

光纤光栅在高功率连续光纤激光器中的发展及展望

沈 华^{1,2}, 朱日宏^{1,2*}, 卞殷旭^{1,2}

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;
2. 南京理工大学 先进固体激光工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘 要: 目前光纤光栅在高功率连续光纤激光器中的应用主要有两个方面, 一是作为谐振腔腔镜, 二是用来抑制激光器的非线性效应。首先论述了光纤光栅作为腔镜技术的发展现状, 然后着重论述了能够抑制光纤激光器中非线性效应的特殊光纤光栅的发展状况。并详细描述了倾斜布拉格光纤光栅抑制受激拉曼散射和受激布里渊散射、长周期光纤光栅抑制受激拉曼散射以及相移长周期光纤光栅抑制自相位调制或四波混频等非线性效应引起的光谱展宽的研究进展。最后展望了光纤光栅在高功率光纤激光器领域的发展趋势, 认为光纤光栅将朝着更高承载功率与长波长方向发展, 同时认为基于飞秒激光刻写的光纤光栅技术、能够同时抑制多种非线性效应的光纤光栅技术、以及基于光纤光栅的光纤激光器激光偏振控制技术等将成为新的研究热点。

关键词: 高功率光纤激光器; 光纤光栅; 谐振腔腔镜; 非线性效应抑制

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210908

Development and prospect of fiber grating in high-power continuous fiber laser

Shen Hua^{1,2}, Zhu Rihong^{1,2*}, Bian Yinxu^{1,2}

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. MIIT Key Laboratory of Advanced Solid Laser, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: At present, the applications of fiber gratings in high-power fiber lasers mainly include two aspects, be used as cavity mirrors and to suppress nonlinear effects. The development of fiber gratings as cavity mirror was discussed firstly, and then the applications of special structure fiber gratings with nonlinear effects suppression function was focused on. The stimulated Raman scattering and stimulated Brillouin scattering suppression method were introduced based on tilted fiber Bragg grating in detail. And the feasibility of suppressing stimulated Raman scattering by long-period fiber grating was also discussed. Further, a novel method of suppressing self-phase modulation or four-wave mixing by utilizing phase-shifted long-period fiber grating was presented. Finally, a prospect of the applications of fiber gratings in high-power fiber laser was provided. Higher power durability and longer wavelength were the definite development directions. And also considered that the femtosecond laser lithography technology, cascaded fiber grating that can suppress multiple nonlinear effects, and polarization control technology based on special structure fiber gratings will become a new research hotspot.

Key words: high-power fiber laser; fiber grating; cavity mirror; nonlinear effects suppression

收稿日期: 2021-11-25; 修订日期: 2021-12-22

基金项目: 国家重点研发计划 (2019 YFB1108302); 江苏省重点研发计划 (BE2019114); 江苏省自然科学基金 (BK20201305)

作者简介: 沈华, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事高功率光纤激光器及高功率光纤光栅方面的研究。

通讯作者: 朱日宏, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事先进固体激光技术、光学测试技术与理论、光学图像处理与压缩等方面的研究。

0 引言

光纤光栅是通过紫外或飞秒激光刻写^[1,2]等方法使光纤纤芯中形成周期性折射率调制的新型光无源器件^[3],具有波长选择性好、灵敏度高、光纤兼容性好等优点^[4]。按周期大小可以分为短周期光纤光栅,即光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG),周期通常小于 1 μm;长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)的周期一般在几微米到几百微米之间^[5-7]。随着光纤光栅制作工艺的日趋成熟,目前已经被广泛应用于光纤通信与光纤传感^[8-9]等领域。

近年来,高功率光纤激光器发展迅速,在高端制造、国防科技、基础科研^[10-12]等领域应用前景广阔。由于光纤光栅具有振荡选频的作用^[13],其在光纤激光器中的应用首先是作为谐振腔的腔镜,推动了光纤激光器全光纤化的发展,提高了系统的稳定性和实用性^[14]。随着近几年科研人员的研究,发现激光非线性效应的产生限制了光纤激光器的功率进一步提升^[15],而特殊结构的光纤光栅的滤波特性正好能对非线性效应进行有效抑制^[16],因此利用光纤光栅抑制激光的非线性效应成为新的研究热点。

1 腔镜用光纤光栅的发展

1978年,加拿大渥太华通信研究中心的 Hill K O 等人首次利用驻波法在掺锗石英光纤中制成光纤布拉格光栅^[17],并且于 1993 年提出了相位掩模法,利用

紫外光透过相位掩模板的±1 级衍射光形成的干涉条纹对具有光敏性的光纤进行刻写^[18],极大程度降低了光纤光栅的制作成本,推动了光纤光栅的应用与工业化进程。2000 年,IPG 公司首次利用 FBG 代替空间光学元件的腔镜实现了百瓦级全光纤结构的光纤激光器,自此作为谐振腔腔镜使用的 FBG 受到了科研工作者的广泛关注^[1,19-23]。作为一种低损耗的光纤器件,FBG 具有较好的波长选择性^[24],因此选用具有高功率承载特性的光纤光栅作为高功率光纤激光器的谐振腔腔镜不仅能够简化激光器的结构,而且能够提高激光器的信噪比和稳定性,使得激光器的输出功率更高、波长更稳定、光谱带宽更窄、同时输出光束质量更好,因此被誉为高功率光纤激光器的“心脏”。

选用高功率光纤光栅作为谐振腔腔镜的高功率光纤激光器的结构方案主要有两种:光纤振荡器结构与主振荡器加功率放大器的 MOPA 结构。图 1 所示为典型的高功率全光纤振荡器结构,其谐振腔由一对 FBG 与增益介质构成,包括反射率大于 99% 的高反光栅(High-Reflector FBG, HRFBG)以及反射率约为 10% 的输出低反光栅(Output-Coupler FBG, OCFBG),增益介质通常采用掺镱光纤(Ytterbium-Doped Fiber, YDF)。光纤纤芯中的 Yb³⁺ 离子吸收泵浦源能量后会从基态跃迁到激发态,从而实现粒子数反转,对于能级跃迁产生的自发辐射光,光纤光栅构成的谐振腔的选频作用会使得特定波长的自发辐射光被振荡放大,从而实现高功率激光输出。

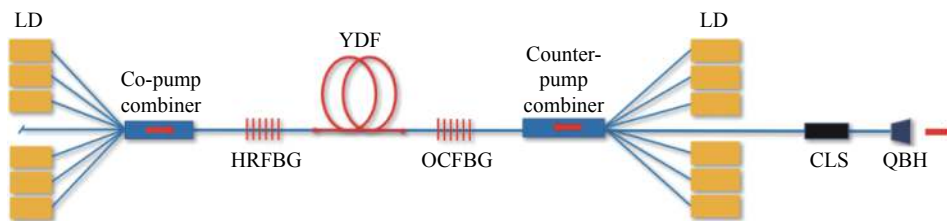


图 1 光纤振荡器结构示意图(LD: 半导体激光器, HRFBG: 高反光栅, YDF: 掺镱光纤, OCFBG: 低反光栅, CLS: 包层光剥离器, QBH: 输出端帽)

Fig.1 Schematic diagram of fiber oscillator structure (LD: Laser diode, HRFBG: High reflector FBG, YDF: Ytterbium-doped fiber, OCFBG: Output-coupler FBG, CLS: Cladding light stripper, QBH: Quartz block head)

目前,腔镜用光纤光栅技术已经相当成熟,而且已可以批量生产制作并在激光产业界得到了大范围应用。其中国外生产高功率光纤光栅的公司主要为

加拿大的 ITF 公司和 Teraxion 公司,这两家公司在售的高功率光纤光栅信号光承载功率均大于 3 kW。国内近年来诸多团队也攻克了腔镜用高功率光纤光栅

的研制技术,其中南京理工大学自主研制的高功率光纤光栅功率承载特性可达 5 kW,并且其光纤光栅产品已在武汉锐科、山东海富等单位成功应用;珠海光库科技股份有限公司自主研发了 ClearCut™ 无封装高功率光纤光栅,信号光承载功率为 3 kW;长飞光纤光缆股份有限公司研制的高功率光纤光栅的信号光承载功率也可达 3 kW。

