



·强激光物理与技术·综述·

## 高功率光纤激光受激拉曼散射效应研究新进展\*

张 春<sup>1,2</sup>, 谢亮华<sup>2</sup>, 楚秋慧<sup>2</sup>, 刘 琦<sup>2</sup>, 黄 珊<sup>2</sup>, 宋华青<sup>2</sup>, 吴文杰<sup>2</sup>, 冯 曦<sup>2</sup>,  
李 敏<sup>2</sup>, 沈本剑<sup>2</sup>, 李昊坤<sup>2</sup>, 陶汝茂<sup>2</sup>, 许立新<sup>1</sup>, 王建军<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学 光学与光学工程系, 合肥 230026; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 由于具有高品质、高效率、高鲁棒性、结构紧凑等优点, 光纤激光系统在近 20 年飞速发展, 并得到广泛应用。然而发展至今, 依旧存在着一些因素(如非线性效应、热效应、模式不稳定性等)限制着光纤激光系统功率的进一步提升。作为其中的一种主要限制因素, 受激拉曼散射效应不仅降低了光纤激光器的输出效率, 后向斯托克斯光还会提高系统的损毁风险。最近的研究结果表明, 少模光纤中受激拉曼散射在引起模式不稳定性同时, 还会导致准静态的模式退化。因此, 需要发展有效的拉曼抑制手段来突破现有瓶颈, 促进高功率高光束质量光纤激光发展。在介绍高功率少模光纤激光中受激拉曼散射效应新表征的同时, 从高功率光纤激光系统整体优化角度出发, 总结整理了相关抑制技术研究新进展, 并展望未来可能的研究方向。

**关键词:** 受激拉曼散射; 激光技术; 光纤激光器; 模式退化; 抑制策略

中图分类号: TN242

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210251

## Research progress of stimulated Raman scattering effect in high power fiber lasers

Zhang Chun<sup>1,2</sup>, Xie Lianghua<sup>2</sup>, Chu Qiu-hui<sup>2</sup>, Liu Yu<sup>2</sup>, Huang Shan<sup>2</sup>, Song Huaqing<sup>2</sup>, Wu Wenjie<sup>2</sup>,  
Feng Xi<sup>2</sup>, Li Min<sup>2</sup>, Shen Benjian<sup>2</sup>, Li Haokun<sup>2</sup>, Tao Rumao<sup>2</sup>, Xu Lixin<sup>1</sup>, Wang Jianjun<sup>2</sup>

(1. Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Due to the merits of high quality, high efficiency, high robustness and compact size, the fiber laser systems have developed rapidly in the past 20 years, and have been widely used. However, there are still some factors (such as nonlinear effect, thermal effect, transverse mode instability (TMI), etc.) that limit the scaling of output power of fiber lasers. As one of the main limitations, Stimulated Raman Scattering (SRS) effect not only reduces the fiber lasers' efficiency, but also increases the risk of device damage with the backward-Stokes light. In addition, recent studies have shown that SRS effect in few-mode fiber lasers can result in TMI and another type of mode distortion, which is on a much slower time scale. Thereby, from the aspect of fiber design and laser systems, amounts of mitigation strategies have been carry out to suppress this nonlinear effect. In this paper, besides the concise description of SRS-induced mode distortion, the suppression strategies in the past decade are also summarized from the aspect of the fiber laser system optimization.

**Key words:** stimulated Raman scattering; laser technique; fiber laser; mode distortion; suppression strategy

1961 年, America Optical 公司的 Snitzer<sup>[1]</sup> 研制了世界上第一台光纤激光器, 由于具有转换效率高、光束质量好、结构紧凑等独特优点, 光纤激光在地球科学、强场物理、原子分子物理、频率变换、光束合成、工业加工等领域展现了广泛的应用前景。在高锟博士、E. Snitzer 博士、Oleg G. Okhotnikov 博士、Valentin Gapontsev 博士等先驱引领下, 光纤激光技术推陈出新、不断发展, 单模激光功率已迈入 10 kW 门槛<sup>[2-3]</sup>。然而, 光纤的特殊波导结构使激

\* 收稿日期: 2021-06-27; 修订日期: 2021-12-10  
基金项目: 国家自然科学基金项目 (61905226)  
联系方式: 张 春, [wrsf@mail.ustc.edu.cn](mailto:wrsf@mail.ustc.edu.cn)。  
通信作者: 陶汝茂, [supertaozhi@163.com](mailto:supertaozhi@163.com)。

光能量主要被约束在  $\mu\text{m}$  级的光纤纤芯内, 随着光纤激光功率的不断提升, 纤芯内将形成极高的能量密度, 引起各种有害的非线性效应。美国劳伦斯利弗莫尔实验室<sup>[4]</sup>和中国国防科技大学<sup>[5]</sup>先后分别对半导体激光器(LD)泵浦结构和同带泵浦结构下激光系统输出功率极限进行了理论分析, 结果表明受激拉曼散射效应(SRS)是限制功率提升的主要因素之一, 实验中也得到了相同的结论<sup>[6-8]</sup>。为了实现高功率激光输出, 少模光纤广泛应用于高功率光纤激光系统。近期的研究表明, 少模光纤中, SRS 在激发模式不稳定性(TMI)的同时, 还会引起一种准静态的模式退化, 且其对应的阈值功率远低于此前的近衍射极限输出功率受限模型中定义的阈值。因此, 必须采取有效的策略来抑制 SRS, 提升现有高功率高光束质量激光系统的输出能力<sup>[9-11]</sup>。

在研究人员的共同努力下, 人们对 SRS 的认识不断加深, 同时相关的抑制技术不断发展并总结归纳。早期关于 SRS 抑制技术的综述文章主要聚焦于光纤结构设计及长周期拉曼抑制光栅<sup>[9-10]</sup>。除光纤设计外, 研究结果同时表明系统参数也会对 SRS 有很强影响。因此有必要从总体层面出发, 总结梳理各参数对 SRS 强度的影响, 探究其优化方向。此外, 随着技术的发展, 新的光纤结构设计和拉曼抑制光栅技术不断涌现, 并体现出优异的性能。本文在介绍少模光纤中 SRS 效应新物理表征的基础上, 总结梳理了光纤总体构型中各项参数对 SRS 阈值的影响, 同时介绍了光纤结构设计和拉曼抑制光栅的新进展, 以期高功率高光束质量光纤激光中的 SRS 抑制技术下一步发展方向理清思路, 提供启发。

## 1 高功率光纤激光 SRS 效应新物理表征

SRS 的半经典物理表述为<sup>[12]</sup>: 频率为  $\omega_p$  的入射光子与固有频率为  $\omega_v$  的介质相互作用, 形成频率为  $\omega_s$  的斯托克斯光子和频率为  $\omega_a$  的反斯托克斯光子。一方面, 这使得能量从信号光转移至拉曼散射光, 引起输出光束的功率及能量转换效率的下降; 另一方面, 由于 SRS 产生的斯托克斯光为双向斯托克斯光, 当后向斯托克斯光功率达到一定值时, 会提高激光系统中光学元器件的损毁风险, 限制了激光系统功率的进一步提升<sup>[13]</sup>。作为一种光强依赖型非线性效应, 使用少模光纤增大模场面积可以有效地抑制 SRS, 然而模场面积的增大使得光纤支持多个模式。近期的研究表明, 少模光纤中的 SRS 效应会导致输出光束的模式退化, 且这种模式退化可以分为动态模式退化(即横向模式不稳定)与准静态模式退化。

作为目前光纤激光系统功率提升的主要限制因素之一, TMI 的物理表征为<sup>[11]</sup>: 当输出激光的平均功率达到阈值后, 输出激光光束质量急剧退化, 基模(FM)和高阶模(HOMs)之间存在 kHz 量级的动态能量传递, 表现为输出光束的横向模式不稳定。2016年, Naderi 等<sup>[14]</sup>提出在拉曼光纤放大器(RFAs)中, SRS 过程中的量子亏损产热也会形成热致折射率光栅, 使得拉曼光中出现 TMI 并导致基模与高阶模之间的动态能量耦合。这一现象近期也在镱离子-拉曼混合增益型光纤激光系统中观测到<sup>[15-17]</sup>。然而, 实验结果同时表明当 SRS 引起 TMI 时, 信号光(拉曼泵浦光)分布呈现出横向的时间不稳定, 而拉曼斯托克斯光仅存在强度的变化, 横向分布维持不变, 对应的光斑形貌随时间演化及信号光的模式分解结果如图 1 所示。这意味着 SRS 引起的 TMI 发生于信号光, 而不是拉曼光。

