>[14]</sup>,CTFBG 的制备和基于 CTFBG 的 SRS 抑制方法受到了极大的关注<sup>[14,19-24]</sup>。虽然在 SRS 的滤除和抑制中取得了较好的效果,但是目前的 CTFBG 都是通过光纤芯中形成折射率调制来实现模式耦合的,制备过程中不可避免会对纤芯中传输的信号光带来插入损耗,引起发热,因此如何降低插入损耗是高功率应用中需要解决的关键问题。CTFBG 存在的残余布拉格反射也会对工作性能产生很大的影响,比如高功率下容易激发随机拉曼激光等<sup>[25-26]</sup>。而 LPFG 可以通过包层折射率调制实现模式耦合,因此无需对纤芯进行处理,理论上对纤芯传输的光不会引发额外的插入损耗,也不存在布拉格反射,在高功率应用中非常有益。此外,与 CTFBG 不同,制备的 LPFG 对光纤的光敏性没有要求,也无需高温退火处理,制备工艺流程相对简单,在 SRS 抑制和 Stokes 光滤除中

有潜在的优势。2010年,耶拿大学 Nodop 等<sup>[15]</sup>首次验证了 LPFG 可以有效滤除 SRS 产生的 Stokes 光。2018年,该团队<sup>[27]</sup>又用飞秒激光在纤芯/包层直径为 20  $\mu\text{m}$ /400  $\mu\text{m}$  的大模场光纤上刻写了 LPFG,并将其应用到高功率光纤激光器中,但是这种 LPFG 谐振峰带宽较窄,对 SRS 的滤除效果有限。2020年,南京理工大学 Jiao 等<sup>[28]</sup>将紫外曝光法制备的 LPFG 用来滤除 SRS 产生的 Stokes 光,该方案与制备 CTFBG 类似,均需要较长时间载氢和退火处理。

本文首次采用  $\text{CO}_2$  激光结合振镜扫描的方式在 10  $\mu\text{m}$ /130  $\mu\text{m}$  双包层光纤上刻写 LPFG,并将制备的 LPFG 用于高功率光纤激光器中滤除 SRS。比起传统的逐点曝光刻写方法,采用振镜来控制  $\text{CO}_2$  激光束,使 LPFG 的刻写精度得到大幅提升。根据光纤的拉曼增益特性和 LPFG 的模式耦合特性,在理论上分析了 LPFG 滤除 Stokes 光的作用机理。搭建了高功率光纤激光系统,对所制备的 LPFG 进行了验证,实验结果显示这种 LPFG 对输出激光中的 SRS 信号有很强的滤波作用,滤除率约为 15 dB,大幅度提升了信号光纯度。此外,该方法制备时间短且对纤芯几乎不产生影响,因此制备的 LPFG 在使用时无需制冷封装,展现了巨大的应用潜力,为光纤激光器中 SRS 的滤除提供了新思路。

## 2 基本原理

SRS 的本质是介质材料的晶格振动与高强度光束相互作用造成的非弹性散射。对于一般熔融石英光纤来说,拉曼增益具有较宽的频率范围,其中频移量在 13.2 THz 左右存在较强的拉曼增益峰,如图 1 所示<sup>[9]</sup>。

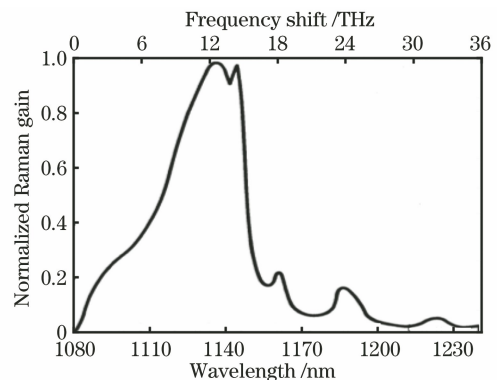


图 1 熔融石英的拉曼增益谱线<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Raman gain spectrum of fusion silica<sup>[9]</sup>