现在对于腔镜用光纤光栅的研究主要集中在光栅参数(反射率、带宽、中心波长、温度系数等)优化方面,当其运用到高功率光纤激光器中时,这些参数会影响光纤激光器的光光转化效率、输出光谱、回光功率等。南京理工大学研究了 OCFBG 对光纤激光器光谱的展宽影响,分别从带宽及反射率对激光器输出光谱展宽影响两个方面进行了实验验证^[25];并且提出一种基于菲涅耳反射原理,获得反射谱测量 OCFBG 反射率的方法。通过实验对该方法进行了验证,结果表明该方法的测量精度和稳定性有了显著提高,测量相对误差小于 1%。同时提出了使用折射率匹配液的方法^[26],解决了带宽测量不准确的问题。对于光纤激光器谐振腔内振荡的激光受限于光纤光栅的光谱宽度这一问题,天津大学探究了光纤光栅对的参数匹配对激光输出特性的影响,采取了两组不同参数光纤光栅对组合,从实验上分别探究了 OCFBG 的光谱带宽以及反射率对激光输出特性的影响,最后得出了光纤光栅对的优化参数与匹配原则,为提高连续光纤激光器的激光输出特性提供了理论支撑^[27]。国防科技大学建立了基于自相位调制效应的掺 Yb 光纤激光器输出光谱特性的解析模型^[28],实验分析了不同功率下的输出光谱形态变化以及光纤光栅对输出光谱的展宽影响,对高功率光纤激光器的设计以及应用提供了有效的理论支持与参考。

总体来说,国外腔镜用高功率光纤光栅技术研究起步较早,且在这一领域处于领先地位。国内也越来越多地出现了能生产高功率光纤光栅的公司,并已经攻克了千瓦级以上高功率光纤光栅的批量制作工艺,同时建立了相应的质量保证体系,产品也已在国内诸多激光器公司得到广泛应用,从而推动了我国光纤激光器产业的自主可控。

2 抑制激光非线性效应的光纤光栅技术发展

当连续光纤激光器的功率达到千瓦级以上时,纤芯中极高的光功率密度会导致诸如受激拉曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)、受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)、自相位调制(Self-Phase Modulation, SPM)、四波混频(Four-Wave Mixing, FWM)等严重的非线性效应^[29]。这些非线性效应主要影响激光的纵模(光谱维度)特性,会引起激光器输出光谱发生严重展宽并产生非信号激光光谱成分,从而导致信号激光(工作波长处的激光)功率与光束质量大幅下降,是限制高功率连续光纤激光器输出功率进一步提升的关键因素。因此,国内外研究学者对如何抑制激光非线性效应做了大量研究,并提出了很多抑制方法,其中基于特殊结构的光纤光栅抑制技术成为近年来的研究热点。

2.1 抑制 SRS、SBS 效应的倾斜布拉格光纤光栅

1996 年,美国罗切斯特大学的 Erdogan^[3] 等人首次提出了用紫外曝光法在光敏光纤上刻写倾斜布拉格光纤光栅(Tilted Fiber Bragg Grating, TFBG),随后被广泛应用于传感领域^[30-33]。

继倾斜光纤光栅在传感和通信领域大量应用后,国防科技大学于 2017 年首次提出利用啁啾倾斜布拉格光纤光栅(Chirped and Tilted Fiber Bragg Grating, CTFBG)抑制光纤激光器系统的 SRS^[34]。CTFBG 是短周期光纤光栅的一种,如图 2 所示,它与啁啾布拉格光纤光栅(Chirped Fiber Bragg Grating, CFBG)的区别在于其栅面与光纤轴向存在一个夹角 θ ,故可以将前向传输的纤芯模耦合至后向传输的包层模^[33]。因此通过控制光纤光栅的周期与倾斜角度使 CTFBG 的中心波长与 SRS 效应激发的斯托克斯光波长相匹配,便能够将 SRS 信号激光从纤芯耦合至包层,并由包层光剥离器从系统中剥除,最终实现对 SRS 效应的抑制。同时该团队采用紫外光刻结合旋转相位掩模板的方法实现了 20/400 的光敏光纤上制作 CTFBG,其刻写系统如图 3 所示^[35]。准分子激光器发射 248 nm 的紫外光经反射镜后通过柱透镜聚焦,透过相位掩模板发生衍射, ± 1 级衍射光在光纤上形成干涉条纹,进而在纤芯中实现周期性的折射率调制,从而完成 CTFBG

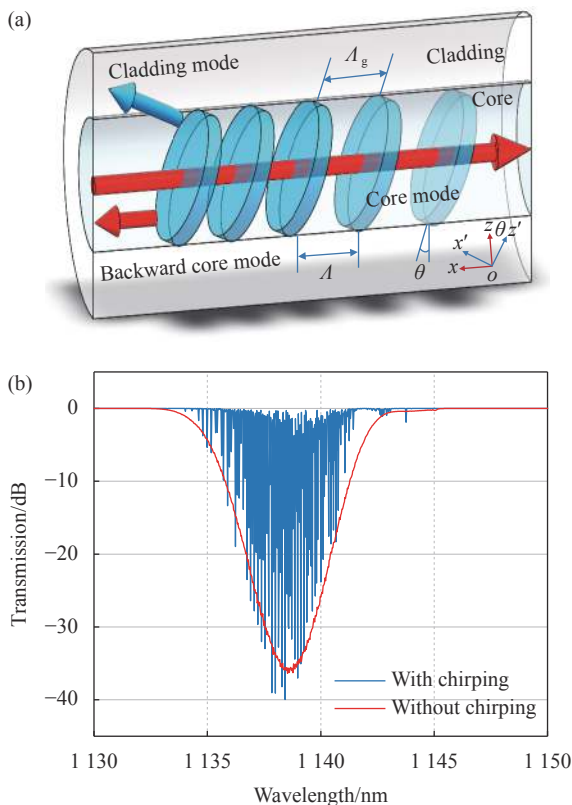


图 2 (a) CTFBG 结构示意图; (b) 倾斜角度为 4° 的 TFBG 和 CTFBG 透射光谱仿真且 CTFBG 的啁啾率为 0.3 nm/cm^[33]

Fig.2 (a) Schematic diagram of CTFBG structure; (b) Simulation of transmission spectra of TFBG and CTFBG with a tilt angle of 4°, and the chirp rate of CTFBG is 0.3 nm/cm^[33]

的刻写过程。该光栅制备工艺技术简单、参数改变灵活、成本较低且重复性好。

同时,国防科技大学将 CTFBG 应用于光纤激光器中,实现了最大泵浦功率为 36 W 的单包层连续

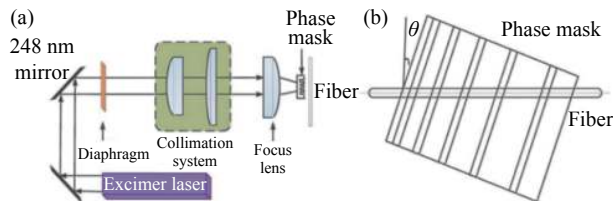


图 3 (a) 基于紫外脉冲激光与相位掩模板的刻写系统; (b) 光纤内部 CTFBG 结构^[35]

Fig.3 (a) Writing system based on ultraviolet pulse laser and phase mask; (b) CTFBG structure inside the fiber^[35]

光纤激光器中 SRS 效应的抑制,抑制效果达到 25 dB (99.6%)^[34],并且于 2019 年将其应用于 2 kW 与 5 kW MOPA 光纤激光器的种子源中,对种子源产生的 SRS 效应取得了良好的抑制效果^[36-37],如图 4 所示。但由于当时的 CTFBG 还不具有承载高功率激光的特性,还无法应用于高功率光纤激光器的振荡级或放大级中进行 SRS 效应的抑制,但单腔振荡型光纤激光系统或高功率 MOPA 系统中放大级的 SRS 效应抑制却是工业和国防应用的亟需。

针对 CTFBG 无法承载高功率激光的难题,南京理工大学于 2019 年提出了低温缓变结合高温渐变的新退火方法对 CTFBG 进行了热处理,解决了光栅栅区在高功率下发热的问题,并且提出了采用分段化学腐蚀法的包层光剥离技术,解决了光栅入射端涂覆层在高功率下发热的问题,如图 5 所示。首次研制出既能够承载千瓦级信号激光,又能有效抑制光纤激光器中 SRS 效应的 CTFBG,其信号光承载功率超过 1000 W,温度系数低于 0.015 °C/W^[33, 38]。