由于 TMI 的形成需要热负载达到一定的强度<sup>[11]</sup>, SRS 引起的 TMI 发生时拉曼光功率占比通常大于 50%<sup>[15-17]</sup>。近期, 在拉曼光功率占比较低的情形下, 还观测到了另一种准静态模式退化(见图 2)<sup>[18-19]</sup>。实验中, 当拉曼功率占比达到 3% 时, 输出激光光束质量迅速退化, 同时光斑出现抖动。通过抑制 SRS, 可以有效地抑制这一现象<sup>[19]</sup>。时域信号结果表明对应的特征频率为 Hz 量级。目前, 关于 SRS 引起的准静态模式退化的物理机制有两种解释: 一种是模间混频(IM-WM)效应<sup>[20]</sup>导致能量从信号光基模耦合至拉曼光高阶模; 另一种是纤芯泵浦拉曼效应(core-pumped Raman effect)<sup>[18]</sup>使得信号光出现模式退化。

## 2 高功率光纤激光 SRS 效应抑制技术

一方面, 少模光纤中 SRS 的新物理表征进一步限制了高功率高光束质量光纤激光系统的功率提升; 另一方面, 作为一种新现象, 目前人们对少模光纤中 SRS 导致的模式退化物理机制还缺乏清晰统一的认识, 实验结果与理论解释不完全吻合。SRS 抑制策略中的主动抑制策略可以动态调控拉曼强度, 有助于进一步地探究这一现象背后的物理机制。因此, 有必要系统地梳理高功率光纤激光中的 SRS 抑制技术, 进一步发展相关抑制手段。基于高功率光纤激光系统的结构设计, 本文从光纤设计和系统优化角度出发, 对相关抑制策略进行梳理归纳。

### 2.1 光纤设计

连续波运转下, 忽略稀土离子的拉曼光增益、色散及自相位调制(SMP)、交叉相位调制(XPM)等非线性效应对 SRS 的影响, 描述 SRS 效应的耦合方程可以表述为<sup>[21]</sup>

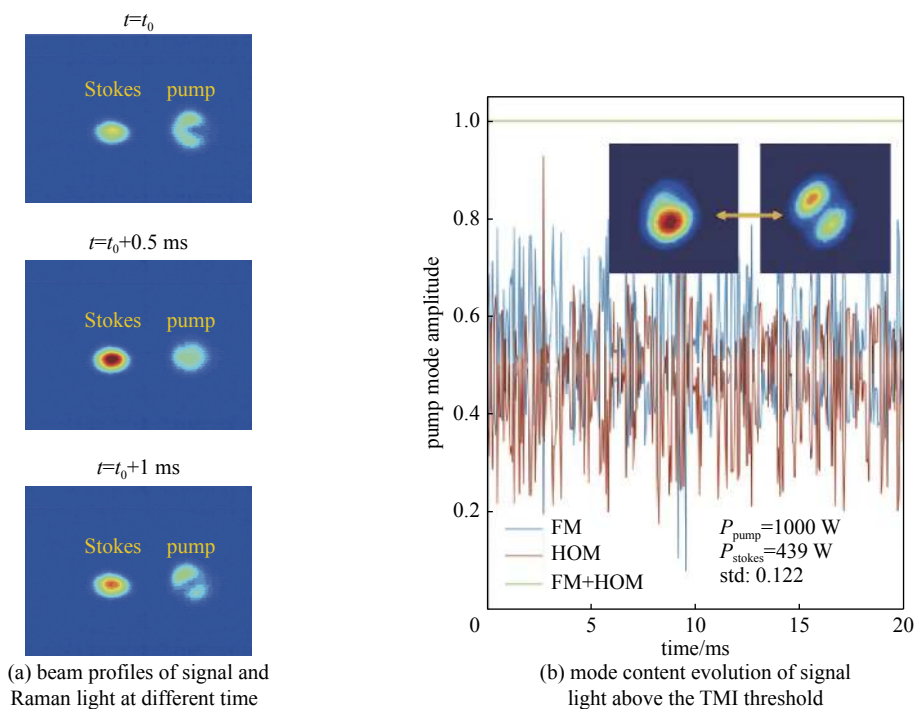


Fig. 1 Transverse mode instability induced by stimulated Raman scattering<sup>[15-16]</sup>

图 1 受激拉曼散射导致模式不稳定<sup>[15-16]</sup>

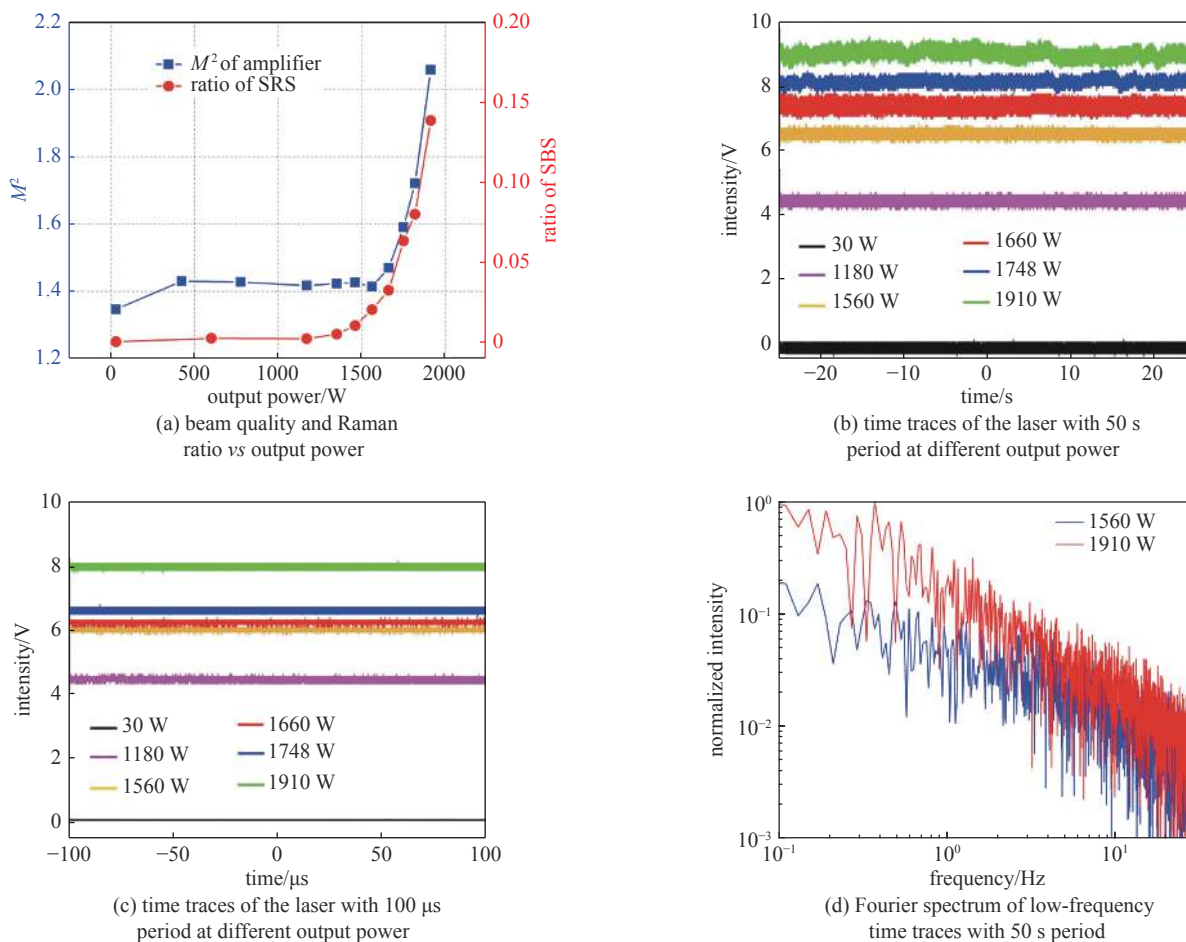


Fig. 2 Quasi-static mode distortion induced by stimulated Raman scattering<sup>[18]</sup>

图 2 受激拉曼散射导致准静态模式退化<sup>[18]</sup>

$$\frac{dI_R}{dz} = g_R I_s I_R - \alpha_R I_R \quad (1)$$

$$\frac{dI_s}{dz} = -\frac{\omega_s}{\omega_R} g_R I_s I_R - \alpha_s I_s \quad (2)$$

式中:  $I_s, I_R$  为信号光和拉曼光光强;  $g_R$  为拉曼增益系数;  $\omega_s, \omega_R$  为信号光和拉曼光频率;  $\alpha_s, \alpha_R$  对应信号光和拉曼光的损耗因子。

