

引用格式:周朴,马鹏飞,任帅,等.高功率窄线宽光纤激光的研究进展与发展趋势[J].信息对抗技术,2023,2(4/5):16-36. [ZHOU Pu, MA Pengfei, REN Shuai, et al. High-power narrow linewidth fiber laser: progress and prospect[J]. Information Countermeasure Technology, 2023, 2(4/5):16-36. (in Chinese)]

## 高功率窄线宽光纤激光的研究进展与发展趋势

周朴<sup>1\*</sup>, 马鹏飞<sup>1,2,3</sup>, 任帅<sup>1,4</sup>, 陈益沙<sup>1</sup>,  
刘伟<sup>1,2,3</sup>, 姚天甫<sup>1</sup>, 潘志勇<sup>1,2,3</sup>, 陈金宝<sup>1,2,3</sup>

(1. 国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073; 2. 国防科技大学南湖之光实验室, 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; 4. 国防科技大学信息通信学院, 湖北武汉 430035)

**摘要** 高功率窄线宽光纤激光器具有光束质量好、结构紧凑等优点,在相干合成、光谱合成以及非线性频率变换等领域具有广泛的应用前景,基于窄线宽光纤激光相干合成、光谱合成的激光系统性能指标已经超越单束激光的最高性能,基于窄线宽光纤激光非线性频率变换的激光也实现了同类波段激光的最高性能。分析窄线宽光纤激光功率提升同时保持光束质量过程中产生的物理机制和面临的技术挑战,详细介绍学校课题组在高功率窄线宽光纤激光方面取得的代表性成果,特别是高光束质量的7 kW级非线偏振窄线宽激光和5 kW级线偏振窄线宽激光,不仅是同类激光的最高功率值,也逼近了同等条件下非窄线宽光纤激光的功率极限。根据近年来理论研究和攻关结果,结合国内外研究现状,对高功率窄线宽光纤激光未来几个发展趋势进行预判。

**关键词** 高功率; 光纤激光; 窄线宽; 非线性效应; 横向模式不稳定

**中图分类号** TN 248

**文章编号** 2097-163X(2023)04/05-0016-21

**文献标志码** A

**DOI** 10.12399/j.issn.2097-163x.2023.04-05.002

## High-power narrow linewidth fiber laser: progress and prospect

ZHOU Pu<sup>1\*</sup>, MA Pengfei<sup>1,2,3</sup>, REN Shuai<sup>1,4</sup>, CHEN Yisha<sup>1</sup>,  
LIU Wei<sup>1,2,3</sup>, YAO Tianfu<sup>1</sup>, PAN Zhiyong<sup>1,2,3</sup>, CHEN Jinbao<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
3. Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha 410073, China;  
4. School of Information and Communications, National University of Defense Technology, Wuhan 430035, China)

**Abstract** High power narrow linewidth fiber lasers have a wide application prospect in the fields of coherent beam combining, spectral beam combining and nonlinear frequency conversion due to the inherent characteristic of high beam quality and structural compactness. Laser system indices based on coherent beam combining and spectral beam combining of narrow linewidth fiber laser have surpassed the best performance of single laser beam, and lasers based on nonlinear frequency conversion of narrow linewidth fiber laser have achieved the highest output properties of the counterparts with same wavelength region. This work has systemati-

cally analyzed the underlying physical mechanism and emerging technical challenges of narrow linewidth fiber laser power scaling without beam quality deterioration. Furthermore, it introduced representative achievements of the high power narrow linewidth fiber laser realized by our research group in detail, especially 7 kW level non-polarization-maintained narrow linewidth fiber laser and 5 kW level linearly-polarized narrow linewidth fiber laser, which have also approached power scaling capability limit of non-narrow linewidth counterparts at the same conditions. According to recent theoretical and key technical tackling results, we have anticipated the development tendency of high power narrow linewidth fiber laser on the basis of the current status at home and abroad.

**Keywords** high power; fiber laser; narrow linewidth; nonlinear effect; transverse mode instability

## 0 引言

光纤激光器具有结构紧凑、转换效率高、操作灵活、易于热管理等优势,在制造、能源、医疗以及国家安全等领域得到了广泛应用。随着双包层光纤的发明和泵浦能力的提升<sup>[1-2]</sup>,光纤激光器的功率水平不断实现新的突破;以掺镱光纤作为增益介质的光纤放大器已经获得了功率为 10 kW 的单模光纤激光输出<sup>[3]</sup>,约 20 年的时间内,单束激光的输出功率提升了 3 个量级。然而,由于受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)、受激拉曼散射(stimulated Raman scattering, SRS)等非线性效应以及横向模式不稳定(transverse mode instability, TMI)效应<sup>[3]</sup>等物理因素的影响,光纤激光器的功率增长遇到了瓶颈期,10 多年来,没有取得进一步的功率提升<sup>[4]</sup>。

与此同时,基于多束窄线宽光纤激光的光束合成近年来取得了显著成效,无论是对不同中心波长窄线宽光纤激光的光谱合成,还是对相同中心波长窄线宽光纤激光的相干合成,都实现了数万瓦级功率输出的同时保持良好光束质量<sup>[5-6]</sup>,性能指标方面都超过了目前单束激光的最高值<sup>[7-9]</sup>。此外,窄线宽光纤激光由于具有较好的时间相干性,在非线性频率变换等方面得到了广泛应用<sup>[10-11]</sup>,例如,研究人员已经利用窄线宽光纤激光实现了 kW 单模绿光输出<sup>[12-13]</sup>,也是目前单模绿光激光的最高技术指标。另外,有一类极窄线宽(线宽通常在 kHz 以下、单频运行)的激光<sup>[14]</sup>,是引力波探测、激光雷达等精密测量领域的重要光源选项。

鉴于高功率窄线宽光纤激光在光束合成型高能激光系统、频率变换型激光对抗系统以及精密测量等领域的需求和潜力,在国家自然科学基金重点项目/面上项目/青年项目、装备预研领域基金重点项目、国家重点研发计划项目等支持下,国防科技大学课题组(后文简称“课题组”)面向高功率窄线宽光纤激光开展科研攻关,在物理机制、关键技术、系统集成和应用等方面均取得了显著成果。在极窄线宽(单频)光纤激光方面,国际上首次实现全光纤结构 300 W 级(2013 年)、400 W 级(2017 年)和 500 W 级(2020 年)功率输出;在常规窄线宽单模光纤激光方面,先后实现 4 kW 级(2018 年)、5 kW 级(2020 年)、6 kW 级(2021 年)、7 kW 级(2022 年)功率输出,一直保持国际公开报道的最高功率值<sup>[15-16]</sup>;基于自研窄线宽光纤激光和相位控制技术,国际首次实现光纤激光相干合成 kW 级(2010 年)功率输出,之后陆续实现 5 kW 级(2016 年)、8 kW 级(2019 年)和 20 kW 级(2021 年)功率输出。本文聚焦常规窄线宽单模光纤激光,系统梳理放大结构中激光功率提升的主要受限因素及抑制方法,以偏振态和波长为区分,分别介绍国内外相关类型窄线宽光纤激光研究进展和代表性成果,重点分析课题组在相关领域取得的技术突破,结合理论分析、器件研制和实验数据等方面的最新研究成果,对未来发展趋势进行深入讨论和研判。

## 1 高功率窄线宽光纤激光发展的主要受限因素及抑制方法

目前,主振荡功率放大器结构(master oscillator power amplifier, MOPA)是实现高功率窄

线宽光纤激光的主要方式。放大器中的 SBS、SRS 等传统非线性效应和新近发现的 TMI 效应是限制窄线宽光纤激光功率提升的同时保持良好光束质量的重要因素<sup>[17]</sup>,而且传统非线性效应和 TMI 效应的抑制方法方面往往是相互制约的,这更增加了研究难度。

SBS 效应产生的高峰值功率脉冲会破坏激光系统中的光纤或者器件,而且产生阈值通常低于 SRS 效应,因此是限制窄线宽光纤激光器功率提升的重要因素。目前抑制 SBS 效应的方法主要有 2 类:一是对光纤参数进行优化<sup>[18-20]</sup>进而降低 SBS 效应的增益系数,最常见的方法是减小光纤长度<sup>[21-22]</sup>、增大光纤纤芯直径<sup>[23-24]</sup>以及增益裁剪光纤设计<sup>[25-30]</sup>等;二是对光纤放大器系统参数进行优化,主要包括展宽种子光线宽<sup>[31-43]</sup>、优化泵浦方式<sup>[44-46]</sup>、引入增益竞争<sup>[31,47-48]</sup>、施加应力或温度梯度<sup>[26,44,49-52]</sup>等。其中,采用相位调制技术对单频激光器进行线宽展宽因具有光谱纯度好、时序稳定<sup>[53-55]</sup>等优势,是当前千瓦级以上窄线宽光纤放大器中应用最广泛的技术方案<sup>[56-67]</sup>。

当激光输出的平均功率到达 kW(以上)时,SRS 效应成为另外一种限制因素,它引起的能量转移会降低转换效率、引发模式耦合,从而限制功率提升和光束质量保持。目前抑制 SRS 效应的方法也主要有 2 类:一是从光纤设计和放大器结构优化的角度,通过特定的技术手段减小系统中的拉曼 Stokes 光增益,例如增大光纤有效模场面积<sup>[68-69]</sup>、增大拉曼 Stokes 光损耗<sup>[70-71]</sup>、减小信号光与拉曼 Stokes 光的重叠因子<sup>[72-74]</sup>、优化光纤激光器泵浦结构<sup>[75-76]</sup>等;二是通过滤除种子激光中的拉曼光成分,实现对 SRS 效应的有效抑制<sup>[77-78]</sup>,实验表明了该方法的有效性。

相比于经典的 SBS 和 SRS 效应,TMI 效应是新近才被发现的一种新机制。2010 年,CHRISTIAN 等<sup>[79]</sup>首次在实验中观察到了 TMI 效应。当输出功率在 TMI 阈值以下时,输出光束呈现出稳定的基模状态;当超过 TMI 阈值时,基模和高阶模式之间会产生快速的能量转移,光束形状开始在毫秒时间尺度上发生波动,同时会伴随着输出功率的滞涨和光束质量的退化。目前,高功率光纤激光系统中提升 TMI 阈值的方法主要包括优化种子激光和泵浦方式、研发新型光纤以及增加高阶模损耗等。其中,种子激光优化技