图 1 中上轴横坐标表示 Stokes 频移量,下轴表

示波长为 1080 nm 的信号光发生散射后对应各个频移量的波长,纵坐标表示归一化拉曼增益系数。从图 1 可以看出,对于 1080 nm 的激光来说,拉曼光的峰值波长在 1135 nm 左右。SRS 效应具有明显的阈值特性,只有当信号光功率超过一定的阈值时,泵浦光能量迅速转化为 Stokes 光能量。假设拉曼增益谱为洛伦兹型,则临界抽运功率  $P_{th}^{[9]}$  可近似表示为

$$P_{th} \approx 16 \frac{A_{eff}}{g_R L_{eff}}, \quad (1)$$

式中: $A_{eff}$  为光纤有效纤芯面积; $L_{eff}$  为光纤有效长度; $g_R$  为拉曼增益系数。

LPFG 通常是指折射率调制在亚 mm 级的光栅,能够将前向传输的纤芯基模耦合到前向传输的包层模,包层模再迅速衰减形成损耗,并且没有任何后向反射光。由于光纤中有许多高阶包层模,因此在 LPFG 的透射谱中可以看到多个分立的谐振峰,其谐振波长<sup>[29]</sup>为

$$\lambda = (n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl,i})\Lambda, \quad (2)$$

式中: $n_{eff}^{co}$  是纤芯模的有效折射率; $n_{eff}^{cl,i}$  是第  $i$  阶包层模的有效折射率; $\Lambda$  是 LPFG 的周期。相比较而言,CTFBG 虽然也是将纤芯模式耦合到包层中,但是依然存在后向反射光,在高功率光纤激光器中,即使微弱的后向反射光也会给激光器带来巨大的风险<sup>[25-26]</sup>。

为了使制备的 LPFG 能够满足实际 SRS 滤除需求,对 LPFG 进行仿真分析,所用光纤为双包层光纤(LMA-GDF-10/130-M, Nufern),设定纤芯直径为 11  $\mu\text{m}$ ,折射率为 1.4512,包层直径为 130  $\mu\text{m}$ ,折射率为 1.4491,纤芯数值孔径为 0.079,LPFG 的周期为 1012  $\mu\text{m}$ ,纤芯折射率调制为 0.00021。LPFG 的透射谱仿真结果如图 2 所示。不同的谐振峰对应纤芯基模和不同包层模之间的耦合,在 1080 nm 处信号光的损耗几乎可以忽略不计,LP<sub>02</sub> 包层模对应谐振峰的中心波长正好处于 SRS 增益峰值位置,理论上能将 SRS 产生的大部分 Stokes 光从纤芯耦合到包层中滤除。从光谱上可以看出,折射率调制越大,即谐振峰深度越深时,LPFG 对 SRS 的滤除效果越好。但是在实际制备过程中,LPFG 的折射率调制超过一定限度后会引引起过耦合,谐振峰深度反而下降。另外,LPFG 是通过 CO<sub>2</sub> 激光烧蚀包层形成的折射率周期性调制的,一旦烧蚀时间过长,容易导致纤芯中的光泄露,引起信号光插入损耗迅速增加。因此在光栅制备过程中需要综