拉曼光的损耗项可以表示为  $\alpha_R I_R L_{\text{eff}}$ , 增益项可以表示为  $g_R I_s I_R L_{\text{eff}}$ 。因此, 为了抑制 SRS, 应当“在尽可能保证输出信号光功率及光束质量的前提下, 增大拉曼光损耗, 降低拉曼光增益”。与提升拉曼光损耗相比, 降低拉曼光增益从根本上减少了拉曼光的产生。一方面, 这提升了系统的输出效率与稳定性; 另一方面, 降低增益还会降低 SRS 导致的量子亏损产热。因此目前的高功率光纤激光系统中普遍采用“降低拉曼光增益”策略。降低增益, 一方面可以通过材料组分优化降低  $g_R$ , 另一方面可以降低作用区域的信号光(拉曼泵浦光)光强  $I_s$ 。后者除了利用大模场光纤增大纤芯面积外, 还可以通过“离域”来实现。此外, 还可以通过降低有效作用长度来减小总增益。

### 2.1.1 材料组分

Dragic 等<sup>[22-24]</sup> 提出可以利用 Yb:YAG 衍生光纤替代传统的 SiO<sub>2</sub> 石英光纤来降低斯托克斯光增益系数, 进而抑制 SRS 效应。研究表明, 光纤中 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量增加会导致拉曼增益系数的降低, 如图 3 所示。

2017 年, Ballato 等<sup>[25]</sup> 总结整理了光纤材料对非线性效应的影响, 指出 SRS 功率可以表示为

$$P_s^R \propto V_m \Lambda^2 \quad (3)$$

式中:  $V_m$  是摩尔体积;  $\Lambda$  是键压缩系数。

为了实现低拉曼增益, 光纤材料需要能满足以下条件:

- (1) 该材料高度无序, 从而扩大拉曼增益谱, 进而降低峰值;
- (2) 采用高浓度、低增益系数  $g_R$  的材料;
- (3) 激光系统的拉曼光谱与材料组分对应的拉曼增益谱重叠部分最小。

### 2.1.2 大模场光纤

作为一种光强依赖型非线性效应, 增大模场面积<sup>[26]</sup> 是最为有效的 SRS 抑制策略, 一方面, 这使得拉曼泵浦光强度降低; 另一方面, 模场面积的增大意味着有效作用距离缩短。然而, 受限于光纤材料折射率特性, 少模光纤中, 进一步增大模场面积会导致 TMI 阈值的降低。此时, 限制功率提升的因素从 SRS 变为 TMI, 因此大模场光纤的设计核心是抑制 TMI。目前常用的有部分掺杂光纤<sup>[8, 27-29]</sup>、锥型光纤<sup>[30-32]</sup>、纺锤型光纤(SSC)<sup>[33-35]</sup> 等。部分掺杂光纤通过中心局部掺杂提升基模的增益能力, 通过增益竞争实现高阶模抑制; 锥型光纤的纤芯尺寸沿光纤轴向非均匀分布, 可以有效地剥离高阶模, 提升 TMI 阈值; 纺锤型光纤可以等效为一对锥形光纤中熔接一段大模场光纤。与锥形光纤相比, 光纤尾端的模场面积降低进一步改善了输出激光光束质量。目前, 基于部分掺杂光纤<sup>[8]</sup> 已经实现了 8 kW 的功率输出, 相关实验结果如图 4 所示, 8 kW 输出功率下, 信号光相比于拉曼光的信噪比(SNR) 为 22 dB。然而随着输出功率进一步提升至 8.5 kW, SNR 迅速降低至 13 dB, 限制了激光系统功率的进一步提升。

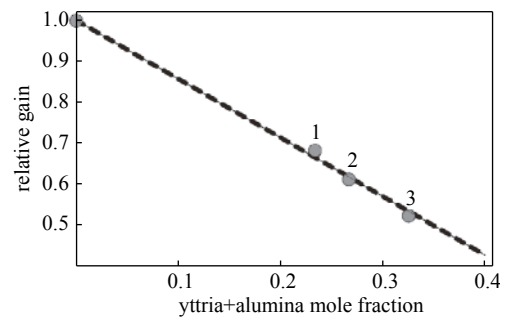
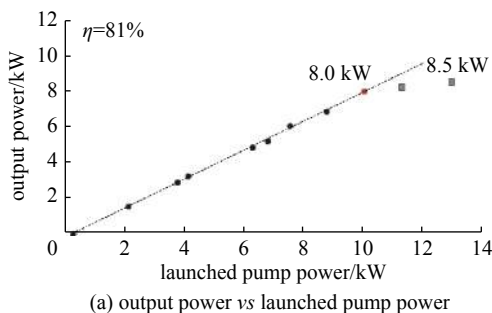
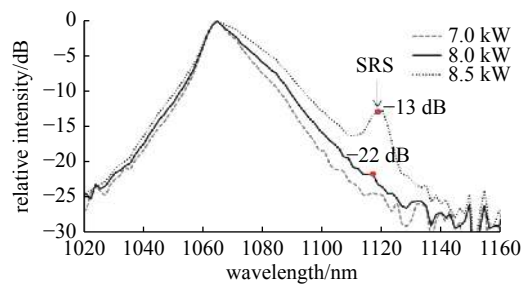


Fig. 3 Relative Raman gain vs yttria + alumina content<sup>[23]</sup>  
图 3 拉曼相对增益随氧化镱和氧化铝含量变化关系<sup>[23]</sup>



(a) output power vs launched pump power



(b) output spectra of different power levels

Fig. 4 Output performance of 8 kW single-stage fiber laser<sup>[8]</sup>

图 4 8 kW 单振荡器输出结果<sup>[8]</sup>

### 2.1.3 离域

L. A. Zenteno 等<sup>[36]</sup>最早提出通过采用拉曼光“离域”来抑制 SRS。2006 年, Fini 等<sup>[37]</sup>设计了一种掺铥环形分布式滤波光纤, 其折射率分布及结构如图 5(a)、图 5(b)所示, 掺铥纤芯被高折射率掺锗环包络, 预制件被研磨成“星型”, 再涂布低折射率聚合物从而实现包层泵浦。图 5(c)展示了光纤中的模式分布, 独特的折射率横向分布使得光纤中信号光与拉曼散射光等“噪声”的模式分布不同, 通过降低拉曼光与信号光之间的重叠因子, 可以有效减弱拉曼散射光的增益。2014 年, Fini 等<sup>[38]</sup>通过引入弯曲补偿包层可以使得光纤在一个较长的长度内保持一个较低的增益, 从而可能应用于长距离(>20 m)kW 级激光传输。

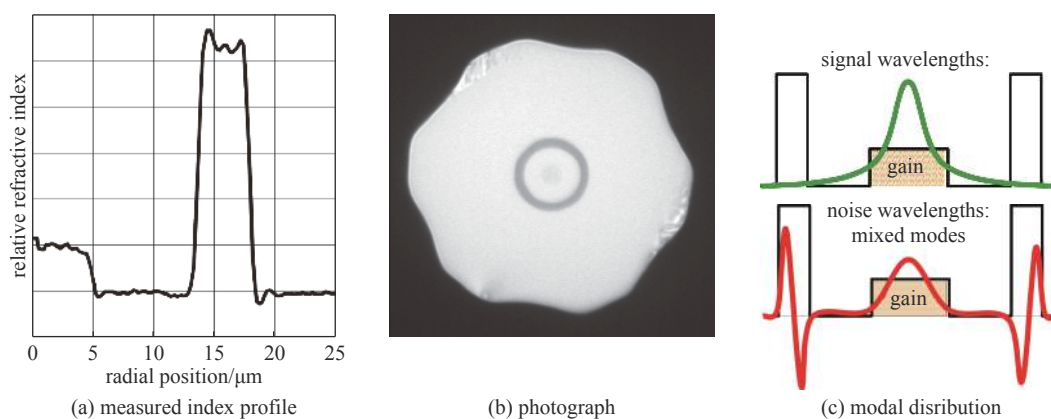


Fig. 5 Filter fiber with a high-index cladding ring<sup>[37]</sup>

图 5 环形滤波光纤<sup>[37]</sup>

### 2.1.4 降低作用长度

通过增大增益光纤的吸收系数来降低作用长度是一种有效的 SRS 等非线性效应抑制策略, 通常可以采用增加稀土离子掺杂浓度和增大纤芯内包层的面积比这两种方法。然而掺杂浓度的提升会导致增益光纤中光子暗化效应的增强影响激光器的性能。增大纤芯内包层的面积比一方面可以增大纤芯面积, 即大模场光纤技术; 另一方面可以缩减内包层直径。内包层直径的减小会导致耦合到激光器的泵浦光功率下降, 影响激光器的输出功率及效率<sup>[13]</sup>。2020 年, Liu 等<sup>[39]</sup>通过在圆形双包层光纤的内包层中植入掺氟低折射率石英棒(LCA)(光纤结构如图 6 所示), 将包层泵浦吸收率提升了 1.5 倍。在光纤振荡器(OSC)中, 相比于传统的 20/400  $\mu\text{m}$  双包层光纤(DCF), 更高的泵浦吸收率使得有效作用距离长度缩短了 33%, 同时 SRS 阈值从 1.6 kW 提升至 2.4 kW。