术包括提高种子光功率和线宽<sup>[80-83]</sup>;优化泵浦方式主要包括采取后向泵浦方式、前后向泵浦功率按一定比例配比的双向泵浦方式<sup>[45,84]</sup>、使用中心波长为 915 nm 的泵浦光以及同带泵浦技术等<sup>[45,85-87]</sup>;新型光纤研发包括设计锥形光纤<sup>[88]</sup>、部分掺杂光纤<sup>[87,89]</sup>、声场裁剪光纤<sup>[26]</sup>、光子带隙光纤<sup>[90]</sup>以及多芯光纤<sup>[91]</sup>等。其中,对增益光纤进行弯曲绕制以增加高阶模损耗,是一种可显著提升 TMI 阈值的简单有效方式<sup>[65,92-94]</sup>,在实际高功率光纤激光系统中应用较为广泛。

需要注意的是,SBS、SRS 等非线性效应和 TMI 效应均与偏振态是相关的。研究表明,相比于非保偏光纤,保偏光纤中的非线性效应更强<sup>[18,95-100]</sup>、TMI 阈值更低<sup>[101-103]</sup>。因此,窄线宽线偏振光纤激光的功率提升面临更为严峻的技术挑战。

## 2 高功率窄线宽非保偏光纤激光的研究进展

窄线宽种子通常采用窄线宽半导体激光、宽谱光源窄带滤波、窄线宽光纤振荡器以及相位调制单频激光器等技术实现<sup>[104]</sup>。表 1 列出了当前国内外采用窄线宽半导体激光、窄线宽振荡器和宽谱光源窄带滤波等 3 类种子源的窄线宽非保偏光纤激光器研究成果<sup>[105-109]</sup>。

采用窄线宽光纤振荡器作为种子源进行功率放大具有结构简单、系统紧凑的特点,因此,基于单级振荡器 MOPA 结构实现高功率窄线宽光纤激光器受到研究人员的持续关注。中国工程物理研究院课题组和清华大学课题组基于该方案实现了 3 kW 级窄线宽光纤激光器输出<sup>[36,106-107]</sup>。近年来,课题组通过优化种子时域特性和放大器结构,有效提升系统的非线性效应和 TMI 效应阈值,实现了窄线宽非保偏光纤激光功率 6 kW 级功率输出的突破。

由于窄线宽振荡器种子的时序特性,通常会出现随着输出功率增长出现光谱展宽的现象。采用相位调制技术对单频激光进行线宽展宽获得的窄线宽种子具有时序稳定、非线性效应阈值高、放大过程中光谱特性保持良好等特性。目前,在实际高功率光纤激光系统中运用比较成熟的相位调制技术主要有正弦(Sine)相位调制、伪随机二进制序列(pseudo-random binary

sequence, PRBS) 编码相位调制和白噪声信号 (white noise sigal, WNS) 相位调制等。表 2 为目前国内外基于相位调制单频激光器的高功率非保偏窄线宽光纤激光的研究成果<sup>[110-118]</sup>。

表 1 基于不同类型种子激光的高功率非保偏窄线宽光纤激光器研究成果

Tab. 1 Results of high-power non-polarization-maintained narrow linewidth fiber lasers based on different types of seed lasers

种子类型	年份	机构	中心波长 /nm	功率 /kW	线宽	$M^2$	文献
窄线宽半导体激光	2017	美国陆军研究实验室	—	1.6	40 GHz	—	[32]
	2019	韩国国防发展局	1 064	2.05	0.24 nm	1.28	[33]
宽谱光源窄带滤波	2015	国防科技大学	1 080	1.87	1.7 nm	1.71	[37]
	2016	上海光机所	1 064	2.5	0.18 nm	<1.19	[105]
	2017	上海光机所	1 064	2.7	50 GHz	<1.2	[38]
窄线宽光纤振荡器	2016	中国工程物理研究院	1 064	2.9	0.31 nm	—	[36]
	2019	清华大学	1 070	2.19	86.5 pm	1.46	[35]
	2021	清华大学	1 070	3.01	103 pm	2.41	[106]
	2022	清华大学	1 064	3.31	0.40 nm	1.32	[107]
	2022	国防科技大学	1 080	5	0.48 nm	<1.25	[108]
	2022	国防科技大学	1 080	6.02	0.36 nm	2.7	[109]

表 2 基于相位调制单频激光器的高功率窄线宽非保偏光纤激光器研究成果

Tab. 2 Results of high-power narrow linewidth non-polarization-maintained fiber lasers based on phase modulation techniques

调制信号	年份	机构	中心波长 /nm	功率 /kW	线宽	$M^2$	文献
Sine	2011	美国 Fibertek 公司	1 064	1	<0.5 GHz	<1.4	[57]
	2014	美国空军实验室	1 064	1.17	3 GHz	1.2	[59]
	2015	美国空军实验室	1 064	1.47	5 GHz	<1.1	[110]
PRBS	2018	美国密歇根大学	1 064	2.2	20 GHz	1.09	[111]
	2020	上海光机所	1 082	1.27	2.2 GHz	<1.2	[60]
	2020	新加坡国防科技研究院	1 036~1 071	1	6.9 GHz	1.19	[112]
WNS	2018	国防科技大学	1 064	3.94	0.89 nm	1.86	[113]
	2018	中国工程物理研究院	1 064	3.5	0.38 nm	1.9	[114]
	2019	上海光机所	1 064	3.01	48 GHz	1.17	[42]
	2019	中国工程物理研究院	1 064	3.7	0.3 nm	<1.36	[62]
	2021	国防科技大学	1 071	4.92	0.59 nm	1.22	[64]
	2021	中国工程物理研究院	1 064	5.07	0.37 nm	<1.32	[63]
	2022	国防科技大学	1 080	6.12	0.86 nm	<1.43	[56]
	2022	国防科技大学	1 080	7.03	0.76	<1.26	[115]
相位调制信号不明	2017	耶拿大学(空间结构)	1 067	3.5	0.18 nm	1.3	[116]
	2018	耶拿大学(空间结构)	1 067	4.4	—	—	[117]
	2018	IPG 公司	1 064	2.5	30 GHz	1.08	[118]

2017年,德国耶拿大学课题组基于自研的低数值孔径增益光纤搭建了高功率光纤激光器,实验结构如图1所示<sup>[116]</sup>。窄线宽种子由相位调制单频激光器实现,调制后的种子光谱线宽为0.18 nm,但其具体的调制信号格式没有明确。在实验中,当采用长度为35 m、纤芯/包层直径为30/460  $\mu\text{m}$ 的自研低数值孔径光纤时,获得了2.8 kW的窄线宽激光输出,进一步的功率提升受限于TMI效应;当采用长度为30 m、纤芯/包层直径为23/460  $\mu\text{m}$ 的自研低数值孔径光纤时,实现了3.5 kW的窄线宽激光输出,功率提升受限于SBS效应<sup>[116]</sup>。2018年,耶拿大学设计了数值孔径为0.046、模场直径为19.4  $\mu\text{m}$ 的增益光纤,并对增益光纤的弯曲直径进行优化,输出功率突破了4.4 kW,但是没有提及输出激光的线宽和光束质量<sup>[117]</sup>。上述耶拿大学报道的高功率窄线宽光纤激光均是基于空间结构实现,系统结构较为复杂。

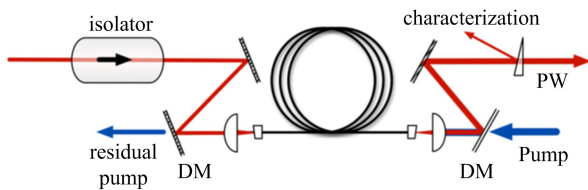


图1 德国耶拿大学基于空间结构的高功率窄线宽光纤激光结构示意图

Fig. 1 Schematic of high power narrow linewidth fiber laser structure based on spatial structure obtained by Jena University, Germany

全光纤结构方面,在2018年和2019年,中国工程物理研究院课题组采用WNS相位调制单频激光器作为种子源,分别实现了功率为3.5 kW、3.7 kW的窄线宽激光输出。2021年,中国工程物理研究院课题组采用常规掺镱大模场阶跃折射率光纤构建高功率窄线宽光纤放大器,研究了增益光纤水冷温度、增益光纤长度、泵浦方式以及高阶模弯曲损耗等对非线性效应或TMI效应的影响。最终实现了5.04 kW的激光输出,最大功率下无TMI效应,SRS效应和SBS效应被有效抑制,3 dB线宽为0.37 nm,光束质量因子 $M_x^2 = 1.25$ 、 $M_y^2 = 1.32$ <sup>[63]</sup>。

近年来,课题组在全光纤结构窄线宽光纤放大器方面取得了典型成果。课题组基于常规阶跃折射率掺镱光纤,采用WNS相位调制单频激

光器进行线宽展宽抑制SBS效应,通过不断优化放大器结构参数减轻TMI效应,窄线宽非保偏光纤激光的输出功率先后达到了3.94、4.92、6.12、7.03 kW。需要注意的是,上述6 kW级和7 kW级光纤放大器均是基于课题组自研纤芯/包层直径为20/400  $\mu\text{m}$ 的大模场双包层掺镱光纤所实现的。其中在设计7 kW级窄线宽光纤激光系统时,综合考虑了既有SBS、SRS和TMI效应的抑制方案及其差异,采用WNS单频相位调制激光器作为窄线宽种子,基于自研的低数值孔径掺镱光纤构建放大器,通过优化高阶模弯曲损耗和前向、后向泵浦功率配比提升TMI阈值,最终实现了输出激光功率为7.03 kW的突破。实验结果如图2所示。在最高输出功率下,光谱3 dB线宽为0.76 nm,光束质量为 $M_x^2 = 1.26$ 、 $M_y^2 = 1.25$ ,SRS信噪比约为32 dB,SRS效应限制了放大器功率的进一步提升<sup>[115]</sup>,这是目前近单模窄线宽光纤放大器的最高功率值,并且输出功率与同等条件下非窄线宽光纤激光的最高输出功率已经差别不大。