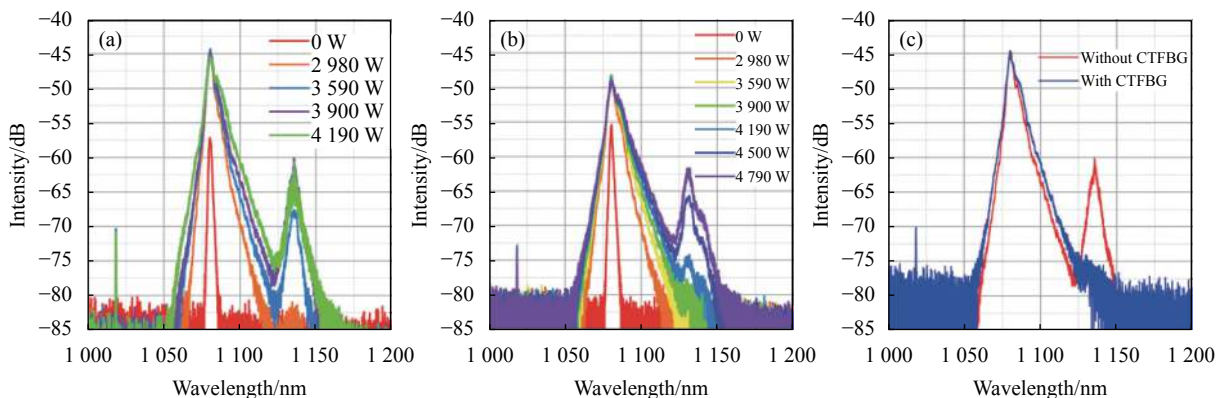


图 4 随着泵浦功率的增加,输出频谱发生变化。(a) CTFBG 放置前光谱; (b) CTFBG 放置后光谱; (c) 泵浦功率为 3490 W 时比较^[37]

Fig.4 With the increase of pump power, the output spectrum changes. (a) Spectrum before CTFBG is placed; (b) Spectrum after CTFBG is placed; (c) Comparison when the pump power is 3490 W^[37]

同时,南京理工大学团队利用其自主研发的千瓦级连续振荡型光纤激光器对其研制的 CTFBG 的光谱特性、承载功率、温度系数、插入损耗以及 SRS 效应抑制效果进行了测试。图 6 所示为对 SRS 效应抑制的测试结果,CTFBG 承载功率达到 1 kW,温度系数优于 0.015 °C/W,插入损耗优于 3%,SRS 的抑制效果大于 23 dB,超过 95%^[33]。

为了解决单个 CTFBG 抑制 SRS 效应带宽不够的问题,2021 年,中国工程物理研究院激光聚变研究中心研制出一种由五段连续的 CTFBG 组成的级联式 MCTFBG (Multi-CTFBG),该种新类型 CTFBG 的 3 dB 线宽达到 14 nm。该团队将其应用于 3.4 kW 的 MOPA 型光纤激光器系统中抑制 SRS 效应,实验结果表明 SRS 效应的抑制比为 15 dB,且该种光纤光栅的温度

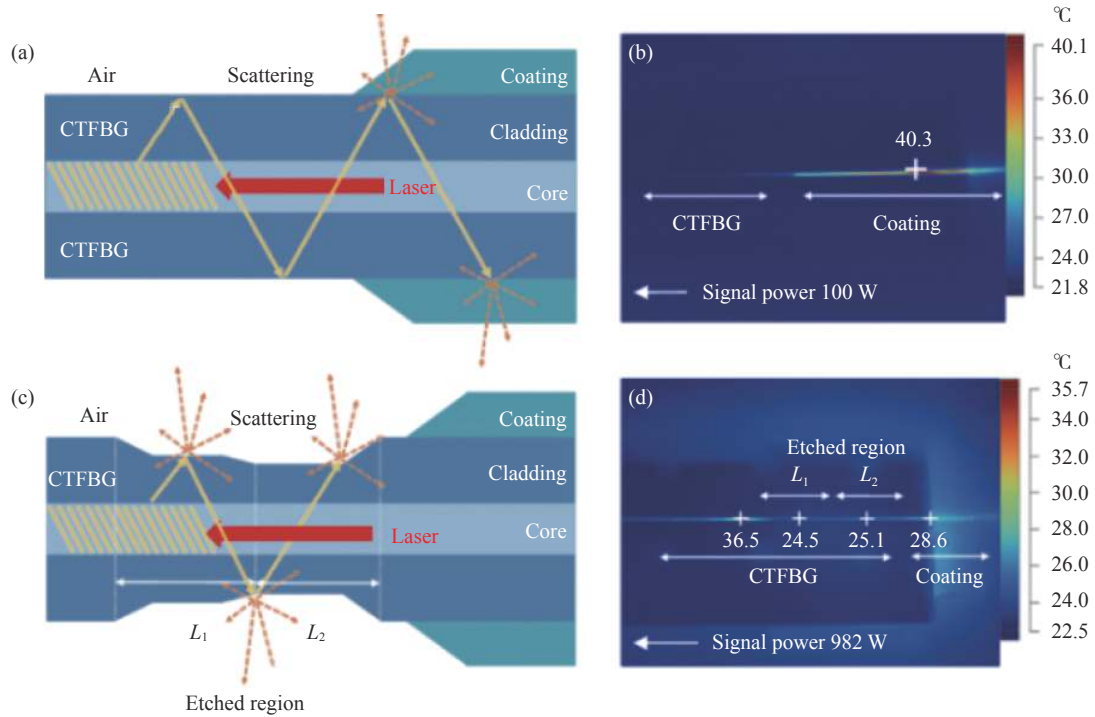


图 5 (a) CTFBG 腔内端光纤涂层发热的原理示意图; (b) 未进行包层腐蚀处理的 CTFBG 热像图; (c) 对 CTFBG 包层进行分段腐蚀处理的原理示意图; (d) 经包层腐蚀处理后的 CTFBG 的热像图^[33]

Fig.5 (a) Schematic diagram of the heating principle of the fiber coating at the inner end of the CTFBG cavity; (b) Thermal image of the CTFBG without cladding corrosion treatment; (c) Schematic diagram of the stepwise corrosion treatment of the CTFBG cladding; (d) Thermal image of CTFBG after cladding corrosion treatment^[33]

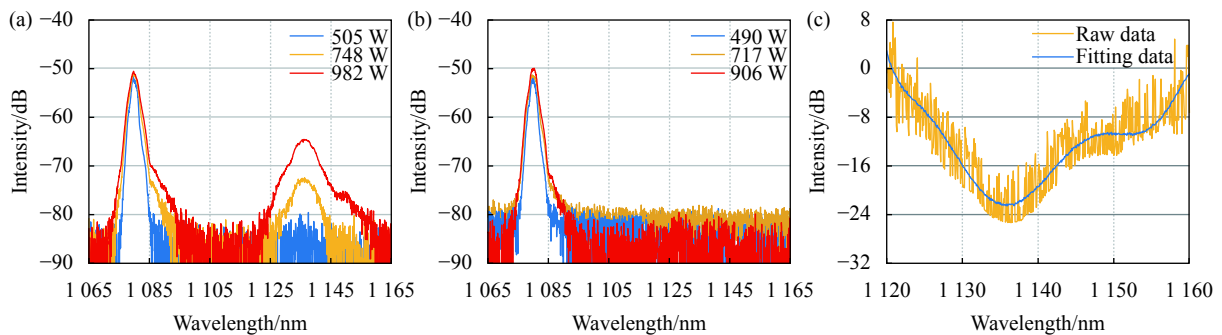


图 6 (a) 系统接入 CTFBG 之前的输出光谱; (b) 系统接入 CTFBG 之后的光谱; (c) 加入 CTFBG 前后 SRS 波段光谱差值^[33]

Fig.6 (a) Output spectrum before the system is connected to CTFBG; (b) Spectrum after the system is connected to CTFBG; (c) Difference between the SRS band spectra before and after CTFBG is added^[33]