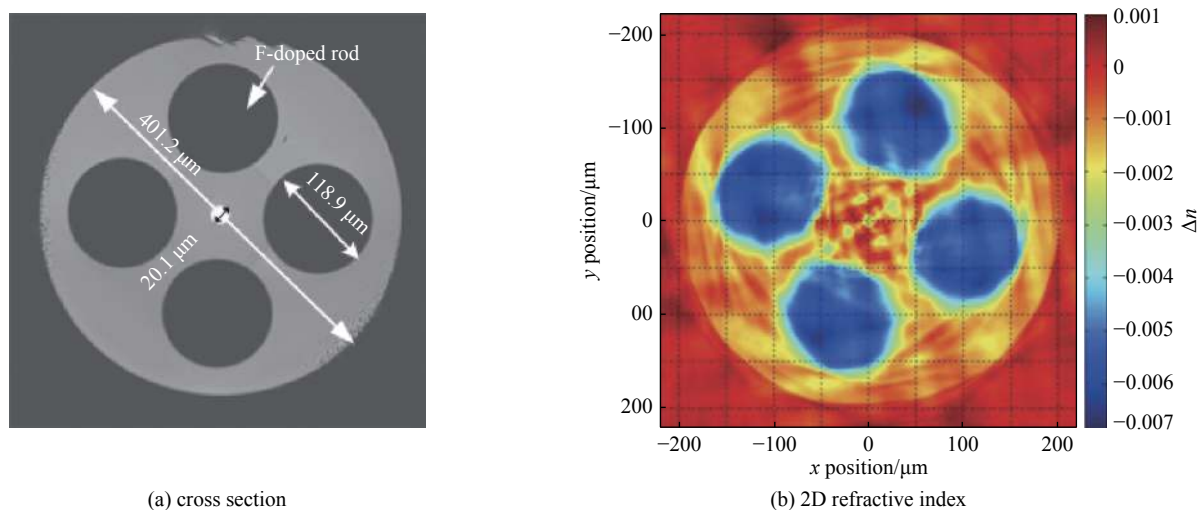


Fig. 6 Circular 20/400  $\mu\text{m}$  LCA DCF<sup>[39]</sup>

图 6 圆形 20/400  $\mu\text{m}$  LCA 双包层光纤<sup>[39]</sup>

表 1 整理了近期光纤设计的 SRS 抑制性能。相比于其他抑制策略, 增大模场面积一方面可以降低光强, 另一方面可以缩短光纤长度, 因此具有优异的拉曼抑制性能。目前中心掺杂光纤已实现 8 kW 高光束质量激光输出, 同时纺锤型光纤也实现了 5 kW 的高光束质量激光输出。各类光纤设计并不对立, 这意味着组合设计策略的可能

表 1 近期光纤设计 SRS 抑制性能汇总

Table 1 Summary of the recent SRS mitigation performance by fiber design

strategy	diameter/ $\mu\text{m}$ (core/clad)		performance	period
materials	—		gain decrease $\sim 3$ dB	2013—2018
LMA	confined-dope fiber	$A_{\text{eff}} 600 \mu\text{m}^2$	$\sim 22$ dB SNR (8 kW)	2012—
	tapered fiber	20/400 to 30/600	no Raman Stokes light when output power reached 2170 W	2019—
	SSC-YDF	20/400+30/600+20/400	no Raman Stokes light when output power reached 5008 W	2018—
delocalization	star-shaped filter fiber	10 (core)	$\sim 17$ dB (net suppression ratio)	2006/2014
decreasing fiber length	LCA-DCF	20/400	SRS threshold increase from 1.6 to 2.4 kW	2020—

性。通过多策略的有机结合,如在纺锤型光纤设计中引入中心局部掺杂,改进大模场光纤材料等,可以进一步抑制 SRS,提升高光束质量光纤激光输出功率水平。

## 2.2 系统优化

一方面,特种光纤技术需要特殊的光纤设计,制备工艺相对复杂,价格相对高昂。另一方面,光纤是激光系统的组成部分之一,输出激光性能由系统各部件共同决定。因此,在搭建高功率光纤激光系统时,除了使用特种光纤外,还可以通过调节优化系统中其他参数(如总体结构、泵浦方式、种子特性等)来实现拉曼抑制。同时,作为一种常用光学元器件,光纤光栅也展示了优异的拉曼光滤波特性。

### 2.2.1 总体结构

为了抑制 kW 级光纤激光器中的 SRS 效应,通常需要使用大模场光纤(纤芯直径大于  $20 \mu\text{m}$ )来缩短光纤长度,降低有效作用距离<sup>[40-42]</sup>。同时,为避免不必要的回光影响,激光系统中闲置光纤的端面应当进行大角度切割<sup>[19, 43]</sup>。2014 年, Lai 等<sup>[44]</sup>提出,当光纤长度低于 3 m 时,尽管双程放大中的有效作用距离是单程放大的两倍。采用双向泵浦的双程光纤放大器与反向泵浦的单程放大器中产生的 SRS 强度相当。当在放大系统中串联插入 10 个滤波器时,双程放大的 SRS 阈值与单程放大相比,提升了 14.14%。2015 年, Zhang 等<sup>[45]</sup>研究了千瓦级级联泵浦掺镱光纤放大器中的 SRS 效应。模型指出,尽管可以通过较低的掺杂浓度和较短的光纤长度来抑制拉曼效应,但应考虑其对泵浦吸收及放大效率的影响。为了避免泵浦光残余过高,对于中心波长为 1018 nm 的泵浦条件下,光纤长度应大于 50 m。

与主振荡功率放大(MOPA)结构相比,单振荡腔结构光纤激光系统具有结构简单、成本低等优点,此外,还可以有效避免材料反射回光导致的激光系统损坏<sup>[46]</sup>。为了提升单振荡腔中的 SRS 阈值,研究人员主要研究了构成振荡腔的核心器件光纤布拉格光栅(FBG)对 SRS 的影响<sup>[8, 47-50]</sup>。T. schreiber 等<sup>[48]</sup>的实验表明,FBG 带宽越大, SRS 阈值越高;刘伟等<sup>[49]</sup>建立了考虑 SRS 效应的频谱模型,理论仿真得出了相同的结论。Lin<sup>[50]</sup>指出尽管可以通过提升 OC-FBG 的带宽来抑制 SRS,带宽的增大也会提升 HR-FBG 的后向漏光功率。此外,单振荡腔结构的 OC-FBG 反射率也会对拉曼光产生影响<sup>[8]</sup>,结果显示,拉曼光的功率随 OC-FBG 的反射率的降低而降低,但低的 OC-FBG 反射率会导致材料反射回光进入谐振腔引起输出功率的起伏。

### 2.2.2 滤波光纤光栅

自 2010 年 D. Nodop 等<sup>[51-52]</sup>首次采用多个长周期光栅(LPG)串联构成集总滤波器后,得益于其出色的拉曼抑制比和相对较低的插入损耗,拉曼光纤光栅滤波器得到广泛关注,发展迅速,目前拉曼滤波光栅主要有长周期光栅和啁啾倾斜布拉格光栅(CTFBG)这两种结构。

长周期光栅的工作原理如图 7(a)所示,特定波长的拉曼光经光栅后耦合泄露至包层,图 7(b)为对应的透射谱。早期, D. Nodop 等<sup>[51-52]</sup>通过  $\text{CO}_2$  激光器在  $10/125 \mu\text{m}$  光纤中写入 LPG,并通过切趾工艺将 1030 nm 的信号光的插入损耗降低至 0.01 dB,这使得同时串联多个光栅成为可能。实验中,3 个长周期光栅的串联使得 SRS 的阈值提升一倍,并且可以通过进一步的增添串联光栅个数来达到更好的抑制效果。此后, Victor Bock 等<sup>[53]</sup>通过飞秒激光脉冲成功在  $20/400 \mu\text{m}$  的大模场光纤中写入长周期光栅,拉曼光的共振损耗达到了 26 dB,并且长周期光栅的刻入并未对信号光的传输损耗产生明显的影响。Jiao 等<sup>[54]</sup>通过退火工艺显著降低了光栅刻蚀后光纤中的氢化物浓度,降低了高功率下长周期光栅对红外光的吸收产热,同时通过特殊的封装设计降低了光栅对环境(温度、应力、弯曲等)的敏感性,将优化后的  $14/250 \mu\text{m}$  长周期光栅插入 MOPA 激光系统后,在 805 W 输出功率下 SNR 可以达到 24 dB,