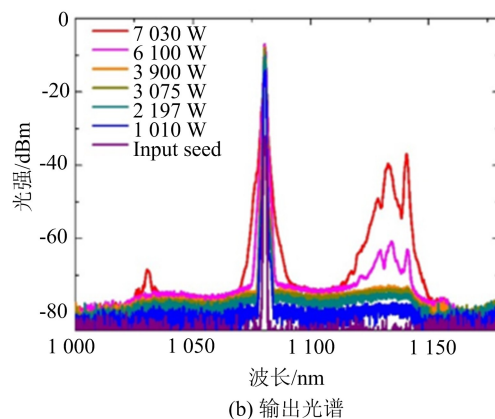
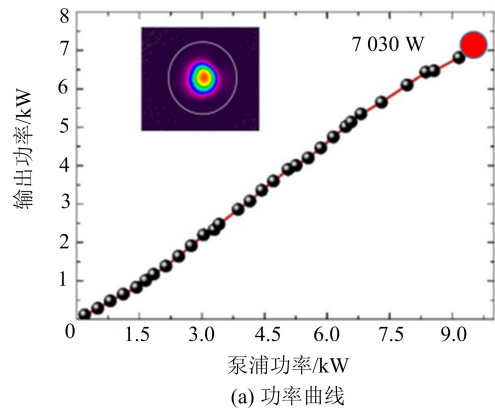


图2 课题组7 kW级窄线宽光纤激光输出特性  
Fig. 2 Output characteristics of 7 kW narrow linewidth fiber laser

### 3 高功率窄线宽线偏振光纤激光的研究进展

对于激光合成、非线性频率变换等场景,线偏振窄线宽激光会有更高的合成(变换)效率。然而,由于非线性效应和 TMI 效应的偏振敏感性,线偏振窄线宽光纤激光器的功率增长和光束质量保持更加困难。目前主要有两种方案实现线偏振激光输出:一是采用保偏器件搭建全保偏结构光纤放大器;二是通过非保偏结构光纤放大器中实施主动偏振控制。下面分别介绍上述 2 种方案的研究进展。

#### 3.1 基于全保偏结构的高功率窄线宽光纤放大器

表 3 是基于保偏宽谱光源窄带滤波和保偏窄线宽光纤振荡器的高功率线偏振光纤激光研究成果<sup>[119-121]</sup>。

采用窄线宽光纤振荡器作为种子源进行功率放大,具有成本低和系统设计简单的特点。

2017 年,课题组使用紧凑的一级放大结构对窄线宽光纤振荡器种子源进行功率放大,实现了偏振消光比为 14 dB、线宽为 0.3 nm,输出功率为 1.018 kW 的线偏振输出,光束质量  $M_x^2 = 1.18$ 、 $M_y^2 = 1.24$ <sup>[34]</sup>。2020 年,中国工程物理研究院采用保偏少纵模光纤振荡器来抑制频谱展宽,搭建了如图 3 所示的高功率窄线宽光纤放大器<sup>[121]</sup>。该放大器采用双向泵浦结构,长度为 9 m、纤芯/包层直径为 20/400  $\mu\text{m}$  的保偏掺镱光纤绕制在直径为 10 cm 的水冷装置上以增加高阶模损耗,泵浦功率由波长为 976 nm 的稳波长 LD 提供。最终,该保偏放大器的最高输出功率为 3.08 kW,3 dB 线宽为 0.2 nm,功率放大过程中的偏振消光比  $> 11.6$  dB,光束质量  $M^2 < 1.45$ ,最高功率下的 SRS 信噪比约为 20 dB,功率增长受限于 SRS 效应。该结果是目前公开报道的采用保偏光纤振荡器作为种子源的窄线宽线偏振光纤放大器的最高激光功率<sup>[121]</sup>。

表 3 基于不同类型种子激光的高功率线偏振窄线宽光纤激光器研究成果

Tab. 3 Results of high power polarization-maintained narrow linewidth fiber lasers based on different types of seed lasers

种子类型	年份	机构	中心波长 /nm	功率 /kW	线宽 /nm	$M^2$	PER /dB	文献
宽谱光源窄带滤波	2015	国防科技大学	1 064	0.80	0.2	1.28	12.2	[119]
	2017	国防科技大学	1 080	1.010	0.21	$< 1.15$	17.0	[120]
窄线宽光纤振荡器	2017	国防科技大学	1 064	1.018	0.3	$< 1.24$	14.0	[34]
	2020	中国工程物理研究院	1 064	3.080	0.2	$< 1.45$	11.6	[121]

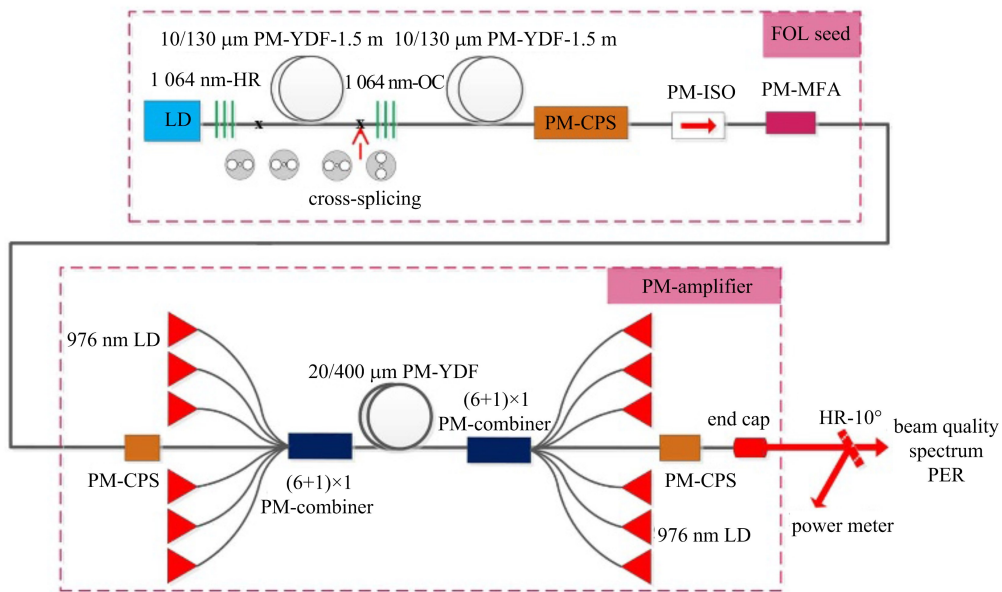


图 3 中国工程物理研究院课题组基于光纤振荡器的 3.08 kW 窄线宽保偏光纤激光结构示意图

Fig. 3 Schematic of 3.08 kW narrow linewidth polarization-maintained fiber laser based on fiber oscillator reported by CAEP

与非保偏窄线宽光纤激光类似,相位调制单频激光器也是目前保偏光纤放大器实现高功率窄线宽激光输出的重要方案。表4是近年来基于相位调制单频激光器的窄线宽线偏振光纤激光的典型研究成果<sup>[122-128]</sup>。

2016年,美国麻省理工学院课题组采用自研的镀金增益光纤,搭建了基于空间耦合结构的光纤放大器,实验结构如图4所示<sup>[61]</sup>。镀金

包层可改善光纤的热负荷从而提升TMI阈值,采用相位调制技术对种子激光进行线宽展宽,调制信号格式为PRBS。放大器采用双向泵浦方式,最终实现了功率为3.1 kW的线偏振激光输出,偏振消光比为10 dB,光谱线宽为12 GHz,光束质量 $M^2 < 1.15$ 。然而,该放大器采用空间结构,不利于其在合成系统中的应用。

表4 基于相位调制单频激光器的高功率保偏窄线宽光纤激光器研究成果

Tab. 4 Results of high-power narrow linewidth polarization-maintained fiber lasers based on phase modulation techniques

调制信号	年份	机构	中心波长 /nm	功率 /kW	线宽	$M^2$	PER /dB	文献
Sine	2016	国防科技大学	1 064	1.89	45 GHz	$<1.3$	15.5	[58]
	2019	国防科技大学	1 064	1.082	7.6 GHz	1.14	14	[48]
PRBS	2016	麻省理工学院	1 066	3.1	12 GHz	$<1.15$	10	[61]
	2019	韩国先进光子学研究所	1 064	0.818	6.6 GHz	—	13	[122]
	2017	国防科技大学	1 064	2.43	0.255 nm	—	18.3	[65]
WNS	2020	中国工程物理研究院	1 064	2.62	32 GHz	$<1.3$	14	[66]
	2022	国防科技大学	1 064	3.96	0.62 nm	$<1.41$	13.9	[123]
	2022	国防科技大学	1 064	4.515	0.33 nm	$<1.55$	10.3	[124]
	2022	国防科技大学	1 064	5.023	0.38 nm	$<1.43$	11.8	[125]
MPCS	2021	国防科技大学	1 064	1.023	4.6 GHz	$<1.29$	13.3	[31]
	2018	美国 IPG 公司	1 064	2.0	30 GHz	1.07	$>20$	[118]
调制信号未明确	2021	中国工程物理研究院	1 064	3.25	20 GHz	$<1.22$	15	[67]
	2021	中国工程物理研究院	1 064	3.6	23 GHz	1.21	15	[126]
	2022	中国工程物理研究院	1 064	4.45	0.08 nm	$<1.28$	17.7	[127]
	2022	中国工程物理研究院	1 064	5.043	0.2 nm	$<1.3$	16.5	[128]

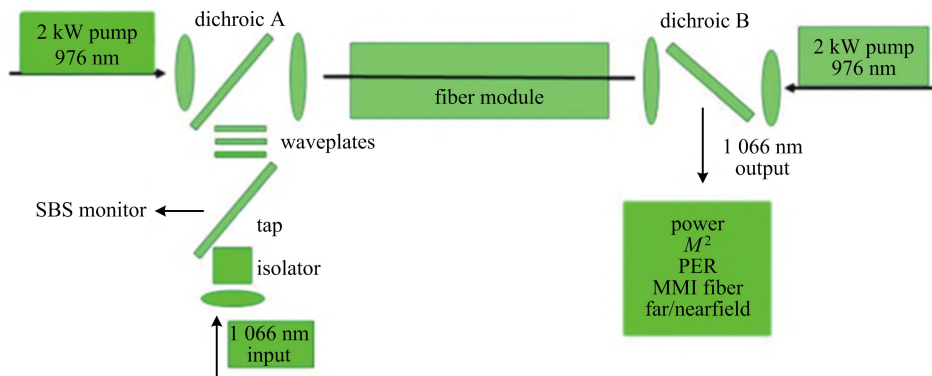


图4 美国麻省理工学院课题组基于PRBS相位调制的3.1 kW窄线宽光纤激光器

Fig. 4 Schematic of 3.1 kW narrow linewidth fiber laser based on PRBS phase modulation reported by MIT