合考虑谐振峰深度和信号光插入损耗,适当调节曝光时间。

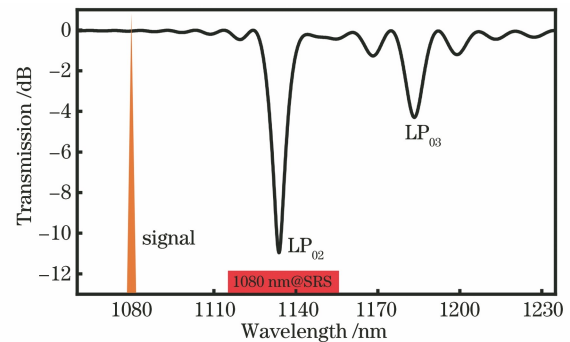


图 2 LPFG 的透射光谱仿真结果

Fig. 2 Simulation results of the transmission spectrum of LPFG

### 3 LPFG 的制备

LPFG 的刻写系统如图 3 所示,CO<sub>2</sub> 激光光束由高频扫描振镜控制,该系统对光束的控制精度极高、刻写速度较快、重复性好。相较普通基于电动位移平台的逐点曝光刻写法<sup>[30-31]</sup>,所提方法不需要精确地同时控制光纤移动和孔径光阑开关,理论上能够制备几乎没有插入损耗的高质量 LPFG<sup>[32]</sup>。在实际刻写中,CO<sub>2</sub> 激光的扫描速度为 40 mm/s,输出功率设定为 2.5 W,重复频率为 4 kHz/s,所制备 LPFG 的周期为 1012  $\mu\text{m}$ ,周期数为 60,扫描次数为 5。利用振镜控制光束来制备 LPFG 时,LPFG 的总长度要小于振镜的标刻范围。在本实验中,振镜的扫描区域为 10 cm  $\times$  10 cm,因此所制备 LPFG 的总长度小于 10 cm。图 3 为 LPFG 局部显微照片,光纤包层上表面受到 CO<sub>2</sub> 激光曝光的部位气化,形成周期性凹槽,光纤纤芯应力在凹槽处得到释放,导致折射率发生调制进而形成 LPFG。

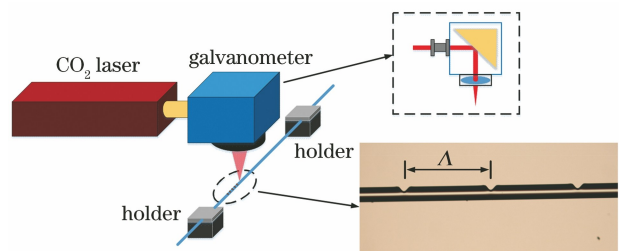


图 3 LPFG 的刻写系统示意图

Fig. 3 Schematic of LPFG lithography system

所制备 LPFG 的透射谱如图 4 所示,多个谐振峰分别对应纤芯模与不同包层模式的耦合,该光栅在 1136 nm 的谐振峰深度为 16.4 dB 且 3 dB 带宽约为 27 nm,对信号光的损耗约为 0.6 dB。由于所

用光纤折射率和仿真所用参数之间的误差、纤芯包层轴线偏差等因素,实际 LPFG 透射谱中谐振峰的幅值和波长与仿真结果略有偏差,但是谐振峰的带宽要大于仿真结果中的带宽。主要原因是仿真结果是理想折射率调制情况下的透射谱,即折射率仅沿纤芯轴向调制,纤芯横截面折射率变化是均匀的。这种情况下发生耦合的只有与纤芯基模相同对称性的包层模式(如  $LP_{02}$ ,  $LP_{03}$ ),而实际纤芯截面折射率调制虽然无法精确定量分析,但是从图 3 可以看出,由于所制备的 LPFG 是  $CO_2$  激光单侧曝光形成折射率调制的,纤芯截面折射率变化很难呈现均匀分布,与基模不同对称性的模式也有可能发生耦合,从而导致谐振峰有一定展宽。