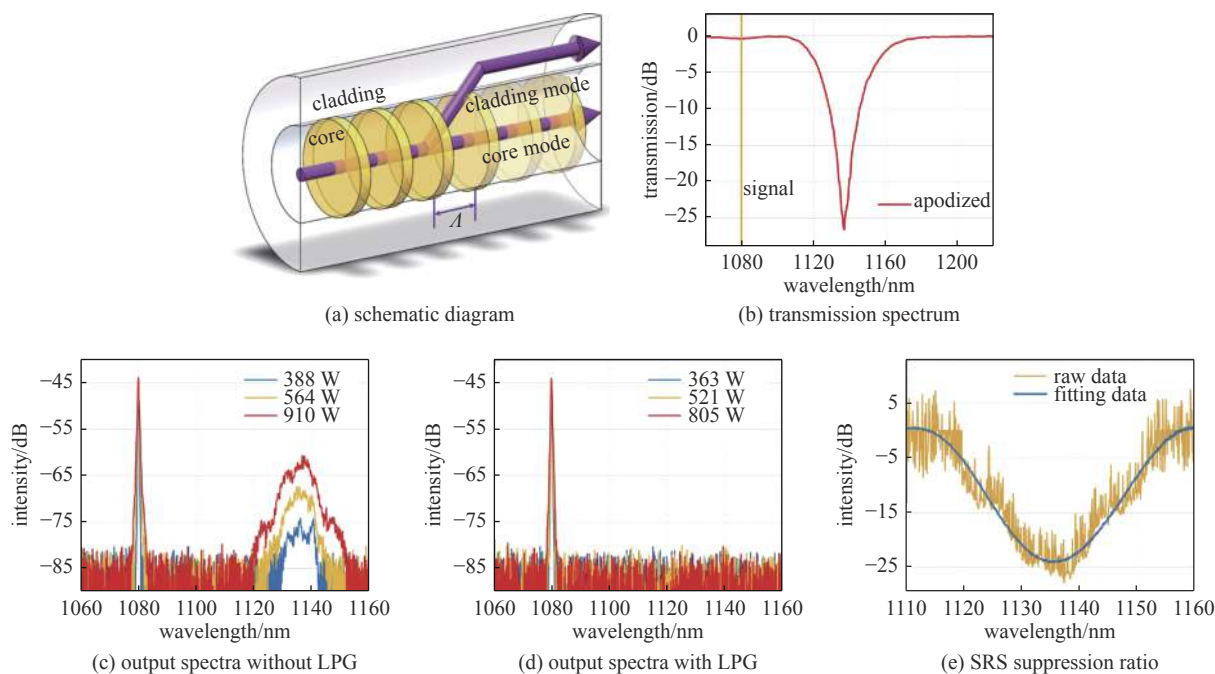


Fig. 7 Long period gratings<sup>[54]</sup>

图 7 长周期光栅<sup>[54]</sup>

如图 7(c)~图 7(e)所示。

2017年, Wang等<sup>[55]</sup>首次提出利用啁啾倾斜布拉格光栅抑制SRS。工作原理如图8(a)所示,与长周期光栅相比,啁啾倾斜布拉格光栅通过将拉曼光反向倾斜反射至包层来达到抑制的目的。图8(b)展示了对应的光谱特性:3 dB带宽为17.3 nm,中心深度低于-13 dB。相比于长周期光栅,啁啾倾斜布拉格光栅的光谱为连续谱,并且可以通过改变倾斜角来实现调谐,且对环境敏感性相对较低。但是啁啾倾斜布拉格光栅的抑制原理使得:(a)有一部分反射光会反向沿纤芯传播,降低TMI阈值、引起四波混频(FWM)等非线性效应;(b)由倾斜反射泄露至包层的光加热CTFBG的涂覆层,因此高功率下必须在光栅表面增加包层光剥离器(CPS),导致光栅的制造工艺难度增加,

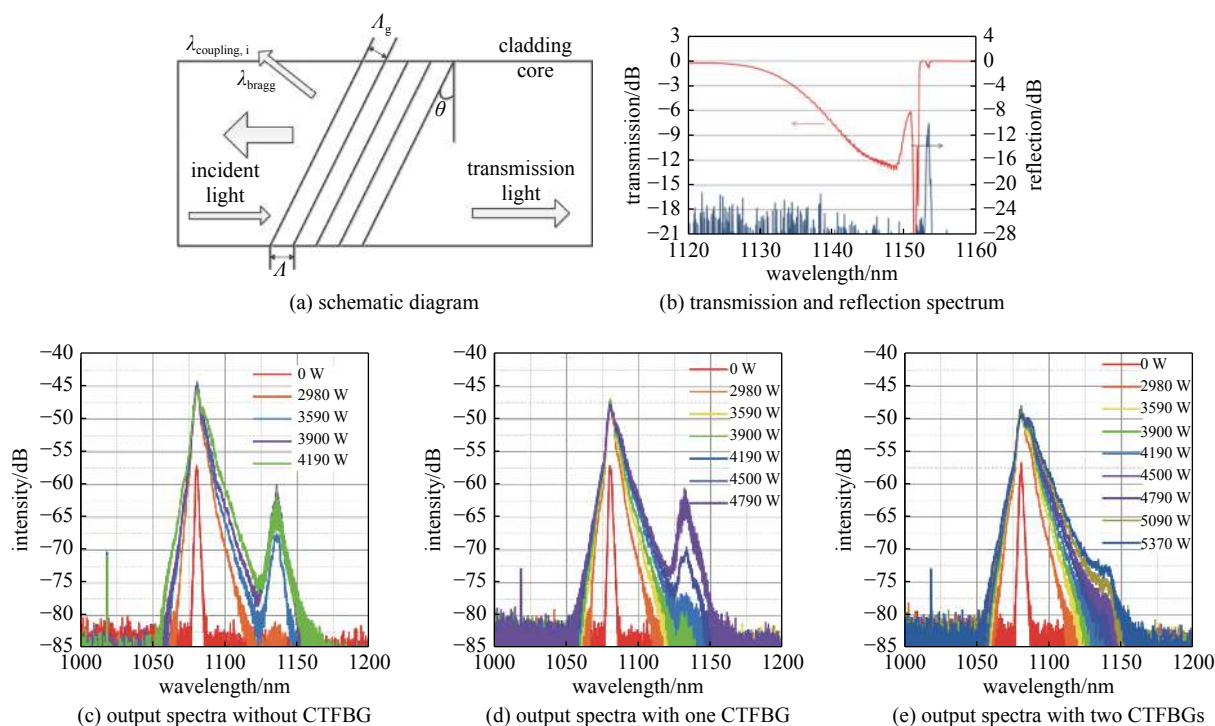


Fig. 8 Chirped and tilted fiber Bragg gratings<sup>[55, 62]</sup>

图 8 啁啾倾斜布拉格光栅<sup>[55, 62]</sup>

降低使用寿命<sup>[54]</sup>。目前已经利用啁啾倾斜布拉格光栅实现了全光纤单振荡器<sup>[56-59]</sup>、kW级LD泵浦光纤放大器<sup>[60-61]</sup>、kW级级联光纤放大器<sup>[62-63]</sup>。级联光纤放大器中插入CTFBG个数为0, 1, 2时, 对应的输出光谱如图8(c)~图8(e)所示, 可以看出, 随着插入啁啾倾斜布拉格光栅的个数增加, SRS得到显著抑制。

### 2.2.3 泵浦方式

高功率光纤激光系统中常用的泵浦方式有端面泵浦与分布式侧面泵浦(DSCCP)。端面泵浦方式中后向泵浦策略<sup>[64]</sup>的高功率信号光有效传播距离更短(位于掺镱光纤末端), 因此可以显著降低信号光和拉曼光的作用距离, 抑制SRS效应。与端面泵浦相比, 相同光纤尺寸下, 尽管分布式侧面泵浦的SRS阈值较低, 但是这种泵浦方式导致光纤中热负荷更均匀, 因此可以显著地缓解光纤中的热效应<sup>[41]</sup>。这意味着同等TMI阈值功率下, 分布式侧面泵浦的纤芯有效面积更大, 因此可以变相地缓解SRS<sup>[65-66]</sup>。目前, 应用分布式侧面泵浦的高光束质量kW级光纤振荡器和光纤放大器<sup>[65-68]</sup>也已实现。

### 2.2.4 种子特性及自脉冲

2016年, Wang等<sup>[69]</sup>研究了掺镱光纤放大器中SRS随种子光功率的演化关系。结果表明, SRS阈值与注入的种子光功率成反比。但是受限于有限的泵浦光功率, 种子光功率的减小使得输出光功率下降。同时, 当光纤放大器以高功率运转时, 其稳定性也会因为自发辐射放大(ASE)而降低。此外, 相关研究表明, ASE也可以作为拉曼种子光引起拉曼放大, 导致降低SRS阈值<sup>[70]</sup>。因此, 应当选择合适的种子光功率。Ying等<sup>[71]</sup>研究了种子光中的拉曼散射噪声对SRS的影响, 给出了考虑种子光中拉曼散射噪声时高功率放大器的拉曼阈值计算公式, 结果表明, 当种子光中的拉曼散射噪声大于 $10^{-8}$  W时, 会对高功率放大器的拉曼阈值起重要作用。