2016 年,课题组采取三级级联正弦相位调制展宽种子激光线宽抑制 SBS 效应,主放大器采用长度为 8.5 m、纤芯/包层直径为 20/400  $\mu\text{m}$  保偏掺镱光纤,将增益光纤以 5.5 cm 的半径进行紧密绕制以提升 TMI 阈值,最终实现了功率为 1.89 kW、线宽为 45 GHz、偏振消光比为 15.5 dB 的线偏振激光输出<sup>[58]</sup>。2017 年,通过实验对比了保偏光纤放大器中增益光纤的不同弯曲方式对 TMI 阈值的影响。当把长度为 9 m、纤芯/包层直径为 20/400  $\mu\text{m}$  的保偏掺镱光纤绕制在直径

为 9 cm 的铝制圆柱状水冷装置上时,最终线偏振激光输出功率提升至 2.43 kW,光谱线宽和偏振消光比分别为 0.255 nm 和 18.3 dB,系统中没有出现 TMI 效应,功率增长受限于可用泵浦功率<sup>[65]</sup>。2022 年,采用白噪声相位调制结合弯曲损耗优化,实现了受 SBS 和横向模式不稳定的综合抑制,窄线宽线偏振近单模光纤激光先后突破了 4 kW 级、4.5 kW 级的高功率输出。图 5 为课题组 4 kW 级近单模窄线宽线偏振光纤放大器结构示意图<sup>[123]</sup>。

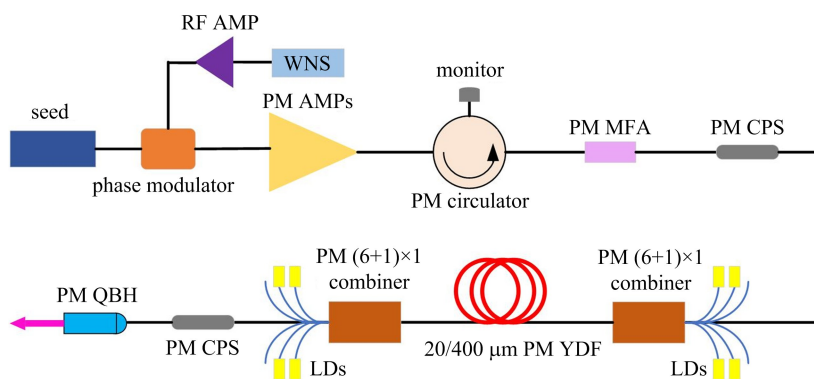


图 5 基于 WNS 相位调制的 4 kW 保偏光纤激光结构示意图

Fig. 5 Schematic of 4 kW polarization-maintained fiber laser based on WNS phase modulation

为实现更高功率、更窄线宽的线偏振激光输出,研究人员还提出了新的相位调制技术,并应用于高功率光纤激光系统。2018 年,美国 IPG 公司将单频激光器线宽展宽至 30 GHz 并进行功率放大,实现了功率为 2.0 kW 的近衍射极限线偏振激光输出,输出激光的偏振消光比  $> 20$  dB<sup>[118]</sup>。2021 年,课题组将其提出的新的相位调制技术——多相编码 (MPCS) 相位调制<sup>[129]</sup> 应用于高功率线偏振光纤激光,并联合使用增益竞争技术提升系统的 SBS 阈值,最终放大器输出功率为 1.023 kW,此时偏振消光比为 13.3 dB,光谱线宽为 4.6 GHz,光束质量为  $M_x^2 = 1.29$ 、 $M_y^2 = 1.28$ <sup>[31]</sup>。

2021 年,中国工程物理研究院基于新型相位调制技术产生的近平顶光谱,该种子光谱特性能够降低功率谱密度,从而实现对 SBS 效应的有效抑制。同时,为抑制 TMI 效应,对增益光纤的模式调控进行优化,获得了最大功率为 3.6 kW 的近单模线偏振激光输出,在最大功率下,信号激光偏振消光比为 15 dB,二阶矩线宽 (20 dB) 为 23 GHz<sup>[126]</sup>。2022 年,该研究团队通过进一步优化线偏振激光功率放大过程中的非线性效应和

TMI 效应抑制技术,最终实现了输出功率为 5.043 kW 的突破,在最大功率下,信号激光的二阶矩线宽 (20 dB) 为 0.2 nm,偏振消光比为 16.5 dB。该结果是目前近单模窄线宽线偏振光纤激光的最高输出功率<sup>[128]</sup>。

近年来,国产大模场保偏掺镱光纤的研制方面取得了重要进展,这也促进了线偏振窄线宽激光的技术进步。2023 年,华中科技大学课题组制备了数值孔径分别为 0.068、0.064 和 0.060 的 3 种保偏掺镱光纤,纤芯/内包层直径均为 20/400  $\mu\text{m}$ ,其预制棒折射率分布和光纤截面如图 6 所示。实验研究结果表明,通过降低数值孔径可以提升保偏掺镱光纤的 TMI 阈值;该课题组基于数值孔径为 0.060 的自研保偏光纤实现了最大功率为 3.2 kW、3 dB 线宽为 0.22 nm、偏振消光比为 16.6 dB 的窄线宽线偏振激光输出<sup>[130]</sup>。

2023 年,课题组基于自研的纤芯/包层直径为约 20/400  $\mu\text{m}$  的大模场保偏掺镱光纤搭建放大器,采用时域稳定的单频相位调制种子抑制非线性效应,通过弯曲损耗增加高阶模相对损耗提升 TMI 阈值,成功实现了最大功率为 5 kW 级的



近单模线偏振窄线宽光纤放大器,放大器运行在 5.023 kW 时,没有出现 TMI 效应<sup>[125]</sup>。实验结

果如图 7 所示,该结果是目目前基于国产保偏光纤实现的最高输出功率。

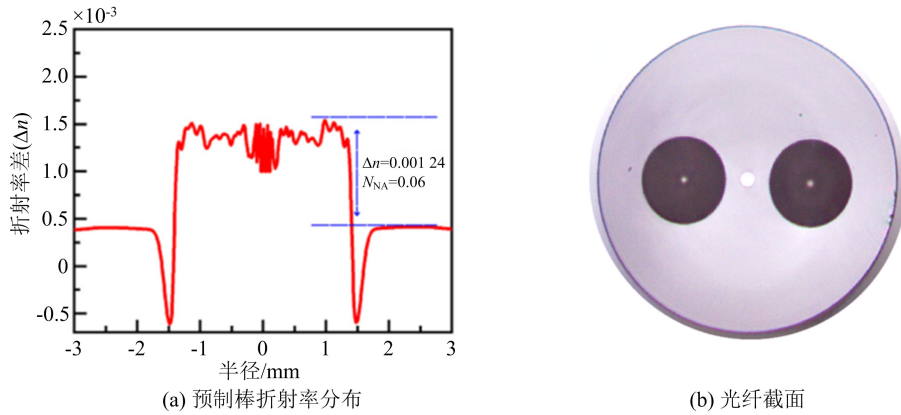


图 6 华中科技大学课题组研制的保偏掺镱光纤

Fig. 6 Polarization-maintained Yb-doped fiber developed by Huazhong University of Science and Technology

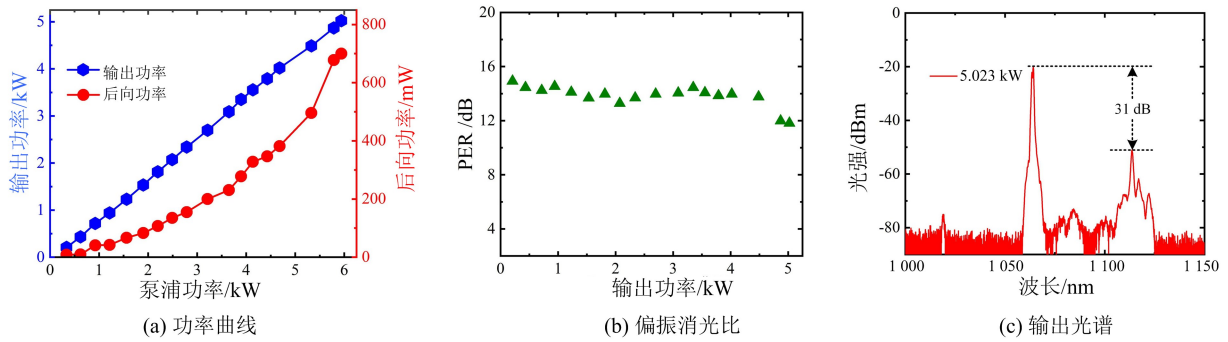


图 7 课题组基于自研保偏光纤的实验结果

Fig. 7 Experiment results of the home-made polarization-maintained fiber

### 3.2 基于主动偏振控制的高功率窄线宽光纤激光器

主动偏振控制技术的原理是将线偏振种子

源注入非保偏光纤放大器并通过反馈系统实施主动偏振控制,从而实现线偏振激光输出。表 5 是高功率偏振控制技术的代表性研究成果<sup>[131-134]</sup>。

表 5 基于主动偏振控制的高功率窄线宽光纤激光研究成果

Tab. 5 Results of high-power narrow linewidth fiber lasers based on active polarization control

年份	机构	中心波长 /nm	功率 /kW	线宽	$M^2$	PER /dB	文献
2010	美国格鲁曼公司	1 064	1.43	25 GHz	—	—	[131]
2017	中国工程物理研究院	1 064	1	6.5 GHz	1.1	14.5	[132]
2017	国防科技大学	1 064	1.43	0.17 nm	—	11.1	[133]
2018	美国 IPG 公司	1 064	2.5	30 GHz	1.08	16~17	[118]
2023	国防科技大学	1 071.5	3.378	0.32 nm	<1.50	12.2	[134]

2010 年,美国格鲁曼(Northrop Grumman)公司的 Goodno 等报道了高功率光纤放大器的偏振控制技术在相干合束系统中的应用,使用偏振控制器对系统中单路功率为 1.43 kW、线宽为 25 GHz 的非保偏光纤放大器进行偏振控制,但是相关的技术细节及偏振控制结果没有展