系数约为 $1.48\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{kW}^{[39]}$ 。

对于高功率窄线宽光纤激光系统,除了 SRS 效应, SBS 效应也是制约其功率提升的主要因素。随着激光功率的提升,一旦达到 SBS 效应的阈值,前向激光功率将出现滞涨现象,注入的激光能量都将转化为后向的 Stokes 光,严重影响系统的性能甚至造成损毁^[40]。国防科技大学首次提出基于 TFBG 的 SBS 抑制方案,并搭建了如图 7 (a) 所示的原理验证实验系

统,开展了 SBS 信号滤除验证实验。实验结果表明,通过对 TFBG 切趾和补偿后,光谱短波区域的一系列谐振峰更为陡峭,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^[40]。对于后向 SBS 信号的平均滤除率大于 16 dB,如图 7 (b) 所示,可以很好地保护前级系统,另一方面还增加了 SBS 的阈值,提升前向输出激光功率^[41]。

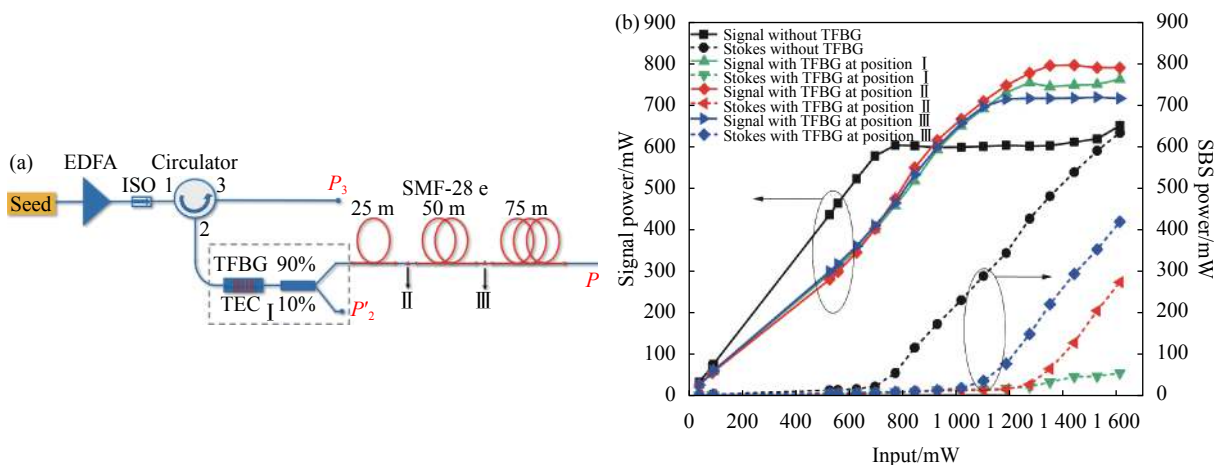


图 7 (a) 基于 TFBG 的光纤 SBS 抑制实验系统示意图; (b) 基于 TFBG 的 SBS 抑制效果^[41]

Fig.7 (a) Schematic diagram of fiber SBS suppression experimental system based on TFBG; (b) SBS suppression effect based on TFBG^[41]

2.2 抑制 SRS 效应的长周期光纤光栅

除了 CTFBG, LPFG 也可用来抑制高功率光纤激光器中的 SRS 效应。与倾斜光纤光栅不同的是, LPFG 可以使纤芯中传输的前向纤芯模耦合为前向传输的包层模,因此通过控制 LPFG 的周期即可将特定波长的光从纤芯耦合至包层,实现非线性效应的滤除。1996 年,美国贝尔实验室的 A.M.Vengsarkar^[42] 等人首次研制出 LPFG,并被大量应用于光纤传感器领域^[43]。图 8 所示为 LPFG 的结构示意图与模拟传输谱,其周期为 $490\text{ }\mu\text{m}$,周期数为 40,折射率调制振幅为 $0.00022^{[44]}$ 。

德国耶拿大学于 2009 年首次提出利用 LPFG 来抑制脉冲光纤激光器中的 SRS 效应,并且对该方法的可能性进行了理论分析^[45]。2010 年,该团队采用三光栅级联的方法将 LPFG 用于波长 1030 nm 、脉宽 100 ps 、重频 100 kHz 的双包层脉冲光纤激光器中 SRS 效应的抑制,抑制效果超过 20 dB (99%)^[46],如图 9 所示。

2020 年,南京理工大学团队采用逐点扫描的方法刻写出 $10/130$ 与 $14/250$ 两种 LPFG,分别用于抑制高功率连续 MOPA 光纤激光器中种子源与放大级激发的 SRS 效应^[44],其中采用高斯切趾的技术有效降低了光栅的插入损耗。对于 LPFG 中产生大量热量的问题,采用低温缓变结合高温渐变的热处理方法将种子源中使用的 $10/130$ 长周期光纤光栅温度系数从 $0.48\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 降低至 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$,放大级中使用的 $14/250$ 长周期光纤光栅温度系数从 $0.54\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 降低至 $0.038\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$,使得光纤光栅可以承载千瓦级功率。另一方面,为了保证 LPFG 的非线性效应抑制能力,采用降敏结构对 LPFG 进行封装,有效降低了轴向应力、弯曲和环境温度对于 LPFG 的影响。为了测试性能,构建了一套千瓦级 MOPA 结构光纤激光器,实验结果表明,对于种子源激发的 SRS 效应,抑制效果大于 15 dB (97.0%),对于放大级激发的 SRS 效应,抑制效果大于 24 dB (99.6%),如图 10 所示。

2021 年,国防科技大学团队采用 CO_2 激光和振

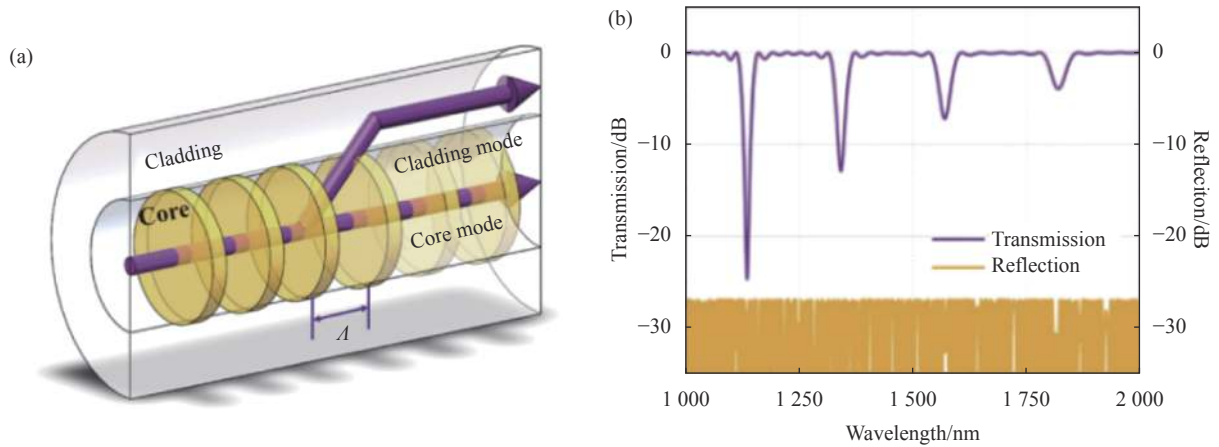


图 8 (a) LPFG 结构示意图; (b) LPFG 模拟传输谱^[44]

Fig.8 (a) Schematic diagram of LPFG structure; (b) LPFG simulation transmission spectrum^[44]

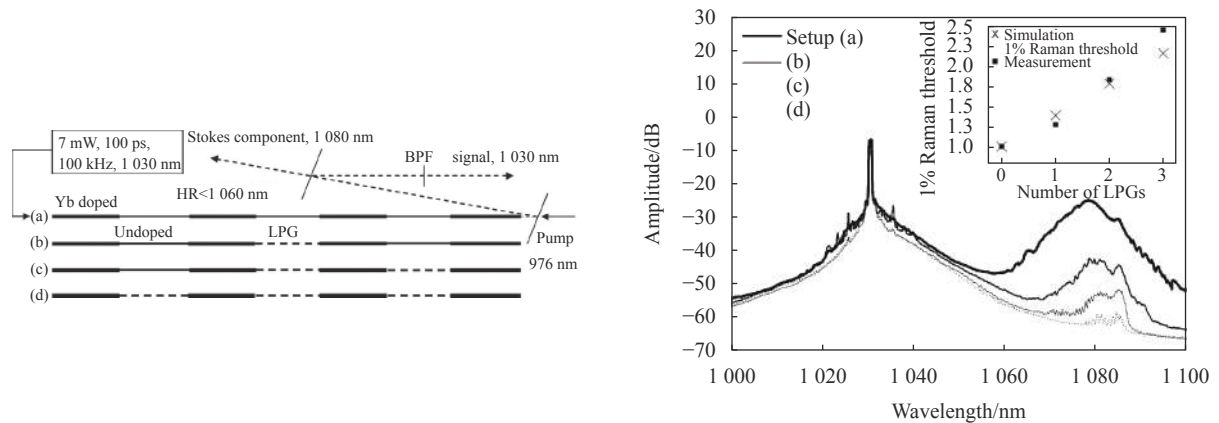


图 9 利用 LPFG 实现双包层脉冲光纤激光器中 SRS 效应的抑制^[46]