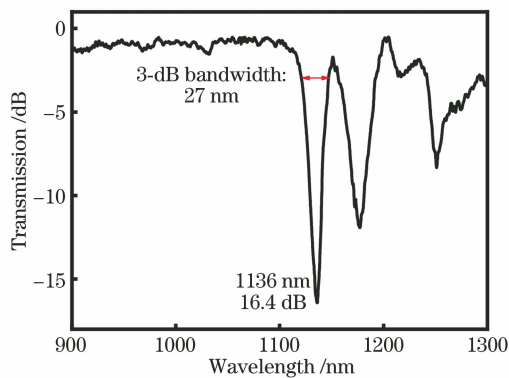


图 4 所制备的 LPFG 透射光谱

Fig. 4 Measured transmission spectrum of fabricated LPFG

## 4 实验结果与分析

为了验证 LPFG 对光纤激光器中 Stokes 光的滤除效果,搭建了如图 5 所示的光纤激光系统。掺镱光纤(YDF)激光振荡器的输出波长为 1080 nm,采用 2 个 130 W 功率的 976 nm 激光二极管(LD)作为泵浦源,光纤合束器(combiner)的输出尾纤、高反射率光栅(HR,反射率为 99.5%,带宽为 3 nm)、低反射率光栅(OC,反射率为 10%,带宽为 0.2 nm)均为  $10 \mu\text{m}/130 \mu\text{m}$  大模场双包层光纤,增益光纤(LMA-YDF-10/130, Nuferrn)长度为 6 m。为了更好地验证 LPFG 的效果,实验中在振荡器腔内增加了一段 70 m 长的被动光纤以增强 SRS。采用包层光滤除器(CPS)滤除残余的包层光。激光器的最终输出光纤端面切  $8^\circ$  斜角并固定在三维调节台上,保证接入 LPFG 前后的所测功率的准确性。比较了光纤激光器接入 LPFG 前后的输出光谱和功率,以此分析 LPFG 对 SRS 的滤除效果和对激光输出性能的影响。

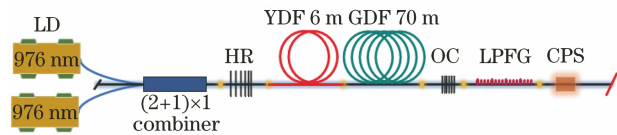


图 5 LPFG 滤除 SRS 实验装置示意图

Fig. 5 Schematic of experimental setup for filtering SRS using LPFG

在未加入 LPFG 时,光纤振荡器的输出光谱如图 6(a)所示,当输出功率约为 56 W 时,可以从光谱上看到较明显的 SRS 功率,在输出功率为 123 W 情况下信号光和 SRS 的峰值差值约为 15 dB。接入 LPFG 之后,光纤激光器的输出光谱如图 6(b)所示,当输出功率约为 108 W 时,才能看到微弱 SRS 功率,此时信号光和 SRS 的峰值差值约为 30 dB。图 6(c)、(d)分别显示了最大泵浦功率下接入 LPFG 前后 SRS 光谱的对比和接入 LPFG 后的 SRS 抑制比,可以看出,LPFG 对 SRS 的抑制比约为 15 dB。

为了进一步定量分析接入 LPFG 后对光纤激光输出性能的影响,从输出功率方面进行分析。图 7(a)显示了接入 LPFG 前后光纤激光的总输出功率,可以看出随着 LPFG 的接入,总输出功率有一定的下降,下降的部分主要包括信号光的插入损耗和被滤除的 Stokes 光功率。值得注意的是,当接入 LPFG 后,振荡器的总输出功率在 100 W 附近斜率有所变化,主要是由于高功率状态下信号光占比变小,而占比增大的 Stokes 光几乎全部被 LPFG 滤除,从总功率方面验证了 LPFG 对 Stokes 光滤除的有效性。接着对图 6(a)、(b)所示的输出光谱进行光谱积分,计算出了不同泵浦功率下的信号光功率占比,如图 7(b)所示。可以看出输出功率在 80 W 以上且未接入 LPFG 时,随着泵浦功率的增加,信号光功率占比急剧下降;当接入 LPFG 后信号光功率占比仅在最大泵浦时有轻微下降。在算出信号光功率占比的条件下,结合图 7(a)所示的总输出功率,即可计算出输出功率中的 Stokes 光功率和信号光功率,分别如图 7(c)、(d)所示。从图 7(c) Stokes 光功率可知,LPFG 在很大程度上滤除了 Stokes 功率,提升了信号光纯度。从图 7(d)可以看出,由于接入 LPFG 带来的插入损耗,信号光功率要略低于未接 LPFG 的信号光功率,在高功率状态下接入 LPFG 对信号光功率有一定的提升作用。此外在实验过程中发现,在最高输出功率下 LPFG 的温度不超过  $30^\circ\text{C}$ ,可以推测这种输出功率量级还远远没有