Hu等<sup>[72]</sup>的研究表明, 在高功率连续光纤激光器中, 弛豫振荡会引起峰值较高的自脉冲, 当其峰值功率达到非线性阈值时, 可能会引发SRS等一系列非线性效应。王文亮<sup>[13]</sup>指出, 自脉冲的产生会显著地降低SRS阈值, 并且主要使得前向斯托克斯光功率提升, 因此需要采取有效的策略抑制自脉冲。目前常用的抑制方法有采用位相调制单频种子源<sup>[73-75]</sup>、增加种子振荡级的FBG带宽<sup>[49, 76-77]</sup>、在种子级与放大级之间增长传能纤长度<sup>[78]</sup>等。单频种子源可以有效地减少纵模间形成拍频与锁模的几率, 从而减少自脉冲的产生几率<sup>[79]</sup>; FBG的带宽增加导致自脉冲分离为多个窄脉冲, 从而抑制SRS; 长距离传输光纤则通过减弱自脉冲强度来抑制SRS<sup>[78]</sup>。图9展示了对应的模拟结果, 可以看出, FBG带宽增加与传能纤延长策略相结合(种子5)可以进一步的抑制SRS。实验中, 两种策略的结合使得~1 kW输出功率下SNR高达~50 dB。

### 2.2.5 四波混频

在高功率光纤激光系统中, 当位相匹配条件满足时, 频率为 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 的光子通过参量过程, 产生频率为 $\omega_3$ 和 $\omega_4$ 的斯托克斯光子和反斯托克斯光子。少模光纤中, 当这4个频率的光为同一种光纤横向模式时, 这一过程称为四波混频(FWM); 若对应不同的光纤横向模式, 则称为模间四波混频(IM-FWM)<sup>[80]</sup>。Sergey A Babin等<sup>[81]</sup>理论研究了拉曼光纤激光器(RFL)中FWM与SRS的关系, 结果指出, 不同纵模间的FWM使得光谱展宽, 光谱宽度与峰值功率呈平方根关系, 并且FWM会改变拉曼增益系数。Hu等<sup>[82]</sup>的研究表明, 当FWM发生时, 归一化位相失配量 $\Delta B = (2\beta_L - \beta_S - \beta_a)/g_0$ 会使得有效拉曼增益系数发生改变

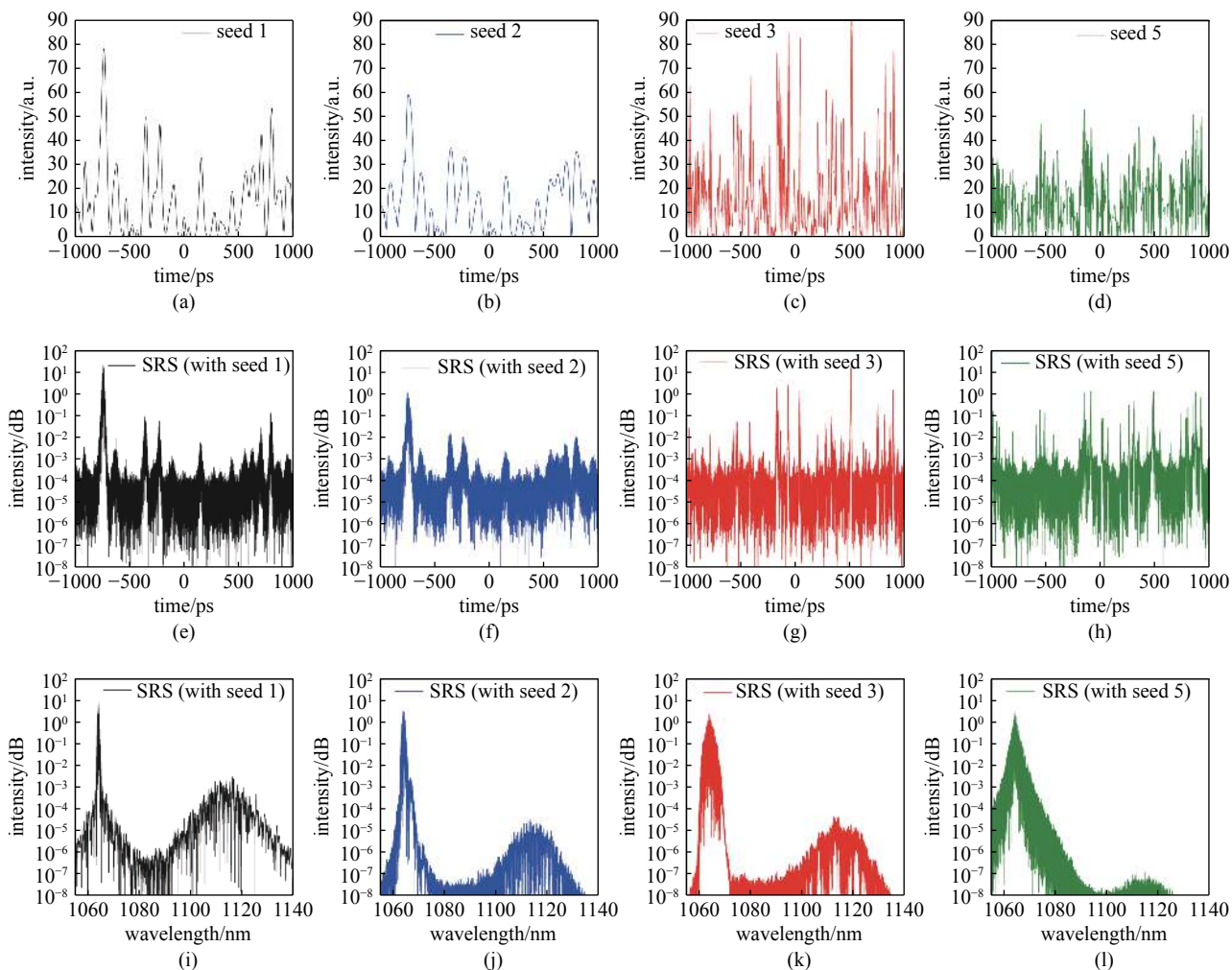
$$\frac{g_{\text{eff}}}{g_0} = \text{Re} \left[ \sqrt{(2(1-f + f\chi_0) - \Delta B)\Delta B} \right] \quad (4)$$

式中:  $\beta_L$ ,  $\beta_S$ ,  $\beta_a$ 对应信号光、斯托克斯光、拉曼光的传播常数;  $g_0$ 为小信号拉曼增益系数; 参量 $f$ 的值为0.18;  $\chi_0 = 1.38i$ 对应拉曼非线性极化率虚部峰值。模拟结果表明FWM与SRS之间的耦合可能会导致SRS显著增强(约1.8倍), 因此需要选择具有合适的色散值的光纤, 通过优化参数 $\Delta B$ 来抑制SRS。

Liu等人<sup>[83]</sup>理论分析了FWM和IM-FWM对RFL的影响。通过控制变量法, 模型指出, FWM会导致二阶斯托克斯光功率提升, 使得拉曼阈值降低50%。同时, 在忽略FWM的前提下, 通过改变种子光中LP11模式的功率占比来探究IM-FWM对RFL的影响, 结果显示, 随着LP11模式的功率占比的提升, 拉曼阈值会显著下降, 当占比高于 $10^{-3}$ 时, IM-FWM对拉曼阈值的影响强于FWM。通过采取时域稳定的泵浦源, 可以有效地抑制FWM, 同时可通过引入高阶模损耗来抑制IM-FWM。

表2整理了影响SRS阈值的系统参数理论优化方案。需要说明的是, 一方面, 这些参数往往相互耦合对SRS产生影响; 另一方面, 这些参数还决定了激光系统的其他特性。因此在进行系统设计时, 应当结合需求充分考虑各个因素, 不能盲目地追求SRS抑制效率。





(a)-(d) simulated temporal fluctuations of seed 1 (OSC), seed 2 (with 500 m fibers), seed 3 (with 0.5 nm OC-FBG), and seed 5 (with 0.5 nm OC-FBG+500 m fibers); (e)-(h) simulated temporal fluctuations of SRS lights (from 1080 to 1150 nm) in the corresponding amplifiers; (i)-(l) simulated spectra at the output power of  $\sim 1$  kW.