Fig.9 Using LPFG to achieve suppression of SRS effect in double-clad pulsed fiber lasers^[46]

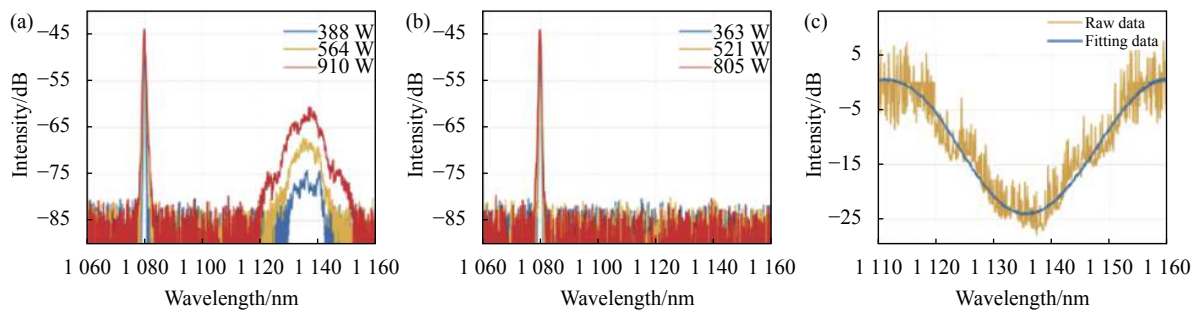


图 10 MOPA 系统的输出光谱。(a) 接入 14/250 LPFG 前光谱; (b) 接入 14/250 LPFG 后光谱; (c) 有无 14/250 LPFG 对于系统的输出光谱之间的差异^[44]

Fig.10 Output spectra of the MOPA system. (a) Without and (b) with the 14/250 LPFG; (c) Difference between the output spectra of the system with and without the 14/250 LPFG^[44]

镜扫描技术, 在双包层 (LMA-GDF-10/130-M) 光纤中设计并刻写了低插入损耗和低温度系数的 LPFG, 首次使用 LPFG 来抑制高功率光纤振荡器中的 SRS 效

应。图 11 为 LPFG 对振荡器中 SRS 效应抑制的实验系统, 该团队分别在 A、B 两个不同位置处放置 LPFG^[47], 实验结果表明, 当在 A 位置放置 LPFG 时

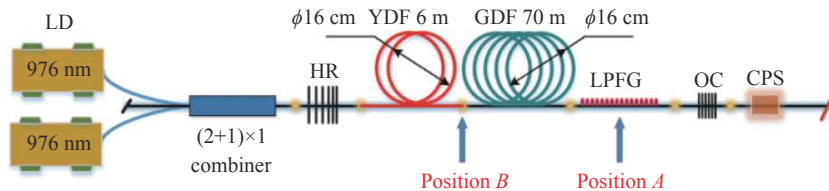


图 11 LPFG 抑制振荡器中 SRS 的评价系统^[47]

Fig.11 Evaluation system of SRS in LPFG suppression oscillator^[47]

SRS 效应抑制比达到 97.5%，且信号激光输出功率提升 13%。

2.3 抑制非线性折射效应的相移长周期光纤光栅

目前科研人员主要利用特殊结构的光纤光栅抑制高功率光纤激光器中的 SRS、SBS 效应，而针对 SPM 或 FWM 引起的激光输出光谱展宽的研究仍处于空白阶段。这是因为 SPM 以及 FWM 引起的展宽激光通常紧贴于信号激光两侧，若使用 CTFBG 或 LPFG 抑制输出激光光谱展宽将会导致信号激光被大量滤除，进而致使系统信号功率大幅下降。针对这一问题，南京理工大学首次提出利用具备带通滤波特性的

相移长周期光纤光栅 (Phase-Shifted Long-Period Fiber Grating, PS-LPFG) 抑制高功率光纤激光器输出光谱线宽展宽的方法^[16, 38]。

PS-LPFG 是 LPFG 的一种，可以将前向传输的纤芯模耦合至前向传输包层模。与普通 LPFG 不同，PS-LPFG 中存在相移，当相移的位置在 PS-LPFG 的中间且其大小为 π 时，PS-LPFG 的谐振峰将分裂为两个对称的谐振峰。此时 PS-LPFG 的光谱便构成了一个带通滤波器，使基于 PS-LPFG 抑制高功率光纤激光器光谱展宽的方法成为可能。PS-LPFG 的结构以及其抑制激光器光谱展宽的原理如图 12 所示。

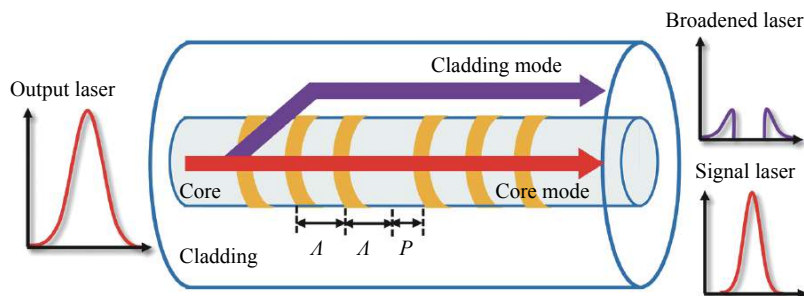


图 12 PS-LPFG 的结构及其抑制激光光谱展宽的原理^[16]

Fig.12 Structure of PS-LPFG and the principle of suppressing laser spectral broadening^[16]

根据 PS-LPFG 的这一特性，南京理工大学团队对 PS-LPFG 的各项参数进行设计，使 PS-LPFG 的两个阻带与非线性效应引起的展宽激光相匹配，通带与信号激光相匹配，最终设计出了能够抑制光纤激光器光谱展宽的 PS-LPFG。如图 13 (a) 所示，采用基于逐点扫描的方法刻写出了该种新型 PS-LPFG，并利用团队特有的低温缓变结合高温渐变的热处理专利方法对刻写的光纤光栅进行退火处理，制作出的 PS-LPFG 光谱如图 13 (b) 所示。

为了测试研制的 PS-LPFG 的性能，南京理工大学团队构建了一套千瓦级 MOPA 结构光纤激光器，如图 14 (a) 所示。将 PS-LPFG 熔接于种子源的低反光

纤光栅 (OC-FBG) 与剥离器 (CPS-1) 之间，进而抑制光纤激光器输出光谱展宽，取得的实验结果如图 14 (b)、(c) 所示。实验结果表明，研制的 PS-LPFG 对光纤激光器的光谱展宽具有明显的抑制作用，其线宽优化效果达 37.97%。同时实验中观察到，PS-LPFG 接入后系统的斜率效率提升了 1.25%。此外，测试结果也表明，接入 PS-LPFG 前后系统的输出激光光束质量未发生明显变化。

综上所述，对于抑制 SRS、SBS 效应的倾斜布拉格光纤光栅，利用其能够将前向纤芯模耦合至后向包层模的特性，可以通过控制 CTFBG 的周期、长度、啁啾率以及折射率调制深度等参数使其包层模谐振峰