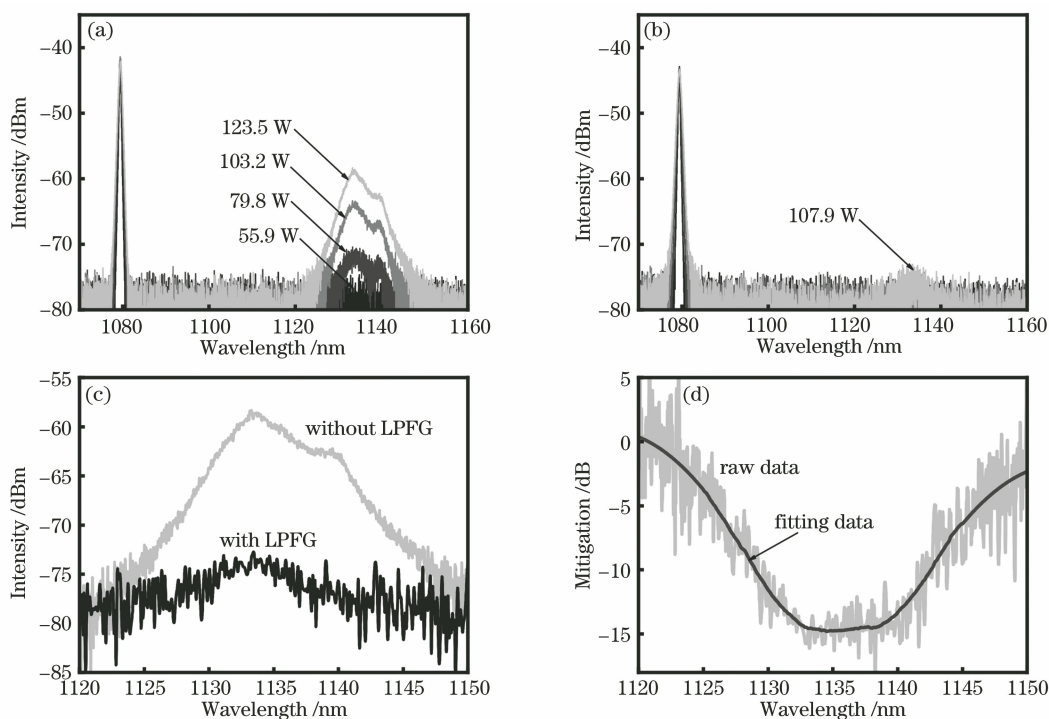


图 6 光纤振荡器的输出光谱。(a)未加入 LPFG 时的输出光谱;(b)加入 LPFG 后的输出光谱;  
(c)接入 LPFG 前后 SRS 光谱对比;(d)接入 LPFG 后 SRS 抑制比

Fig. 6 Output spectra of optical fiber oscillator. (a) Output Spectra without LPFG; (b) output spectra with LPFG;  
(c) comparison of SRS spectra with and without LPFG; (d) SRS rejection ratio with LPFG