示<sup>[131]</sup>。2017 年,中国工程物理研究院采用保偏种子源和非保偏光纤放大器搭建了千瓦级光纤激光系统,通过白噪声相位调制,将单频保偏种子激光的线宽展宽至 6.5 GHz,种子光经过非保偏预放大器和主放大器进行功率放大后输出。基于随机并行梯度下降(stochastic parallel

gradient descent, SPGD)算法实施主动偏振控制,最终实现了功率为 1 kW、线宽为 6.5 GHz 的线偏振激光输出,最高功率下测得偏振消光比为 14.5 dB,光束质量  $M^2$  约为 1.1<sup>[132]</sup>。2018 年,美国 IPG 公司报道了 2.5 kW(非保偏)和 2 kW(保偏)的窄线宽近衍射极限光纤激光器。该公司在报道中提出,通过在其 2.5 kW 的非保偏光纤激光器中实施主动偏振控制,偏振消光比可达 16~17 dB,但是该公司的报道未展示其偏振控制的技术细节<sup>[118]</sup>。

2017 年,课题组搭建了基于主动偏振控制的高功率窄线宽光纤激光系统,首次详细介绍了偏振控制算法、实现方法及测试结果,实验结构如图 8 所示<sup>[133]</sup>。该系统由白噪声相位调制产生的窄线宽种子、偏振控制系统以及三级非保偏光纤放大器构成,采用 SPGD 算法实施偏振控制。最终,获得了最高功率为 1.43 kW、偏振消光比为 11.1 dB、线宽为 0.17 nm 的线偏振激光输出,功

率放大过程中,光束质量保持良好,功率增长受限于可用泵浦功率。

2023 年,课题组建立了基于均方根传播(root mean square propagation, RMS-Prop)算法主动偏振控制的理论模型,仿真分析了算法中各主要参数对偏振控制效果的影响关系,自行设计并实现了算法控制电路,搭建了基于主动偏振控制的高功率窄线宽光纤激光器,实验结构如图 9 所示<sup>[134]</sup>,主要由线偏振窄线宽种子、非保偏级联光纤放大链路和主动偏振控制系统构成。运用 RMS-Prop 算法在高功率非保偏光纤放大器中实施偏振控制后,实现了最高功率为 3.378 kW、偏振消光比为 12.2,3 dB 光谱线宽为 0.32 nm 的线偏振激光输出,最高功率下的光束质量为  $M_x^2 = 1.39, M_y^2 = 1.50$ <sup>[134]</sup>。该结果是当前基于主动偏振控制技术在非保偏光纤放大器中所实现的最高功率窄线宽线偏振近单模激光输出。

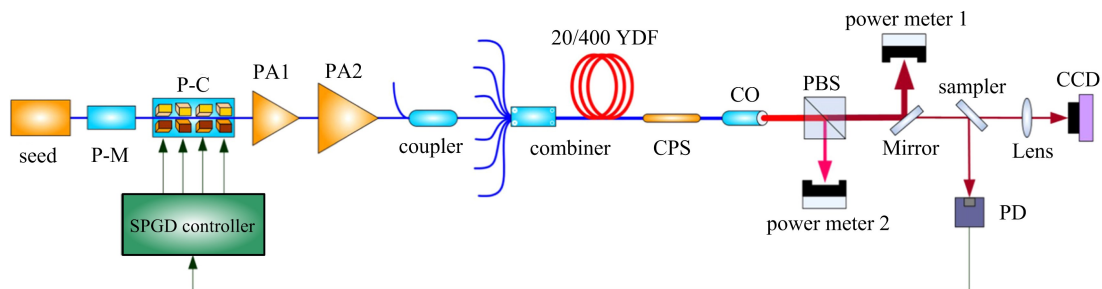


图 8 课题组基于 SPGD 算法主动偏振控制的 1.43 kW 光纤激光结构示意图

Fig. 8 Schematic of 1.43 kW fiber laser with SPGD algorithm associated active polarization control

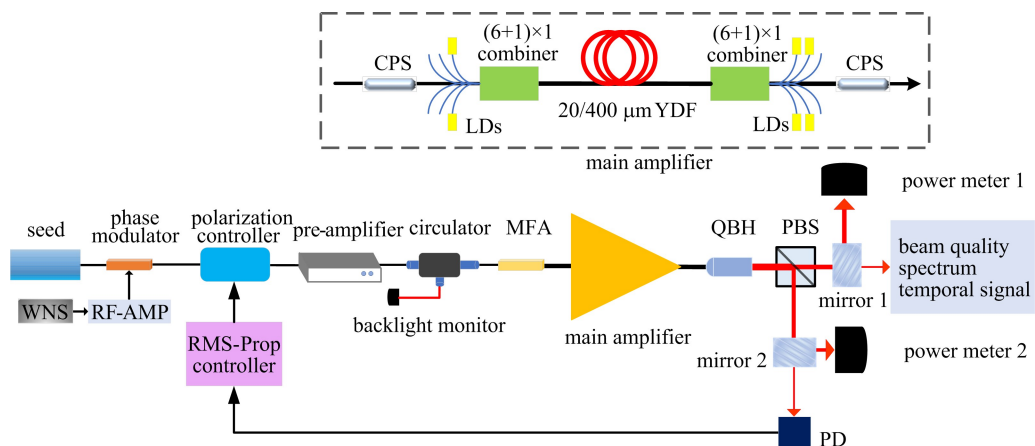


图 9 课题组基于主动偏振控制的高功率窄线宽光纤激光器结构示意图

Fig. 9 Schematic of the high power narrow linewidth fiber laser based on active polarization control

#### 4 高功率特殊波长窄线宽光纤激光的研究进展

本节介绍的高功率光纤激光中心波长主要

处于 1 060~1 080 nm 的波段,上述波段处于掺镱光纤净增益截面比较大的区间,有利于功率放大。然而,对于实际应用而言,将光纤激光波长拓展到其他特殊波长具有重要意义。例如,工作

在 1018 nm 波长的高功率光纤激光器具有高亮度特性,非常适合用作同带泵浦技术的泵浦源<sup>[135]</sup>;对于光谱合成而言,波长扩展 1030 nm 意味着可用于合束系统的单路激光光束数量的增加,这有助于光谱合成系统的激光路数扩展和系统总功率提升。尽管输出激光向短波长拓展面临严重的激光重吸收、放大自发发射(amplified spontaneous emission, ASE)和寄生激光的激烈增益竞争等技术难题<sup>[136]</sup>,由于应用需求牵引和光纤工艺改进和关键技术突破,高功率特殊波长窄线宽光纤激光也取得了重要进展。表 6 为高功率特殊波长非保偏窄线宽光纤激光的代表性研究成果<sup>[137-145]</sup>。

2020 年,中国工程物理研究院对 1 030 nm 光纤激光器的 ASE 效应进行了理论研究,基于理

论分析结果优化光纤激光器系统参数,最终实现了功率为 3 kW 的近单模光纤激光器,最高功率下的光谱线宽为 0.18 nm, ASE 抑制比为 37 dB。

对于长波(例如>1 100 nm)波段,研究人员通常采用拉曼放大的方式实现高功率输出。2021 年,课题组搭建了 976 nm 半导体激光泵浦窄线宽混合增益光纤放大器,实验结构如图 10 所示<sup>[145]</sup>。采用时域稳定的相位调制单频激光作为种子激光,有效抑制了光谱展宽和二阶拉曼光的产生。基于该系统实现了功率为 2.03 kW、波长为 1 120 nm、3 dB 光谱线宽为 0.53 nm 的窄线宽光纤激光输出。该结果为目前已知公开报道的波长为 1 120 nm 窄线宽光纤激光的最高功率<sup>[145]</sup>。在高功率特殊波长线偏振窄线宽光纤激光方面,近年来也取得了明显进展,代表性研究成果见表 7 所列<sup>[146-149]</sup>。

表 6 高功率特殊波长非保偏窄线宽光纤激光器研究成果

Tab. 6 Results of high-power non-polarization-maintaining narrow linewidth fiber lasers with special wavelength

年份	机构	中心波长 /nm	功率 /kW	线宽	$M^2$	文献
2017	新加坡国防科技研究院	1 018	0.712	0.3 nm	—	[137]
2017	清华大学	1 018	0.805	0.39 nm	1.8	[138]
2018	清华大学	1 018	1.150	0.3 nm	1.96	[136]
2019	清华大学	1 018	0.3	<0.2 nm	1.19	[139]
2020	美国 IPG 公司	1 018	1.33	—	<1.1	[140]
2020	美国 IPG 公司	1 030	1.4	—	1.07	[140]
2020	中国工程物理研究院	1 030	3.004	0.18 nm	<1.18	[141]
2016	美国 IPG 公司	1 032	1.8	<15 GHz	$\leq 1.1$	[142]
2016	美国空军实验室	1 034	1	0.011 nm	<1.2	[143]
2016	美国 IPG 公司	1 044	1.6	<15 GHz	$\leq 1.1$	[142]
2020	清华大学	1 060~1 090	1 kW	0.1 nm	1.82~2.46	[144]
2021	国防科技大学	1 120	2.03	0.53 nm	—	[145]

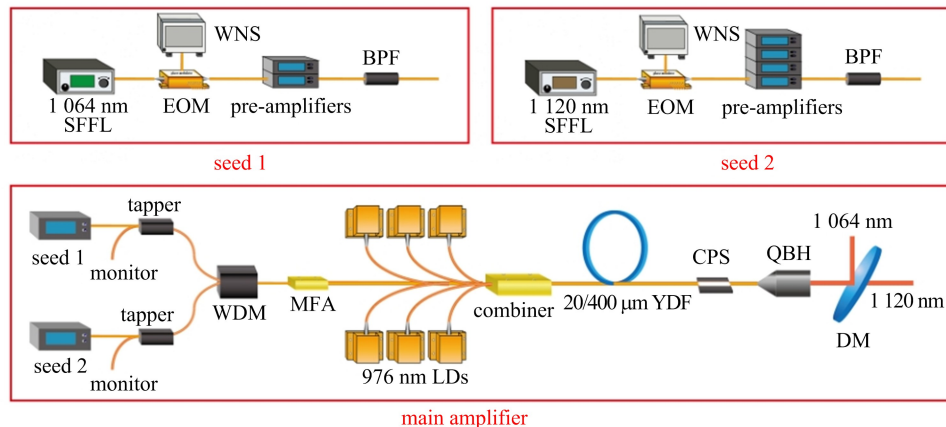


图 10 课题组 1 120 nm 窄线宽光纤放大器结构示意图

Fig. 10 Schematic of 1 120 nm narrow-width fiber amplifie

表 7 高功率特殊波长保偏窄线宽光纤激光器研究成果

Tab. 7 Results of high-power polarization-maintained narrow linewidth fiber lasers with special wavelength