Fig. 9 Simulated temporal fluctuations and simulated spectra at the output power of  $\sim 1$  kW<sup>[78]</sup>

图 9 时域抖动仿真和 1 kW 输出功率下仿真光谱<sup>[78]</sup>

表 2 光纤激光系统参数优化策略汇总

Table 2 Summary of the parameters optimization strategy in fiber laser system

parameter	guideline/method	parameter	guideline/method
wavelength of signal	$> 1085$ nm	bandwidth of FBG in OSC	wider
fiber length	$< 60$ m	reflective index of FBG in OSC	lower
core diameter	$> 20$ $\mu$ m	doping concentration	lower
seed power	lower	Raman noise of seed power	$< 10^{-8}$ W
pump methods	backward	gratings	CTFBG/LPG
external feedback	large angle cleaving	self-pulsation	special designed seed sources
FMW	choosing the suitable dispersion value of fibers	IM-FWM	temporal stable pump

### 3 总结与展望

作为光纤激光系统单链路功率提升的主要限制因素之一，SRS 除了导致系统功率及效率降低外，后向斯托克斯光还会增加系统损伤风险。此外，近期在少模光纤中观察到了 SRS 导致模式退化这一新现象，作为 SRS 在少模光纤中的新物理表征，现有的实验结果与理论解释不完全吻合，有待进一步研究。研究梳理 SRS 的相关抑制策略一方面可以提升现有的高功率高光束质量光纤激光系统功率输出水平；另一方面通过抑制手段动态调节 SRS 强度，有助于加深对 SRS 导致模式退化的理解。在研究人员不断努力下，各类拉曼抑制技术推陈出新、不断发展，目

前主要分为特种光纤设计技术和系统总体结构优化两大类。特种光纤设计技术中大模场光纤技术展现出了出色的抑制能力和高功率应用前景。系统结构优化除了采用光纤光栅作为拉曼滤波元器件外,主要基于系统的各项参数及其他非线性效应(如 ASE、自脉冲、FWM 等)对拉曼光的影响,通过优化相关参数实现拉曼抑制。下一步将结合 SRS 抑制技术和模式分解技术,继续深入探索 SRS 导致模式退化的物理机制。同时开展拉曼组合抑制策略的可行性研究,为进一步抑制 SRS,提升现有高功率高光束质量光纤激光系统功率水平提供参考。

#### 参考文献:

- [1] Snitzer E. Proposed fiber cavities for optical masers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32(1): 36-39.
- [2] Liu Zejin, Jin Xiaoxi, Su Rongtao, et al. Development status of high power fiber lasers and their coherent beam combination[J]. *Science China Information Sciences*, 2019, 62: 41301.
- [3] 周朴, 黄良金, 冷进勇, 等. 高功率双包层光纤激光器: 30 周年的发展历程[J]. *中国科学:技术科学*, 2020, 50(2): 123-135. (Zhou Pu, Huang Liangjin, Leng Jinyong, et al. High-power double-cladding fiber lasers: a 30-year overview[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2020, 50(2): 123-135)
- [4] 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.
- [5] Zhu Jiajian, Zhou Pu, Ma Yanxing, et al. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18645-18654.
- [6] Khitrov V, Minelly J D, Tumminelli R, et al. 3kW single-mode direct diode-pumped fiber laser[C]//Proceedings of SPIE 8961, Fiber Lasers XI: Technology, Systems, and Applications. 2014: 89610V.
- [7] Möller F, Krämer R G, Matzdorf C, et al. Multi-kW performance analysis of Yb-doped monolithic single-mode amplifier and oscillator setup[C]//Proceedings of SPIE 10897, Fiber Lasers XVI: Technology and Systems. 2019: 108970D.
- [8] 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[C]//Proceedings of SPIE 11260, Fiber Lasers XVII: Technology and Systems. 2020: 1126022.
- [9] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [10] 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.
- [11] Jauregui C, Stihler C, Limpert J. Transverse mode instability[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(2): 429-484.
- [12] 李淳飞. 非线性光学: 原理和应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015: 134-143. (Li Chunfei. Nonlinear optics: principle and applications[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2015: 134-143)
- [13] 王文亮. 大功率光纤激光器受激拉曼散射研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2014: 1-63. (Wang Wenliang. Stimulated Raman scattering in high power fiber lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014: 1-63)
- [14] Naderi S, Dajani I, Grosek J, et al. Theoretical and numerical treatment of modal instability in high-power core and cladding-pumped Raman fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16550-16565.
- [15] Distler V, Möller F, Strecker M, et al. Transverse mode instability in a passive fiber induced by stimulated Raman scattering[J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 22819-22828.
- [16] Distler V, Möller F, Yildiz B, et al. Experimental analysis of Raman-induced transverse mode instability in a core-pumped Raman fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2021, 29(11): 16175-16181.
- [17] Zhang Hanwei, Xiao Hu, Wang Xiaolin, et al. Mode dynamics in high-power Yb-Raman fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3394-3397.
- [18] Chu Qiuhui, Shu Qiang, Chen Zeng, et al. Experimental study of mode distortion induced by stimulated Raman scattering in high-power fiber amplifiers[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(4): 595-600.
- [19] Gao Wei, Fan Wenhui, Ju Pei, et al. Effective suppression of mode distortion induced by stimulated Raman scattering in high-power fiber amplifiers[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e20.
- [20] Liu Wei, Ma Pengfei, Shi Chen, et al. Theoretical analysis of the SRS-induced mode distortion in large-mode area fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15793-15803.
- [21] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. 4th ed. Oxford: Elsevier, 2007.
- [22] Dragic P D, Ballato J. Characterisation of Raman gain spectra in Yb: YAG-derived optical fibres[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(14): 895-896.
- [23] Dragic P D, Ballato J, Hawkins T. Compositional tuning of glass for the suppression of nonlinear and parasitic fiber laser phenomena[C]//Proceedings of SPIE 9081, Laser Technology for Defense and Security X. 2014: 908109.
- [24] Ballato J, Dragic P. Materials approaches to mitigating parasitic effects in optical networks: towards the perfect optical fiber[C]//Proceedings of the 18th International Conference on Transparent Optical Networks. 2016: 1-4.
- [25] Ballato J, Cavillon M, Dragic P. A unified materials approach to mitigating optical nonlinearities in optical fiber. I. Thermodynamics of optical scattering[J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2018, 9(2): 263-277.
- [26] Ye Yun, Yang Baolai, Wang Peng, et al. Industrial 6 kW high-stability single-stage all-fiber laser oscillator based on conventional large mode area ytterbium-doped fiber[J]. *Laser Physics*, 2021, 31: 035104.
- [27] Mashiko Y, Nguyen H K, Kashiwagi M, et al. 2 kW single-mode fiber laser with 20-m long delivery fiber and high SRS suppression[C]//Proceedings of SPIE