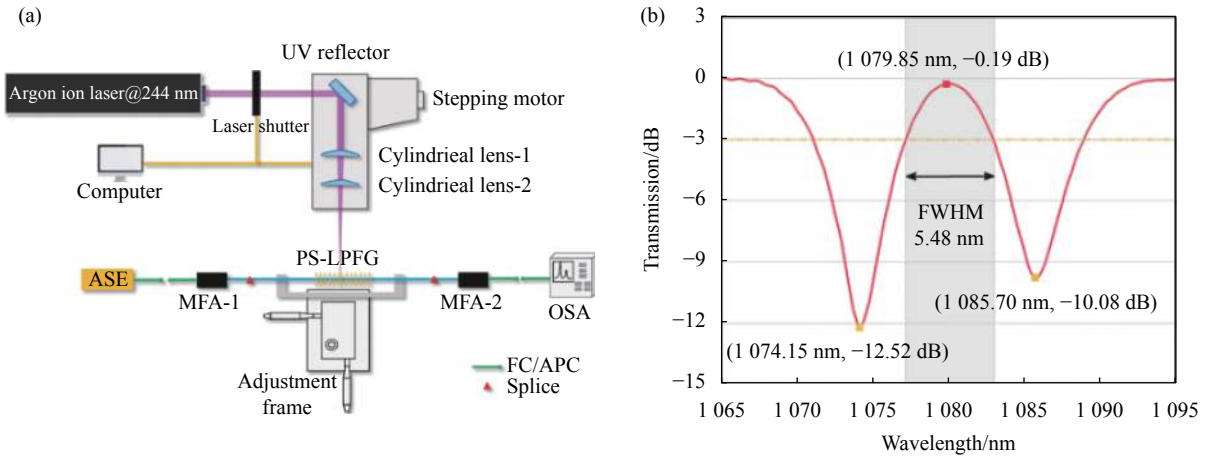


图 13 (a) 基于逐点扫描技术的 PS-LPFG 系统; (b) 制作出的 PS-LPFG 光谱^[16]
 Fig.13 (a) PS-LPFG system based on point-by-point scanning technology; (b) PS-LPFG spectrum produced^[16]

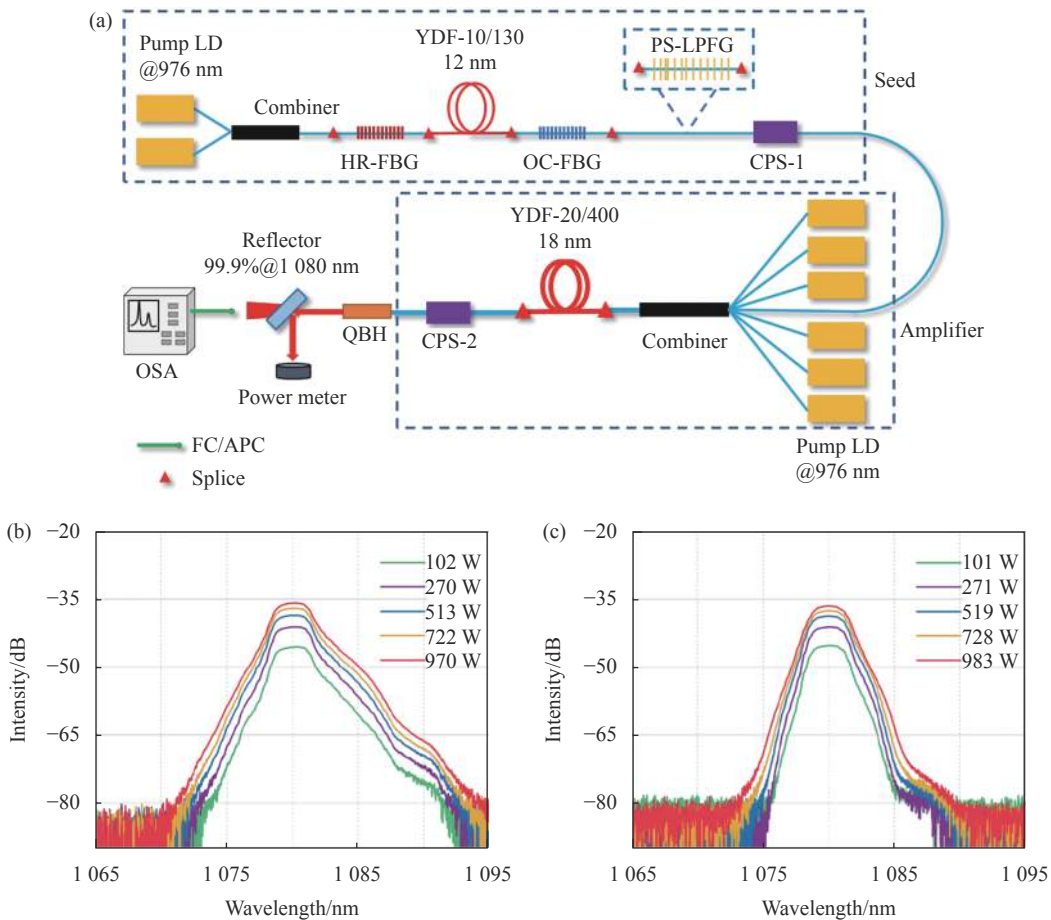


图 14 (a) 用于评价抑制光谱展宽性能的高功率 MOPA 系统; (b) 接入 PS-LPFG 前系统输出光谱; (c) 接入 PS-LPFG 后系统输出光谱^[16]
 Fig.14 (a) High-power MOPA system used to evaluate the performance of suppressing spectral broadening; (b) System output spectrum before PS-LPFG; (c) System output spectrum after PS-LPFG^[16]

的中心波长与 SRS、SBS 效应激发的斯托克斯光的中心波长相匹配, 便能够将 SRS、SBS 效应从纤芯中剥除, 进而使光纤激光器系统输出光谱的 SRS、SBS 效

应消失。该技术的优点包括光纤光栅周期短、稳定性高、不易受环境影响导致抑制效果下降, 且制作工艺相对较成熟; 缺点则是 CTFBG 不仅会将前向纤芯模

耦合至后向包层模,其也会将很小一部分前向纤芯模耦合至后向纤芯模。在极高功率下,这一部分回光入射到光纤激光器谐振腔时会造成系统稳定性下降,甚至造成光纤激光器后续器件烧毁。抑制 SRS 效应的长周期光纤光栅有效解决了这一问题,LPFG 的周期通常在亚毫米量级,为透射型光纤光栅,可以使前向传输的纤芯模耦合至前向传输的包层模,从而避免 CTFBG 带来的回光问题,而且采用逐点扫描的光纤光栅刻写方法制作成本低;缺点是周期较长,易受环境影响导致非线性效应抑制效果下降。利用 CTFBG 与 LPFG 可以有效抑制高功率光纤激光器中的 SRS、SBS 效应,而对于 SPM、FWM 这种直接导致光纤激光器信号激光光谱展宽的非线性折射效应则方法失效,针对这一问题,抑制非线性折射效应的相移长周期光纤光栅通过匹配其通带的半高全宽与信号激光的半高全宽,从而将 SPM、FWM 效应激发的寄生激光从光纤纤芯中剥离,有效抑制高功率光纤激光器输出光谱线宽展宽,保障信号激光可以无损耗通过。但是由于高功率窄线宽光纤激光器输出线宽较窄,要求 PS-LPFG 的带宽极窄。在 PS-LPFG 刻写的过程中,光栅长度越长,其带宽越窄。但随着光栅长度的增长,由于重力或光纤固定不稳的情况会引入光纤弯曲,进而导致相移长周期光栅周期大小不均,严重影响了其光谱谱型。需要进一步优化 PS-LPFG 的结构参数,改善制作工艺来提升光纤光栅的功率承载特性与稳定性,使其能够应用于更高功率的光纤激光器系统中。