年份	机构	中心波长 /nm	功率 /kW	线宽	$M^2$	PER/dB	文献
2019	天津大学	1 018	0.104	0.073 nm	<1.64	17.9	[146]
2019	耶拿大学	1 018	0.616	0.12 nm	<1.09	—	[147]
2018	天津大学	1 030	0.925	60 GHz	<1.3	15.2	[148]
2018	中国工程物理研究院	1 030	>1	0.14 nm	<1.12	12	[149]

2019年,耶拿大学设计了一个具有两级放大结构的1 018 nm高功率MOPA系统(基于空间结构实现),第一级放大器对相位调制种子源进行功率预放大,并加入滤波器件实现对ASE的抑制,主放大器采用自研的纤芯/包层直径为32/260  $\mu\text{m}$ 的低数值孔径环形掺杂光纤,最终实现了功率为616 W、线宽为0.12 nm的近单模1 018 nm线偏振激光输出,ASE抑制比高达55 dB<sup>[147]</sup>。2018年,天津大学采用全光纤MOPA结构实现了中心波长为1 030.1 nm、偏振消光比为15.2 dB、线宽约60 GHz的925 W线偏振激光输出,光束质量因子 $M^2 < 1.3$ 。该系统由窄线宽线偏振光纤振荡器和两级保偏光纤放大器组成,为了有效抑制高阶模,研究人员对主放大器中的增益光纤进行弯曲绕制,在实验中没有观察到SBS效应和TMI效应<sup>[148]</sup>。同年,中国工程物理研究院通过功率平衡方程的理论模型分析,对基于MOPA结构搭建的光纤激光器系统参数进行优化,在前向泵浦和后向泵浦方式下,均实现了>1 kW的激光输出。该结果是首次实现中心波长为1 030 nm的千瓦级窄线宽线偏振近衍射极限光纤激光<sup>[149]</sup>。

## 5 分析与展望

本文第2节简要分析了窄线宽光纤激光功率提升同时保持良好光束质量的主要受限因素及抑制方法。综合考虑功能光纤/功能器件的功率化以及高功率激光光纤的功能化这两个发展趋势<sup>[150]</sup>,我们认为,研制使用具备特殊功能的激光光纤以及配套的无源器件,是进一步提升窄线宽光纤激光功率的最为有效的措施。近两年,课题组已经尝试采用掺磷光纤、双锥光纤和部分掺杂光纤等特殊光纤<sup>[88,151-152]</sup>,并且初步取得了良好的效果。

除了提升功率外,实现对高功率窄线宽光纤

激光的时空频特性灵巧调控,以满足更多应用需求,也是重要技术发展方向。例如,频率特性方面,课题组在中心波长可调谐的高功率窄线宽光纤激光做过有益探索,设计了基于MOPA结构的高功率光谱可调谐线偏振窄线宽光纤放大器,使用白噪声相位调制对波长可调的单频种子激光器进行线宽展宽,最终在1 065~1 090 nm的波长可调谐范围内,均实现了功率>1 kW的激光输出,并且在不同波长的功率放大过程中,信号激光的线宽、偏振消光比和光束质量均保持良好<sup>[153]</sup>,能否实现更高功率、更宽调谐范围输出,是下一步的研究方向。空域特性方面,课题组采用模式选择光纤光栅,实现了高纯度高阶模(LP<sub>11</sub>模)的高功率窄线宽激光输出<sup>[154]</sup>,能否实现更高阶模式以及各种模式之间的自由切换,是下一步的研究方向。在时域特性方面,纳秒脉冲运行的光纤激光在探测、传感、制造等方面都有应用需求,测不准原理表明,纳秒脉冲运行的高功率激光是可以实现窄线宽输出的,课题组在高功率窄线宽纳秒脉冲光纤激光开展了理论与实验研究工作<sup>[155-158]</sup>,能否实现(数)kW级高功率输出并且覆盖常规和特殊波长,是下一步的研究方向。

值得注意的是,目前研制高功率窄线宽光纤激光的主要方案之一——单频激光相位调制型(参见表2)结构中,采用了相位调制器这一重要光电器件,它的电光调制特性使得激光系统具备了编程能力(脉冲运行的窄线宽光纤激光系统,通常还有强度调制器<sup>[159]</sup>,也具备编程功能),研究人员可以将电子学领域的相关研究成果灵活引入激光系统。课题组曾经使用了雷达信号处理领域常见的多相位编码算法,在同等功率条件下实现了线宽的窄化<sup>[31]</sup>。两类调制器带来的编程能力<sup>[160]</sup>,为高功率窄线宽光纤激光的发展带来了全新的研究思路和视角。

近年来,高功率窄线宽光纤激光技术得到了

高速发展,但整个过程并不是自发的、孤立的,而是伴随着光束合成型高能激光系统、频率变换型激光对抗系统以及精密测量等领域的需求以及相关支撑技术的进步而进行的。在研究高功率窄线宽光纤激光的关键技术及功能拓展的同时,我们还需更加深刻地认识此类激光的几个基本物理概念,可能有助于更好地梳理思路、研判发展。第一个概念:什么是“窄线宽”?目前学界并没有对此形成统一的标准,甚至是由于不同的应用场合对“窄线宽”的“窄”要求不同,因此目前尚不需要统一的标准。比如,常规高功率光纤激光的线宽通常是在数个 nm,对于某些光谱合成型高能激光系统,线宽 $<1$  nm 就可以界定为“窄线宽”;对于某些相干合成型高能激光系统,线宽 $<0.1$  nm 就可以界定为“窄线宽”;而对于引言部分提及的一些精密测量领域,线宽在 pm 级(以下)可能才被称作“窄线宽”。第二个概念:什么是“线宽”?对于本文叙述的主要对象,“线宽”是描述“时间相干性”或者“相干长度”的一种量化表达方式,可以从光谱的形状中计算,而这种计算选取的标准则有很多,常见如教科书中的“3 dB”定义、“10 dB”定义等(这种对于高斯型光谱、洛伦兹型光谱比较好测算,而对于平顶状光谱等则不一定合适),还有基于光谱积分的能量分布定义,如包含 50% 的能量、90% 的能量,等等;而这些线宽的定义,有时并不一定可以和具体的应用需求(比如光谱合成效率)形成直观的对应关系<sup>[161]</sup>。第三个概念:“线宽”是如何产生和演化的?研发高功率窄线宽光纤激光,一般需要先“产生”后“放大”,“产生”的过程就有复杂的激光动力学特性,比如,用于约束线宽的窄线宽器件构成的谐振腔,会产生超宽线宽激光输出的新奇现象<sup>[162]</sup>;而“放大”的过程,更是会引入多物理场耦合效应(比如高阶模式、温度场、应力场等等),使得描述“线宽”的演化过程较为困难。加深上述 3 个基本概念的分析 and 理解,将有助于高功率窄线宽光纤激光的研制和应用。

## 6 结束语

十多年来,在应用需求的牵引和纵向科研项目的支持下,课题组持续开展高功率窄线宽光纤激光研究,朝向“同等线宽尽可能提高功率”和“同等功率尽可能压窄线宽”的目标,在基础理

论、光纤材料、关键技术、系统集成和合成应用等方面均获得重要突破,实现了迄今为止公开报道的最高功率窄线宽近单模光纤激光,对多束窄线宽光纤激光相干合成超越了单束激光目前的最高输出功率。接下来,课题组将进一步提高单束窄线宽光纤激光的输出功率,并从时空频等多个角度进一步提升高功率窄线宽光纤激光的性能,充分重视学科交叉<sup>[163]</sup>,加速在光束合成、非线性频率变换等领域的应用。

## 参 考 文 献

- [1] PO H, SNITZER E, TUMMINELLI R, et al. Double clad high brightness Nd fiber laser pumped by GaAlAs phased array [C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. [S.l. : s. n.], 1989.
- [2] 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. (in Chinese)
- [3] O'CONNOR M, GAPONTSEV V, FOMIN V, et al. Power scaling of SM fiber lasers toward 10 kW [C]//Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics. [S. l. : s. n.], 2009.
- [4] 周朴, 冷进勇, 肖虎, 等. 高平均功率光纤激光的研究进展与发展趋势 [J]. 中国激光, 2021, 48(20): 1-26.  
ZHOU Pu, LENG Jinyong, XIAO Hu, et al. High average power fiber lasers: research progress and future prospect [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 1-26. (in Chinese)
- [5] 姜曼, 马鹏飞, 粟荣涛, 等. 激光光谱合成技术研究进展与展望 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(12): 164-181.  
JIANG Man, MA Pengfei, SU Rongtao, et al. Research progress and prospect of spectral beam combining [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(12): 164-181. (in Chinese)
- [6] 周朴, 粟荣涛, 马阎星, 等. 激光相干合成的研究进展: 2011—2020 [J]. 中国激光, 2021, 48(4): 26-53.  
ZHOU Pu, SU Rongtao, MA Yanxing, et al. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 26-53. (in Chinese)
- [7] HONEA E, AFZAL R, SAVAGE-LEUCHS M, et al. Advances in fiber laser spectral beam combining