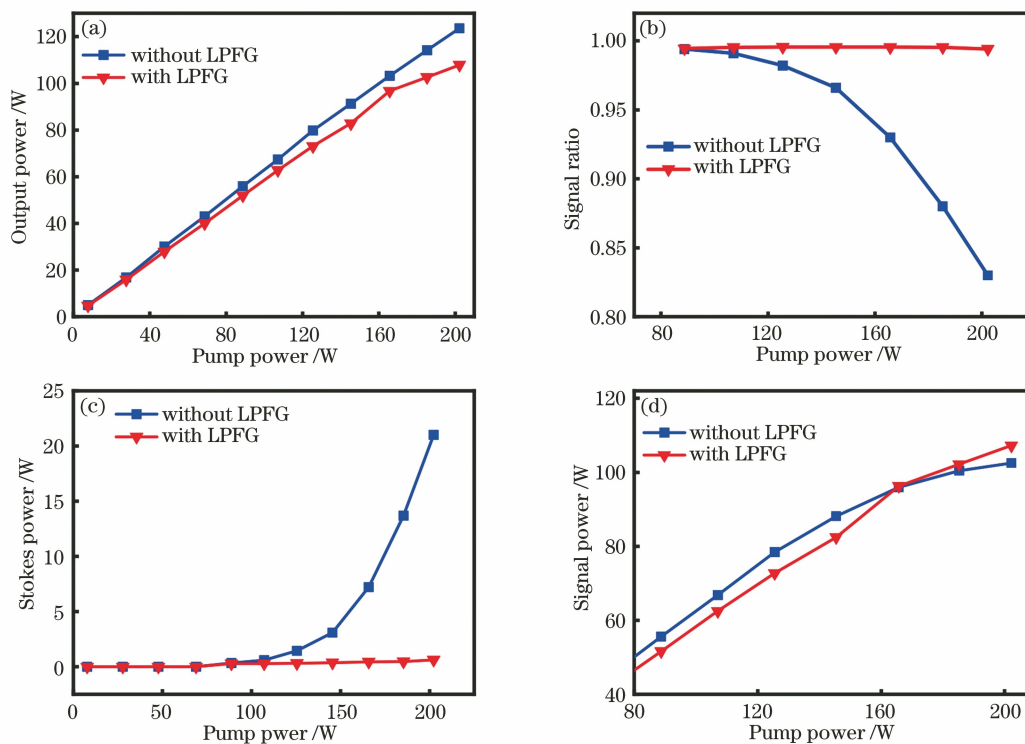


图 7 接入 LPFG 前后激光器输出性能。(a)光纤激光器的总输出功率对比;(b)信号光功率占比对比;  
(c) Stokes 功率对比;(d)信号光功率对比

Fig. 7 Output performance of fiber laser with and without LPFG. (a) Comparison of total output power of fiber laser;  
(b) comparison of signal ratio; (c) comparison of Stokes power; (d) comparison of signal power

达到 LPFG 的承载极限。实验结果证明了 LPFG 在滤除 SRS 方面存在巨大的应用价值,可以通过进一步改进刻写工艺,降低 LPFG 的插入损耗和增大谐振峰的深度来提高对 SRS 的滤除效果。

## 5 结 论

利用 CO<sub>2</sub> 激光结合扫描振镜的方法在双包层光纤上制备了 LPFG,并用该 LPFG 滤除光纤激光器中的 SRS,为高功率连续光纤激光器中 SRS 的滤除提供了新方法。从理论上讨论了 LPFG 滤除 SRS 的可能性,并制备了谐振峰与拉曼增益峰对应的 LPFG。为了验证该方案的有效性,搭建了单模光纤高功率光纤振荡器开展验证性实验研究。在实际测试中,LPFG 尽管没有封装制冷,但仍然展现了极低的功率温升系数,具备承载更高功率的潜力。实验结果表明:LPFG 对 SRS 产生的 Stokes 光有很好的滤除效果,平均滤除率大于 15 dB,能够很大程度提高信号光纯度。通过进一步改善制备工艺,可以让信号光的损耗更小的同时提升 SRS 的滤除效果。