3 展 望

光纤光栅在高功率光纤激光器中具有广泛的应用前景,近几年尤其是在抑制非线性效应方面得到了

快速发展。下面对光纤光栅未来的研究方向提出四点展望。

(1) 对于光纤激光器谐振腔腔镜使用的光纤光栅,随着目前对光纤激光器的输出功率需求越来越高,光纤光栅也将从常规的 3 kW 承载功率向 5 kW 和 8 kW 发展,对低温升率、长期可靠性等方面提出了更高的要求,刻写方法也将传统的紫外光刻向飞秒激光刻写发展。由于飞秒激光器输出的超短脉冲激光具有极高的峰值功率,它作用于光纤时会产生非线性效应(非线性电离和雪崩电离)^[2],从而造成光纤的折射率永久性改变,实现光纤光栅的高质量刻写。由于刻写机理不同于紫外光刻,飞秒激光刻写更具有灵活性,根据成栅机理得知光纤不需要具有光敏性,因此无需对光纤进行载氢处理,从而进一步简化光栅的制造工艺;由于飞秒激光的波段基本在 800 nm 左右,光纤涂覆层对该波段高透,因此可以直接透过光纤涂覆层打到芯径上,免除了剥除涂覆层的工序,从而提高了光栅的承载功率以及稳定性。另外,飞秒激光具有极窄的脉冲宽度和极高的峰值功率,光纤光栅刻写速度将会提高数倍,有很好的发展前景。2020 年,德国耶拿大学利用近红外飞秒激光脉冲将光栅直接刻写在光纤上,并且使用如图 15 (a) 所示的双向泵浦全光纤振荡器来测试光纤光栅性能。结果表明飞秒激光制作的光纤光栅能够承载的信号激光功率提升至 5 kW,且没有模式不稳定的迹象^[48]。这是目前为止报道的腔镜用光纤光栅所能承载的最高功率。

(2) 对于具有抑制非线性效应的光纤光栅,未来发展方向包括以下三点:

发展方向一——向更高承载功率发展。目前针对高功率窄线宽光纤激光器中非线性效应抑制方法的研究主要聚焦于种子源,即将光纤光栅放置于种子

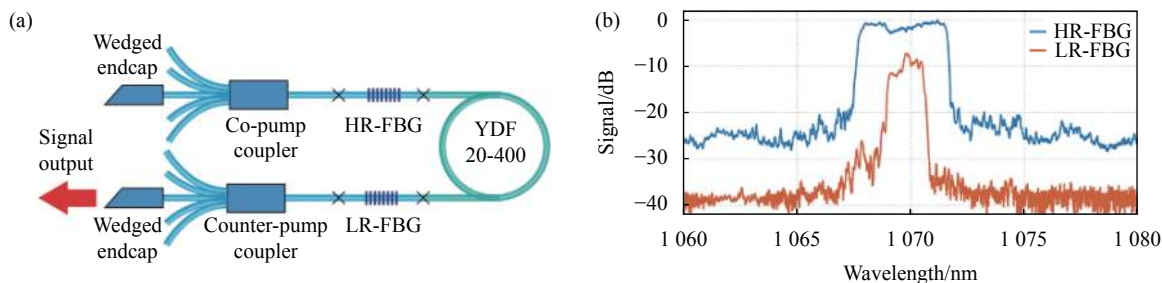


图 15 (a) 双向泵浦全光纤振荡器; (b) HR-FBG (蓝线) 和 LR-FBG (橙线) 的反射光谱^[48]

Fig.15 (a) Bidirectionally pumped all-fiber oscillator setup; (b) Reflectance spectra of HR-FBG (blue line) and LR-FBG (orange line)^[48]

源与放大级之间,用来抑制种子源产生的非线性效应。但是随着放大级功率的不断提升,放大级自身也会激发出很强的非线性效应,因此通过单个光纤光栅放置在种子源中不足以抑制放大级非线性效应的急剧增加,需要在放大级中再放置一个非线性效应抑制的光纤光栅,对放大级产生的非线性效应进行有效抑制。这对非线性效应抑制型光纤光栅的功率承载能力(>5 kW)提出更高的要求,其制作方法也将向飞秒激光刻写发展,同时热处理手段也有待进一步优化。

发展方向二——向能够同时抑制高功率光纤激光器中多种非线性效应方面发展。目前现有结构的光纤光栅(如:CTFBG、LPFG以及PS-LPFG)只能对光纤激光器中某种非线性效应进行有效抑制,但是在高功率光纤激光器中同时存在多种非线性效应。未来希望可以采用级联式多类型非线性效应抑制型光纤光栅结构,即将不同栅形结构的光纤光栅(针对不同类型的非线性效应设计)在一支光纤上进行级联式刻写并形成一个多段式一体化的栅形结构,从而实现了对高功率光纤激光器中多种类型的非线性效应同时进行综合抑制,从而大幅提升光纤激光输出光谱带宽水平。

发展方向三——向更窄线宽发展。对于目前抑制SPM、FWM引起的光谱展宽的PS-LPFG,其通带半高宽只能做到纳米量级。但是很多高功率窄线宽光纤激光器的输出光谱展宽在亚纳米量级,因此需要对PS-LPFG等光纤光栅的结构参数进行优化,进而进一步降低光纤光栅通带的线宽至亚纳米量级,使得该种光纤光栅器件能够应用于高功率窄线宽光纤激光器领域。

(3) 中红外波段的光纤光栅也是未来的一个研究热点。由于中红外波段覆盖了多个大气透射窗口和重要分子吸收区,使得中红外光纤激光器在生物医疗^[49]、传感^[50]以及军事国防^[51]等领域应用广泛。由于石英玻璃对2 μm以上波长光损耗大,波长大于2 μm的中红外光纤激光器多采用硫化物和氟化物光纤^[48]。而氟化物光纤质地脆弱易断且不具备光敏性,导致利用紫外光刻写光纤光栅的方法失效,而利用飞秒激光直接刻写中红外光纤光栅能够有效解决这一难题,从而推动中红外光纤激光器的全光纤化以及功率、性能、稳定性的提升。目前加拿大的拉瓦尔大学与澳大

利亚悉尼大学等对该方向已经进行了深入研究,其中加拿大拉瓦尔大学团队利用飞秒激光在氟化物以及硫化物光纤上制作出中红外光纤光栅^[52-53],实现了全光纤中红外连续光纤激光器的研制,图16所示为飞秒脉冲激光束从左侧入射时光纤(ZBLAN光纤)端面折射率变化示意图。飞秒激光刻写中红外光纤光栅技术以及中红外激光器的未来前景广阔。

(4) 目前基于光纤光栅的光纤激光器激光偏振控制技术也是一个热点方向。高功率窄线宽光纤激光器在引力波探测^[54-55]等领域有着广泛的应用需求,这些领域需要光纤激光器输出高功率且有偏振特性的激光^[56]。目前来说,除了应用保偏光纤的方法,考虑将倾斜角度为45°的TFBG应用于光纤激光器中实现偏振激光的输出也是一个很好的解决思路。

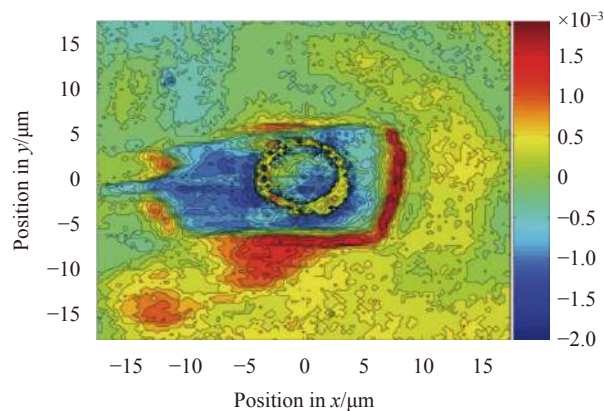


图 16 飞秒脉冲激光束从左侧入射时光纤端面折射率变化示意图^[52]

Fig.16 Schematic diagram of the refractive index change of the fiber when the femtosecond pulsed laser beam is incident from the left^[52]

4 结 论

文中回顾了国内外光纤光栅在高功率光纤激光器中作为谐振腔腔镜使用的发展现状以及特殊结构光纤光栅在抑制高功率光纤激光器非线性效应方面的应用,对光纤光栅未来的研究方向进行了展望:向更高承载功率、同时抑制多种非线性效应、飞秒激光刻写、中红外波段、激光偏振控制这几大方向发展。随着光纤光栅技术的不断发展,其在高功率光纤激光器领域中将发挥越来越重要的作用,为国防、科技等领域注入新的动力。

参考文献:

- [1] Yang B, Zhang H, Ye Q, et al. 4.05 kW monolithic fiber laser oscillator based on home-made large mode area fiber Bragg gratings [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(3): 031407.
- [2] Smelser C W, Mihailov S J, Dan G. Hydrogen loading for fiber grating writing with a femtosecond laser and a phase mask [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(18): 2127-2129.
- [3] Erdogan T, Sipe J. Tilted fiber phase gratings [J]. *JOSA A*, 1996, 13(2): 296-313.
- [4] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [5] Lin C Y, Wang L A. Loss-tunable long period fibre grating made from etched corrugation structure [J]. *Electronics Letters*, 2002, 35(21): 1872-1873.
- [6] Patrick H, Gilbert S L. Growth of Bragg gratings produced by continuous-wave ultraviolet light in optical fiber [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(18): 1484-1486.
- [7] Archambault J L, Reekie L. 100% reflectivity Bragg reflectors produced in optical fibres by single excimer laser pulses [J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(5): 453-455.
- [8] Dai Y, Chen X, Xu X, et al. High channel-count comb filter based on chirped sampled fiber Bragg grating and phase shift [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(5): 1040-1042.
- [9] Ma Y, Mills J K, Xiong J, et al. Simulation of a high-speed superimposed fiber Bragg gratings interrogation system [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(25): 7734-7739.
- [10] Wagner T J. Fiber laser beam combining and power scaling progress: Air force research laboratory laser division [C]//Fiber Lasers IX: Technology, Systems, & Applications, 2012, 8237: 823718.
- [11] Wei S, Leigh M A, Jie Z, 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.
- [12] 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.
- [13] 郭玉彬, 霍佳雨 [M]. 光纤激光器及其应用, 北京: 科学出版社, 2008.
- [14] Platonov N S, Gapontsev D V, Gapontsev V P, et al. 135 W CW fiber laser with perfect single mode output [C]//Summaries of Papers Presented at the Lasers and Electro-Optics. CLEO '02, Technical Diges, IEEE, 2002: 19-24.
- [15] Li M J, Li S, Nolan D A, et al. New dispersion decreasing fiber with high SBS threshold for nonlinear signal processing [C]//Optical Fiber Communication Conference, 2005: OFH5.
- [16] Bian Y, Jiao K, Wu X, et al. Utilizing phase-shifted long-period fiber grating to suppress spectral broadening of a high-power fiber MOPA laser system [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9(3): 03000e39.
- [17] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication [J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [18] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask [J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [19] Klein S, Giesberts M, Baer P, et al. Fiber Bragg gratings in active multimode XLMA fibers for high-power kW-class fiber lasers [C]//Fiber Lasers XVII: Technology and Systems, 2020, 11260: 1126025.
- [20] Xiao Y, Brunet F, Kanskar M, et al. 1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks [J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 3296-3301.
- [21] Khitrov V, Minelly J, Tumminelli R, et al. 3 kW single-mode direct diode-pumped fiber laser [C]//Fiber Lasers XI: Technology, Systems, and Applications, 2014: 89610V.
- [22] Mashiko Y, Nguyen H, Kashiwagi M, et al. 2 kW single-mode fiber laser with 20-m long delivery fiber and high SRS suppression [C]//Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications, 2016: 972805.
- [23] Ikoma S, Nguyen H, Kashiwagi M, et al. 3 kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for highly reflective and highly thermal conductive materials processing [C]//Fiber Lasers XIV: Technology and Systems, 2017: 100830Y.
- [24] Zhou Pu. Technical basis of high average power fiber laser: (2) Resonator [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2017, 29(10): 13-23. (in Chinese)
- [25] Li Dengke, Yin Lu, Tang Yazhou, et al. Research on the influence of low reflection fiber grating on the spectral broadening of fiber lasers [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(4): 486-492. (in Chinese)

- [26] Ge Shiyu, Shen Hua, Zhu Rihong, et al. Method for high-precision measurement of high power fiber laser output coupler's reflectivity [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1117005. (in Chinese)
- [27] Liu Jiaying, Liu Xia, Zhong Shoudong, et al. Parameter matching and laser output characteristics of fiber grating pairs [J]. *Journal of Physics*, 2019, 68(11): 146-155. (in Chinese)
- [28] Liu Wei, Xiao Hu, Wang Xiaolin, et al. Research on the output spectral characteristics of Yb-doped fiber lasers [J]. *Chinese Lasers*, 2013, 40(9): 0902006. (in Chinese)
- [29] Liu C H, Ehlers B, Doerfel F, et al. 810 W continuous-wave and single-transverse-mode fibre laser using 20 μm core Yb-doped double-clad fibre [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(23): 1471-1472.
- [30] Jiang Q. A novel oil level monitoring sensor based on string tilted fiber Bragg grating [J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, 7(3): 171-174.
- [31] Li Y, Brown T G. Radiation modes and tilted fiber gratings [J]. *JOSA B*, 2006, 23(8): 1544-1555.
- [32] Guo T, Tam Hy, Krug P A, et al. Reflective tilted fiber Bragg grating refractometer based on strong cladding to core recoupling [J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5736-5742.
- [33] Jiao K, 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(2): 76-82.
- [34] Wang M, Zhang Y, Wang Z, 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.
- [35] Wang M, Li Z, Liu L, et al. Fabrication of chirped and tilted fiber Bragg gratings on large-mode-area doubled-cladding fibers by phase-mask technique [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(16): 4376-4380.
- [36] Wang M, Liu L, Wang Z, 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(1): 01000e18.
- [37] Wang M, Wang Z, 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.
- [38] Jiao K, Shen H, Yang F, et al. Optimizing output spectral linewidth of fiber laser utilizing phase-shifted long-period fiber grating [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107221.
- [39] Song H, Yan D, Wu W, et al. SRS suppression in multi-kW fiber lasers with a multiplexed CTFBG [J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 20535-20544.
- [40] Tian Xin, Zhao Xiaofan, Wang Meng, et al. Optical fiber stimulated Brillouin scattering suppression based on tilted FBG [J]. *Acta Optics*, 2020, 40(17): 52-58. (in Chinese)
- [41] Tian X, Zhao X, 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.
- [42] 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.
- [43] James S W, Tatam R P. Optical fibre long-period grating sensors: Characteristics and application [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(5): R49.
- [44] Jiao K, Shen H, Guan Z, 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.
- [45] Jansen F, Nodop D, Jauregui C, et al. Modeling the inhibition of stimulated Raman scattering in passive and active fibers by lumped spectral filters in high power fiber laser systems [J]. *Optics Express*, 2009, 17(18): 16255-16265.
- [46] 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.
- [47] Hu Q, Zhao X, Tian X, et al. Raman suppression in high-power fiber laser oscillator by long period fiber grating [J]. *Results in Physics*, 2021, 26(11): 104460.
- [48] Krämer R G, Möller F, Matzdorf C, et al. Extremely robust femtosecond written fiber Bragg gratings for an ytterbium-doped fiber oscillator with 5 kW output power [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1447-1450.
- [49] Saeid A N, Darren K, Cowan M L, et al. Ultrafast mid-IR laser scalpel: Protein signals of the fundamental limits to minimally invasive surgery [J]. *PLoS One*, 2010, 5(9): e13053.
- [50] Bérubé J, Frayssinous C, Lapointe J, et al. Direct Inscription of on-surface waveguides in polymers using a mid-IR fiber laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 31013-31022.
- [51] Popmintchev T, Chen M C, Popmintchev D, et al. Bright coherent ultrahigh harmonics in the keV x-ray regime from mid-

- infrared femtosecond lasers [J]. *Science*, 2012, 336(6086): 1287-1291.
- [52] Bernier M, Faucher D, Vallée R, et al. Bragg gratings photoinduced in ZBLAN fibers by femtosecond pulses at 800 nm [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(5): 454-456.
- [53] Bernier M, Elamraoui M, Couillard J, et al. Writing of Bragg gratings through the polymer jacket of low-loss As₂S₃ fibers using femtosecond pulses at 800 nm [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3900-3902.
- [54] Kapasi D, Eichholz J, McRae T, et al. Tunable narrow-linewidth laser at 2 μm wavelength for gravitational wave detector research [J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 3280-3288.
- [55] Bai Z, Zhao Z, Tian M, et al. A comprehensive review on the development and applications of narrow - linewidth lasers [J/OL]. *Microwave and Optical Technology Letters*, (2021-09-24). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mop.33046>
- [56] Bharathan G, Hudson D D, Woodward R I, et al. In-fiber polarizer based on a 45-degree tilted fluoride fiber Bragg grating for mid-infrared fiber laser technology [J]. *OSA Continuum*, 2018, 1(1): 56-63.