- for power scaling [M]. [S.l. :s. n. ],2016.
- [8] 吴坚, 马阎星, 马鹏飞, 等. 光纤激光相干合成 20 kW 级高功率输出 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(9): 381.
- [9] MÜLLER M, ALESHIRE C, KLENKE A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. Optics Letters,2020, 45(11): 3083-3086.
- [10] 来文昌, 马鹏飞, 肖虎, 等. 高功率窄线宽光纤激光技术[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 1-22.  
LAI Wenchang, MA Pengfei, XIAO Hu, et al. High-power narrow-linewidth fiber laser technology [J]. High Power Laser and Particle Beams,2020, 32(12): 1-22. (in Chinese)
- [11] 马天, 李富全, 林宏奂. 基于光纤激光倍频的高功率绿光光源研究进展 [J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(7): 40-47.  
MA Tian, LI Fuquan, LIN Honghuan. Recent progress of high power green laser based on frequency doubling technology for fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams,2023, 35(7): 40-47. (in Chinese)
- [12] GAPONTSEV V, AVDOKHIN A, KADWANI P, et al. SM green fiber laser operating in CW and QCW regimes and producing over 550 W of average output power[M]. [S.l. :s. n. ],2014.
- [13] AHMADI P, CREEDEN D, ASCHAFFENBURG D, et al. Generating kW laser light at 532 nm via second harmonic generation of a high power Yb-doped fiber amplifier[C]// Proceedings of the 19th Conference on Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices. [S.l. :s. n. ], 2020: 1126414.
- [14] 李灿, 周朴, 马鹏飞, 等. 单频光纤激光技术的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 43-56.  
LI Can, ZHOU Pu, MA Pengfei, et al. Research progress of single-frequency fiber laser technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 43-56. (in Chinese)
- [15] ZHOU P, MA P F, LIU W, et al. High power, narrow linewidth all-fiber amplifiers[C]//Proceedings of the 19th SPIE Conference on Fiber Lasers: Technology and Systems. [S.l. :s. n. ], 2022: 119810P.
- [16] MA P F, YAO T, CHEN Y, et al. New progress of high-power narrow-linewidth fiber lasers [M]. [S.l. :s. n. ],2022.
- [17] JAUREGUI C, LIMPET J, TÜNNERMANN A. High-power fibre lasers[J]. Nature Photonics,2013, 7(11): 861-867.
- [18] LI M J, CHEN X, WANG J, et al. Fiber designs for high power lasers[C]//Proceedings of 2007 Conference on Optical Components and Materials IV. [S.l. :s. n. ], 2007: 64690H.
- [19] GRAY S, WALTON D, WANG J, et al. Suppression of stimulated Brillouin scattering in high power, narrow linewidth fiber amplifiers [C]//Proceedings of Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications. [S.l. :s. n. ], 2007.
- [20] RUFFIN A B, LI M J, CHEN X, et al. Brillouin gain analysis for fibers with different refractive indices[J]. Optics Letters,2005, 30(23): 3123-3125.
- [21] DIXNEUF C, GUIRAUD G, BARDIN Y V, et al. Ultra-low intensity noise, all fiber 365 W linearly polarized single frequency laser at 1064 nm[J]. Optics Express,2020, 28(8): 10960-10969.
- [22] JEONG Y, NILSSON J, SAHU J, et al. Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier source with 264 W of output power[J]. Optics Letters, 2005, 30(5): 459-461.
- [23] WANG X L, ZHOU P, XIAO H, et al. 310 W single-frequency all-fiber laser in master oscillator power amplification configuration [J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(8): 591-595.
- [24] MA P F, ZHOU P, MA Y X, et al. Single-frequency 332 W, linearly polarized Yb-doped all-fiber amplifier with near diffraction-limited beam quality[J]. Applied Optics,2013, 52(20): 4854-4857.
- [25] GRAY S, LIU A, WALTON D T, et al. 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier[J]. Optics Express,2007, 15(25): 17044-17050.
- [26] ROBIN C, DAJANI I, PULFORD B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811 W output power[J]. Optics Letters,2014, 39(3): 666-669.
- [27] KOBAYAKOV A, KUMAR S, CHOWDHURY D Q, et al. Design concept for optical fibers with enhanced SBS threshold [J]. Optics Express, 2005, 13(14): 5338-5346.
- [28] ROBIN C, DAJANI I, PULFORD B, et al. Single-frequency Yb-doped photonic crystal fiber amplifier with 800 W output power[C]//Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers XI: Technology, Systems, and Applications. [S.l. :s. n. ], 2014: 8-14.
- [29] LI W, YAN Z P, REN S, et al. Confined-doped active fiber enabled all-fiber high-power single-frequency laser[J]. Optics Letters,2022, 47(19): 5024-5027.
- [30] LI W, MA P F, CHEN Y, et al. 694 W sub-GHz polarization-maintained tapered fiber amplifier based on spectral and pump wavelength optimization[J]. Optics

- Express, 2022, 30(15): 26875-26885.
- [31] LAI W C, MA P F, SONG J, et al. Kilowatt-level, narrow linewidth, polarization-maintained all-fiber amplifiers based on multi-phase coded signal modulation and laser gain competition [J]. Results in Physics, 2021, 31: 105050.
- [32] WHITE J O, HARFOUCHE M, EDGE CUMBE J, et al. 1.6 kW Yb fiber amplifier using chirped seed amplification for stimulated Brillouin scattering suppression [J]. Applied Optics, 2017, 56(3): 116-122.
- [33] LEE J, LEE K H, JEONG H, et al. 2.05 kW all-fiber high-beam-quality fiber amplifier with stimulated Brillouin scattering suppression incorporating a narrow-linewidth fiber-Bragg-grating-stabilized laser diode seed source [J]. Applied Optics, 2019, 58(23): 6251-6256.
- [34] JIANG M, MA P F, HUANG L J, et al. kW-level, narrow-linewidth linearly polarized fiber laser with excellent beam quality through compact one-stage amplification scheme [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2017, 5: e30.
- [35] HUANG Y, YAN P, WANG Z, et al. 2.19 kW narrow linewidth FBG-based MOPA configuration fiber laser [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3136-3145.
- [36] HUANG Z H, LIANG X B, LI C Y, et al. Spectral broadening in high-power Yb-doped fiber lasers employing narrow-linewidth multilongitudinal-mode oscillators [J]. Applied Optics, 2016, 55(2): 297-302.
- [37] XU J M, LIU W, LENG J Y, et al. Power scaling of narrowband high-power all-fiber superfluorescent fiber source to 1.87 kW [J]. Optics Letters, 2015, 40(13): 2973-2976.
- [38] QI Y F, YANG Y F, SHEN H, et al. 2.7 kW CW narrow linewidth Yb-doped all-fiber amplifiers for beam combining application [C] // Proceedings of Advanced Solid State Lasers. [S.l. : s. n.], 2017.
- [39] XU J M, YE J, XIAO H, et al. In-band pumping avenue based high power superfluorescent fiber source with record power and near-diffraction-limited beam quality [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6: e46.
- [40] PRAKASH R, VIKRAM B, SUPRADEEPA V. Enhancing the efficacy of noise modulation for SBS suppression in high power, narrow linewidth fiber lasers by the incorporation of sinusoidal modulation [J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(5): 1-6.
- [41] GOODNO G D, ROTHENBERG J E. Suppression of stimulated Brillouin scattering in high power fibers using nonlinear phase demodulation [J]. Optics Express, 2019, 27(9): 13129-13141.
- [42] SHEN H, LOU Q, QUAN Z, et al. Narrow-linewidth all-fiber amplifier with up to 3.01 kW output power based on commercial 20/400  $\mu\text{m}$  active fiber and counterpumped configuration [J]. Applied Optics, 2019, 58(12): 3053-3058.
- [43] 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, 2017, 24(3): 1-10.
- [44] LIU A P, CHEN X, LI M J, et al. Comprehensive modeling of single frequency fiber amplifiers for mitigating stimulated Brillouin scattering [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(13): 2189-2198.
- [45] TAO R M, MA P F, WANG X L, et al. Theoretical study of pump power distribution on modal instabilities in high power fiber amplifiers [J]. Laser Physics Letters, 2016, 14(2): 025002.
- [46] THEEG T, SAYINC H, NEUMANN J, et al. All-fiber counter-propagation pumped single frequency amplifier stage with 300 W output power [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(20): 1864-1867.
- [47] ZERINGUE C, VERGIEN C, DAJANI I. Pump-limited, 203 W, single-frequency monolithic fiber amplifier based on laser gain competition [J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 618-620.
- [48] MENG D R, MA P F, WANG X L, et al. Kilowatt-level, high brightness, narrow-linewidth polarization-maintained fiber amplifiers based on laser gain competition [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 58(1): 012007.
- [49] ZHANG L, CUI S, 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.
- [50] 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): 1-4.
- [51] HILDEBRANDT M, BÜSCHE S, WEBELS P, et al. Brillouin scattering spectra in high-power single-frequency ytterbium doped fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2008, 16(20): 15970-15979.
- [52] NIKLES M, THEVENAZ L, ROBERT P A. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(10): 1842-1851.
- [53] LIU W, MA P F, LV H, et al. General analysis of

- SRS-limited high-power fiber lasers and design strategy[J]. *Optics Express*,2016, 24(23): 26715-26721.
- [54] LIU W, MA P F, LV H, 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.
- [55] MA P F, MIAO Y, LIU W, et al. Kilowatt-level ytterbium-Raman fiber amplifier with a narrow-linewidth and near-diffraction-limited beam quality [J]. *Optics Letters*,2020, 45(7): 1974-1977.
- [56] WANG G J, SONG J X, CHEN Y S, et al. Six kilowatt record all-fiberized and narrow-linewidth fiber amplifier with near-diffraction-limited beam quality [J]. *High Power Laser Science and Engineering*,2022, 10: e22.
- [57] ENGIN D, LU W, AKBULUT M, et al. 1 kW CW Yb-fiber-amplifier with < 0.5 GHz linewidth and near-diffraction limited beam-quality for coherent combining application [C]//*Proceedings of SPIE*. [S. l. : s. n. ], 2011: 63-69.
- [58] MA P F, TAO R M, SU R T, et al. 1.89 kW all-fiberized and polarization-maintained amplifiers with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality[J]. *Optics Express*,2016, 24(4): 4187-4195.
- [59] FLORES A, ROBIN C, LANARI A, et al. Pseudo-random binary sequence phase modulation for narrow linewidth, kilowatt, monolithic fiber amplifiers [J]. *Optics Express*,2014, 22(15): 17735-17744.
- [60] LIU M, YANG Y, SHEN H, et al. 1.27 kW, 2.2 GHz pseudo-random binary sequence phase modulated fiber amplifier with Brillouin gain-spectrum overlap [J]. *Scientific Reports*,2020, 10(1): 629.
- [61] CHARLES X Y, SHATROVOY O, FAN T, et al. Diode-pumped narrow linewidth multi-kilowatt metalized Yb fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2016, 41 (22): 5202-5205.
- [62] LIN H H, TAO R M, 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.
- [63] HUANG Z M, SHU Q, TAO R M, et al. > 5kW record high power narrow linewidth laser from traditional step-index monolithic fiber amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,2021, 33(21): 1181-1184.
- [64] MA P F, XIAO H, LIU W, et al. All-fiberized and narrow-linewidth 5 kW power-level fiber amplifier based on a bidirectional pumping configuration [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9 (3): e45.
- [65] SU R T, TAO R M, WANG X L, et al. 2.43 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber amplifier based on mode instability suppression[J]. *Laser Physics Letters*,2017, 14(8): 085102.
- [66] WANG Y, FENG Y, MA Y, et al. 2.5 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber MOPA with cascaded phase-modulation to suppress SBS induced self-pulsing [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12 (3): 1-15.
- [67] WANG Y, SUN Y, PENG W, et al. 3.25 kW all-fiberized and polarization-maintained Yb-doped amplifier with a 20 GHz linewidth and near-diffraction-limited beam quality [J]. *Applied Optics*, 2021, 60 (21): 6331-6336.
- [68] SHCHERBAKOV E, FOMIN V, ABRAMOV A, et al. Industrial grade 100 kW power CW fiber laser [C]//*Proceedings of Advanced Solid State Lasers*. [S. l. : s. n. ], 2013.
- [69] 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 Conference on Fiber Lasers XV: Technology and Systems*. [S. l. : s. n. ],2018: 45-50.
- [70] MA X Q, HU I N, GALVANAUSKAS A. Propagation-length independent SRS threshold in chirally-coupled-core fibers [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (23): 22575-22581.
- [71] 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 Conference on Fiber Lasers XV: Technology and Systems*. [S. l. : s. n. ],2018: 236-243.
- [72] ZENTENO L, WANG J, WALTON D, et al. Suppression of Raman gain in single-transverse-mode dual-hole-assisted fiber[J]. *Optics Express*,2005, 13(22): 8921-8926.
- [73] SAHU J K, DUPRIEZ P, KIM J, et al. Suppression of stimulated Raman scattering in a high-peak-power pulsed 1060 nm fiber MOPA source with purely single-mode output using W-type fiber [C]//*Proceedings of Optical Fiber Communication Conference*. [S. l. : s. n. ],2006.
- [74] FINI J, MERMELSTEIN M, YAN M, et al. Distributed suppression of stimulated Raman scattering in an Yb-doped filter-fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(17): 2550-2552.
- [75] WANG Y. Stimulated Raman scattering in high-power double-clad fiber lasers and power amplifiers[J]. *Opti-*