## 参 考 文 献

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [2] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [3] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 219-241.
- [4] Wang X L, Zhang H W, Yang B L, et al. High-power ytterbium-doped fiber laser oscillator: current situation and future developments [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401004.  
王小林, 张汉伟, 杨保来, 等. 高功率掺镱光纤振荡器: 研究现状与发展趋势[J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401004.
- [5] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]//CLEO: Science and Innovations 2013, June 9-14, 2013, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2013: AF2J.1.
- [6] Wang Y, Kitahara R, Kiyoyama W, et al. 8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11260: 1126022.
- [7] Yang B L, Wang X L, Ye Y, et al. The output power of the all fiber laser oscillator break through to 6 kW[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0116001.  
杨保来, 王小林, 叶云, 等. 全光纤激光振荡器输出功率突破 6 kW[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0116001.
- [8] Chen X L, He Y, Xu Z W, et al. Theoretical and experimental investigation of a 10-kW high-efficiency 1070-nm fiber amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1006001.  
陈晓龙, 何宇, 徐中巍, 等. 10 kW 高效率 1070 nm 光纤放大器的理论与实验研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1006001.
- [9] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. 5th ed. New York: Academic Press, 2013: 295-352.
- [10] Wang Y, Xu C Q, Po H. Analysis of Raman and thermal effects in kilowatt fiber lasers [J]. *Optics Communications*, 2004, 242(4/5/6): 487-502.
- [11] Kim J, Dupriez P, Codemard C, et al. Suppression of stimulated Raman scattering in a high power Yb-doped fiber amplifier using a W-type core with fundamental mode cut-off[J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 5103-5113.
- [12] Liu W, Ma P F, Lü H B, et al. General analysis of SRS-limited high-power fiber lasers and design strategy[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26715-26721.
- [13] Xu H Y, Jiang M, Shi C, et al. Spectral shaping for suppressing stimulated-Raman-scattering in a fiber laser[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3538-3542.
- [14] 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.
- [15] Nodop D, Jauregui C, Jansen F, et al. Suppression of stimulated Raman scattering employing long period gratings in double-clad fiber amplifiers [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(17): 2982-2984.
- [16] Tian X, Zhao X F, Wang M, et al. Suppression of stimulated Brillouin scattering in optical fibers by tilted fiber Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(17): 4802-4805.
- [17] 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.
- [18] Tian X, Zhao X F, Wang M, et al. Suppression of

- stimulated Brillouin scattering in fiber using the tilted fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1706001.
- 田鑫, 赵晓帆, 王蒙, 等. 基于倾斜 FBG 的光纤受激布里渊散射抑制[J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1706001.
- [19] 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): 1706001.
- 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): 1706001.
- [20] Wang M, Li Z X, Liu L, et al. Suppression of stimulated Raman scattering in two-stage high-power 1090 nm fibre amplifier using chirped and tilted fibre Bragg gratings [J]. *Laser Physics*, 2018, 28(12): 125102.
- [21] Wang M, Liu L, Wang Z F, et al. Mitigation of stimulated Raman scattering in kilowatt-level diode-pumped fiber amplifiers with chirped and tilted fiber Bragg gratings [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7: e18.
- [22] Wang M, Wang Z F, Liu L, et al. Effective suppression of stimulated Raman scattering in half 10 kW tandem pumping fiber lasers using chirped and tilted fiber Bragg gratings [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 167-171.
- [23] Wang Z F, Wang M, Hu Q H. Filtering of stimulated Raman scattering in a monolithic fiber laser oscillator using chirped and tilted fiber Bragg gratings [J]. *Laser Physics*, 2019, 29(7): 075101.
- [24] Jiao K R, Shu J, Shen H, et al. Fabrication of kW-level chirped and tilted fiber Bragg gratings and filtering of stimulated Raman scattering in high-power CW oscillators [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7: e31.
- [25] Antipov O, Kuznetsov M, Alekseev D, et al. Influence of a backward reflection on low-threshold mode instability in  $\text{Yb}^{3+}$ -doped few-mode fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14871-14879.
- [26] Tian X, Zhao X F, Wang M, et al. Influence of Bragg reflection of chirped tilted fiber Bragg grating on Raman suppression in high-power tandem pumping fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(13): 19508-19517.
- [27] Heck M, Bock V, Krämer R G, et al. Mitigation of stimulated Raman scattering in high power fiber lasers using transmission gratings [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10512: 105121I.
- [28] Jiao K R, Shen H, Guan Z W, et al. Suppressing stimulated Raman scattering in kW-level continuous-wave MOPA fiber laser based on long-period fiber gratings [J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6048-6063.
- [29] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(1): 58-65.
- [30] Davis D D, Gaylord T K, Glytsis E N, et al.  $\text{CO}_2$  laser-induced long-period fibre gratings: spectral characteristics, cladding modes and polarisation independence [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(14): 1416-1417.
- [31] Zhu Y N, Shum P, Chong J H, et al. Deep-notch, ultracompact long-period grating in a large-mode-area photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(24): 2467-2469.
- [32] Wang Y P. Review of long period fiber gratings written by  $\text{CO}_2$  laser [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(8): 081101.