- 9728, *Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications*. 2016: 972805.
- [28] Shima K, Ikoma S, Uchiyama K, et al. 5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing[C]//*Proceedings of SPIE 10512, Fiber Lasers XV: Technology and Systems*. 2018: 105120C.
- [29] 张志伦, 张芳芳, 林贤峰, 等. 国产部分掺杂光纤实现3 kW全光纤激光振荡输出[J]. *物理学报*, 2020, 69: 234205. (Zhang Zhilun, Zhang Fangfang, Lin Xianfeng, et al. Home-made confined-doped fiber with 3-kW all-fiber laser oscillating output[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69: 234205)
- [30] Yang Baolai, Zhang Hanwei, Shi Chen, et al. High power monolithic tapered ytterbium-doped fiber laser oscillator[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 7585-7592.
- [31] Ye Yun, Xi Xiaoming, Shi Chen, et al. Comparative study on transverse mode instability of fiber amplifiers based on long tapered fiber and conventional uniform fiber[J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16: 085109.
- [32] Tian Yuan, Chen Yizhu, Leng Jinyong, et al. Numerical modeling and optimization of cladding-pumped tapered fiber Raman amplifiers[J]. *Optics Communications*, 2018, 423: 6-11.
- [33] Zeng Lingfa, Xi Xiaoming, Ye Yun, et al. A 1.8 kW fiber laser oscillator employing a section of spindle-shaped core ytterbium-doped fiber[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17: 095104.
- [34] 奚小明, 曾令筏, 叶云, 等. 基于国产双锥形光纤实现3 kW单模全光纤振荡器[J]. *中国激光*, 2020, 47: 0916001. (Xi Xiaoming, Zeng Lingfa, Ye Yun, et al. Single-mode all-fiber oscillator based on home-made dual-tapered fiber with 3kW output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47: 0916001)
- [35] Zeng Lingfa, Pan Zhiyong, Xi Xiaoming, et al. 5 kW monolithic fiber amplifier employing homemade spindle-shaped ytterbium-doped fiber[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(6): 1393-1396.
- [36] Zenteno L A, Wang J, Walton D T, et al. Suppression of Raman gain in single-transverse-mode dual-hole-assisted fiber[J]. *Optics Express*, 2005, 13(22): 8921-8926.
- [37] Fini J M, Mermelstein M D, Yan M F, et al. Distributed suppression of stimulated Raman scattering in an Yb-doped filter-fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(17): 2550-2552.
- [38] Fini J M, Nicholson J W. Fibers design with a bend-compensated cladding for distributed wavelength filtering[C]//*Proceedings of SPIE 8961, Fiber Lasers XI: Technology, Systems, and Applications*. 2014: 89610S.
- [39] Liu Rui, Yan Dapeng, Chen Ming, et al. Enhanced cladding pump absorption of ytterbium-doped double cladding fiber with internally modified cladding structures[J]. *Optical Materials Express*, 2020, 10(1): 36-45.
- [40] Wang Yong, Martinez-Rios A, Po H. Experimental study of stimulated Brillouin and Raman scatterings in a Q-switched cladding-pumped fiber laser[J]. *Optical Fiber Technology*, 2004, 10(2): 201-214.
- [41] Wang Yong, Xu Changqing, Po Hong. Analysis of Raman and thermal effects in kilowatt fiber lasers[J]. *Optics Communications*, 2004, 242(4/6): 487-502.
- [42] Wang Yong. Stimulated Raman scattering in high-power double-clad fiber lasers and power amplifiers[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44: 114202.
- [43] Ye Yun, Xi Xiaoming, Shi Chen, et al. Experimental study of 5-kW high-stability monolithic fiber laser oscillator with or without external feedback[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11: 1503508.
- [44] Lai P Y, Chang Chunlin, Huang S L, et al. Effective suppression of stimulated Raman scattering in high power fiber amplifiers using double-pass scheme[C]//*Proceedings of SPIE 8961, Fiber Lasers XI: Technology, Systems, and Applications*. 2014: 89612T.
- [45] Zhang Tianzi, Ding Yingchun, Liu Zhongxuan, et al. An optimization of Raman effects in tandem-pumped Yb-doped kilowatt fiber amplifiers[C]//*Proceedings of SPIE 9524, International Conference on Optical and Photonic Engineering*. 2015: 95240Y.
- [46] 叶云, 王小林, 史尘, 等. 高功率掺镱光纤激光振荡器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55: 120006. (Ye Yun, Wang Xiaolin, Shi Chen, et al. Research progress in high power ytterbium doped fiber laser oscillator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55: 120006)
- [47] Ye Yun, Yang Baolai, Wang Xiaolin, et al. Experimental study of SRS threshold dependence on the bandwidths of fiber Bragg gratings in co-pumped and counter-pumped fiber laser oscillator[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21: 025801.
- [48] Schreiber T, Liem A, Freier E, et al. Analysis of stimulated Raman scattering in cw kW fiber oscillators[C]//*Proceedings of SPIE 8961, Fiber Lasers XI: Technology, Systems, and Applications*. 2014: 89611T.
- [49] Liu Wei, Ma Pengfei, Lv Haibin, et al. General analysis of SRS-limited high-power fiber lasers and design strategy[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26715-26721.
- [50] Lin Weixuan. Stimulated Raman scattering and intermodal coupling in continuous-wave high power fiber lasers[D]. Montreal: McGill University, 2018.
- [51] Jansen F, Nodop D, Jauregui C, et al. Suppression of stimulated Raman scattering in high-power fiber laser systems by lumped spectral filters[C]//*Proceedings of SPIE 7580, Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications*. 2010: 75802I.
- [52] 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.
- [53] Heck M, Bock V, Krämer R G, et al. Mitigation of stimulated Raman scattering in high power fiber lasers using transmission gratings[C]//*Proceedings of SPIE 10512, Fiber Lasers XV: Technology and Systems*. 2018: 105121I.
- [54] Jiao Kerong, Shen Hua, Guan Zhiwen, 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.
- [55] Wang Meng, Zhang Yujing, Wang Zefeng, 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.
- [56] Wang Meng, Hu Qihao, Liu Le, et al. Suppression of stimulated Raman scattering in a monolithic fiber laser oscillator using chirped and tilted fiber Bragg

- gratings[C]//Proceedings of SPIE 10811, High-Power Lasers and Applications IX. 2018: 108110V.
- [57] Wang Zefeng, Wang Meng, Hu Qihao. Filtering of stimulated Raman scattering in a monolithic fiber laser oscillator using chirped and tilted fiber Bragg gratings[J]. *Laser Physics*, 2019, 29: 075101.
- [58] Jiao Kerong, Shu Jian, Shen Hua, 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: 02000e31.
- [59] Zhao Xiaofan, Tian Xin, Hu Qihao, et al. Raman suppression in a high-power single-mode fiber oscillator using a chirped and tilted fiber Bragg grating[J]. *Laser Physics Letters*, 2021, 18: 035103.
- [60] Wang Meng, Liu Le, Wang Zefeng, 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.
- [61] Tian Xin, Zhao Xiaofan, Wang Meng, et al. Effective suppression of stimulated Raman scattering in direct laser diode pumped 5 kilowatt fiber amplifier using chirped and tilted fiber bragg gratings[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17: 085104.
- [62] Wang Meng, Wang Zefeng, Liu Le, 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.
- [63] Tian Xin, Zhao Xiaofan, Wang Meng, 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.
- [64] 张俊, 冯莹, 陈爽. 大功率双包层光纤激光器拉曼效应分析[J]. *量子电子学报*, 2007, 24(6): 757-762. (Zhang Jun, Feng Ying, Chen Shuang. Analysis of Raman effects in high power double-clad fiber laser[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2007, 24(6): 757-762)
- [65] Chen Heng, Cao Jianqiu, Huang Zhihe, et al. Experimental investigations on multi-kilowatt all-fiber distributed side-pumped oscillators[J]. *Laser Physics*, 2019, 29: 075103.
- [66] Chen Heng, Cao Jianqiu, Huang Zhihe, et al. 3-kilowatt all-fiber distributed side-pumped oscillator with high SRS suppression[C]//Proceedings of 2018 Asia Communications and Photonics Conference. 2018.
- [67] Huang Zhihe, Cao Jianqiu, An Yingye, et al. A kilowatt all-fiber cascaded amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(16): 1683-1686.
- [68] Ying Hanyuan, Yu Yu, Cao Jianqiu, et al. 2 kW pump-light-stripper-free distributed side-coupled cladding-pumped fiber oscillator[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14: 065102.
- [69] Wang Jianming, Yan Dapeng, Xiong Songsong, et al. High power all-fiber amplifier with different seed power injection[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14463-14469.
- [70] Tee P S, Lewis R J, Alam S U, et al. 200 W Diffraction limited, single-polarization, all-fiber picosecond MOPA[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 25883-25889.
- [71] Ying Hanyuan, Cao Jianqiu, Yu Yu, et al. Raman-noise enhanced stimulated Raman scattering in high-power continuous-wave fiber amplifier[J]. *Optik*, 2017, 144: 163-171.
- [72] Hu Shuling, Zhang Chunxi, Wang Shouchao, et al. Self-pulsing behavior in high-power ytterbium-doped fiber lasers[C]//Proceedings of SPIE 6823, High-Power Lasers and Applications IV. 2008: 68230D.
- [73] Bock V, Schultze T, Liem A, et al. The influence of different seed sources on Stimulated Raman Scattering in fiber amplifiers[C]//The European Conference on Lasers and Electro-Optics 2017. 2017: CJ\_4\_3.
- [74] Li Tenglong, Zha Congwen, Sun Yin hong, et al. 3.5 kW bidirectionally pumped narrow-linewidth fiber amplifier seeded by white-noise-source phase-modulated laser[J]. *Laser Physics*, 2018, 28: 105101.
- [75] 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.
- [76] Liu Wei, Ma Pengfei, Lv Haibin, et al. Investigation of stimulated Raman scattering effect in high-power fiber amplifiers seeded by narrow-band filtered superfluorescent source[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8708-8717.
- [77] Bock V, Liem A, Schreiber T, et al. Explanation of Stimulated Raman Scattering in high power fiber systems[C]//Proceedings of SPIE 10512, Fiber Lasers XV: Technology and Systems. 2018: 105121F.
- [78] Li Tenglong, Ke Weiwei, Ma Yi, et al. Suppression of stimulated Raman scattering in a high-power fiber amplifier by inserting long transmission fibers in a seed laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(6): 1457-1465.
- [79] Wang Yanshan, Peng Wanqing, Ke Weiwei, et al. Influence of seed instability on the stimulated Raman scattering of high power narrow linewidth fiber amplifier[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52: 193.
- [80] Yin Lu, Han Zhigang, Shen Hua, et al. Suppression of inter-modal four-wave mixing in high-power fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15804-15818.
- [81] Babin S A, Churkin D V, Ismagulov A E, et al. Four-wave-mixing-induced turbulent spectral broadening in a long Raman fiber laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(8): 1729-1738.
- [82] Hu Man, Ke Weiwei, Yang Yifeng, et al. Low threshold Raman effect in high power narrowband fiber amplifier[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14: 011901.
- [83] Liu Wei, Ma Pengfei, Zhou Pu, et al. Effects of four-wave-mixing in high-power Raman fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(1): 593-606.