- cal Engineering, 2005, 44(11): 114202.
- [76] 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]//Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers XIV: Technology and Systems. [S. l. : s. n. ], 2017: 175-180.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] WIRTH C, SCHREIBER T, REKAS M, et al. High-power linear-polarized narrow linewidth photonic crystal fiber amplifier [C]//Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications. [S. l. : s. n. ], 2010: 403-408.
- [80] STIHLER C, JAUREGUI C, OTTO H J, et al. Controlling mode instabilities at 628 W average output power in an Yb-doped rod-type fiber amplifier by active modulation of the pump power [C]//Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers XIV: Technology and Systems. [S. l. : s. n. ], 2017: 129-133.
- [81] TAO R M, WANG X L, ZHOU P, et al. Seed power dependence of mode instabilities in high-power fiber amplifiers [J]. Journal of Optics, 2017, 19 (6): 065202.
- [82] SMITH J J, SMITH A V. Influence of signal bandwidth on mode instability thresholds of fiber amplifiers [C]//Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers XII: Technology, Systems, and Applications. [S. l. : s. n. ], 2015: 98-105.
- [83] REN S, LAI W C, WANG G, et al. Experimental study on the impact of signal bandwidth on the transverse mode instability threshold of fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2022, 30(5): 7845-7853.
- [84] EZNAVEH Z S, LOPEZ-GALMICHE G, ANTONIO-LOPEZ E, et al. Bi-directional pump configuration for increasing thermal modal instabilities threshold in high power fiber amplifiers [C]//Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers XII: Technology, Systems, and Applications. [S. l. : s. n. ], 2015: 407-411.
- [85] NADERI S, DAJANI I, GROSEK J, et al. Theoretical analysis of effect of pump and signal wavelengths on modal instabilities in Yb-doped fiber amplifiers [C]//Proceedings of Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XIII. [S. l. : s. n. ], 2014: 264-270.
- [86] JAUREGUI C, OTTO H J, BREITKOPF S, et al. Optimizing high-power Yb-doped fiber amplifier systems in the presence of transverse mode instabilities [J]. Optics Express, 2016, 24(8): 7879-7892.
- [87] WU H, LI R, XIAO H, et al. High-power tandem-pumped fiber amplifier with beam quality maintenance enabled by the confined-doped fiber [J]. Optics Express, 2021, 29(20): 31337-31347.
- [88] SONG J X, REN S, WANG G J, et al. High power narrow-linewidth fiber laser based on double-tapered fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40 (16): 5668-5672.
- [89] LI W, REN S, DENG Y, et al. Investigation of the confined-doped fiber on single-mode operating and power scaling in all-fiber single-frequency amplifiers [J]. Frontiers in Physics, 2022, 10: 1016047.
- [90] GU G, KONG F, HAWKINS T, et al. Ytterbium-doped large-mode-area all-solid photonic bandgap fiber lasers [J]. Optics Express, 2014, 22 (11): 13962-13968.
- [91] KLENKE A, MÜLLER M, STARK H, et al. Coherently combined 16-channel multicore fiber laser system [J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1519-1522.
- [92] TAO R M, SU R T, MA P F, et al. Suppressing mode instabilities by optimizing the fiber coiling methods [J]. Laser Physics Letters, 2016, 14(2): 025101.
- [93] LEI M, QI Y F, LIU C, et al. Mode controlling study on narrow-linewidth and high power all-fiber amplifier [C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Laser Interaction with Matter. [S. l. : s. n. ], 2015: 372-377.
- [94] TAO R M, MA P F, WANG X, et al. 1.3 kW monolithic linearly polarized single-mode master oscillator power amplifier and strategies for mitigating mode instabilities [J]. Photonics Research, 2015, 3 (3): 86-93.
- [95] SHIMIZU T, NAKAJIMA K, SHIRAKI K, et al. Evaluation methods and requirements for the stimulated Brillouin scattering threshold in a single-mode fiber [J]. Optical Fiber Technology, 2008, 14(1): 10-15.
- [96] AOKI Y, TAJIMA K, MITO I. Input power limits of single-mode optical fibers due to stimulated Brillouin scattering in optical communication systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(5): 710-719.
- [97] STOLEN R. Polarization effects in fiber Raman and Brillouin lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Elec-

- tronics,1979, 15(10): 1157-1160.
- [98] VAN DEVENTER M O, BOOT A J. Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(4): 585-590.
- [99] GOLOVCHENKO E, MAMYSHEV P V, PILIPETSKII A N, et al. Mutual influence of the parametric effects and stimulated Raman scattering in optical fibers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1990, 26(10): 1815-1820.
- [100] HAARLAMMERT N, REKAS M, DE VRIES O, et al. Polarization dependent nonlinear limitations in continuous-wave high power fiber amplifiers [C]// *Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers X: Technology, Systems, and Applications*. [S. l. : s. n. ], 2013: 399-405.
- [101] LAI W C, MA P F, LIU W, et al. 550 W single frequency fiber amplifiers emitting at 1030 nm based on a tapered Yb-doped fiber[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20908-20919.
- [102] JAUREGUI C, STIHLER C, KHOLAIF S, et al. Mitigation of transverse mode instability in polarization maintaining, high-power fiber amplifiers[C]// *Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers XVIII: Technology and Systems*. [S. l. : s. n. ], 2021: 147-152.
- [103] JAUREGUI C, KHOLAIF S, TU Y, et al. Static modal energy transfer in high power, polarization maintaining fiber laser systems[C]// *Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers XIX: Technology and Systems*. [S. l. : s. n. ], 2022: 237-242.
- [104] 马鹏飞. 高功率光纤激光相干偏振合成系统研究[D]. 国防科学技术大学, 2016.  
MA Pengfei. Study on coherent polarization beam combining system of high power fiber lasers[D]. National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)
- [105] 杨依枫, 沈辉, 陈晓龙, 等. 全光纤化高效率、窄线宽光纤激光器实现 2.5 kW 近衍射极限输出[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 256.  
YANG Yifeng, SHEN Hui, CHEN Xiaolong, et al. All-fiber high efficiency and narrow linewidth fiber laser realizes 2.5 kW near diffraction limit output [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 256. (in Chinese)
- [106] HUANG Y S, XIAO Q R, LI D, et al. 3 kW narrow linewidth high spectral density continuous wave fiber laser based on fiber Bragg grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 133: 106538.
- [107] DU S S, FU G H, QI T C, et al. 3.3 kW narrow linewidth FBG-based MOPA configuration fiber laser with near-diffraction-limited beam quality[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 73: 103011.
- [108] 田鑫, 饶斌裕, 王蒙, 等. 简单 MOPA 结构窄线宽激光突破 5 kW 近单模输出[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(12): 3-5.  
TIAN Xin, RAO Binyu, WANG Meng, et al. 5 kW near single mode output of narrow linewidth laser with simple MOPA structure[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(12): 3-5. (in Chinese)
- [109] 奚小明, 王蒙, 田鑫, 等. 基于单级 MOPA 结构实现 6 kW 全光纤窄谱激光输出[J]. *中国激光*, 2022, 49(11): 216-219.  
XI Xiaoming, WANG Meng, TIAN Xin, et al. Record high-power narrow-linewidth fiber laser based on one-stage master oscillator power amplification configuration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(11): 216-219. (in Chinese)
- [110] DAJANI I, FLORES A, HOLTEN R, et al. Multi-kilowatt power scaling and coherent beam combining of narrow-linewidth fiber lasers[C]// *Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications*. [S. l. : s. n. ], 2016: 972801.
- [111] KANSKAR M, ZHANG J, KOPONEN J, et al. Narrowband transverse-modal-instability (TMI)-free Yb-doped fiber amplifiers for directed energy applications[C]// *Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers XV: Technology and Systems*. [S. l. : s. n. ], 2018: 65-73.
- [112] LIM W, SEAH K, YE Y, et al. Wavelength flexible, kW-level narrow linewidth fibre laser based on 7 GHz PRBS phase modulation[C]// *Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers XVII: Technology and Systems*. [S. l. : s. n. ], 2020: 14-19.
- [113] MA P F, XIAO H, MENG D R, et al. High power all-fiberized and narrow-bandwidth MOPA system by tandem pumping strategy for thermally induced mode instability suppression[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018(4): 53-59.
- [114] LI T L, ZHA C W, SUN Y H, et al. 3.5 kW bidirectionally pumped narrow-linewidth fiber amplifier seeded by white-noise-source phase-modulated laser [J]. *Laser Physics*, 2018, 28(10): 105101.
- [115] MA P F, YAO T P, CHEN Y S, et al. New progress of high-power narrow-linewidth fiber lasers [C]// *Proceedings of Advanced Lasers, High-Power Lasers, and Applications XIII*. [S. l. : s. n. ], 2022:

- 31-41.
- [116] 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.
- [117] BEIER F, MÖLLER F, SATTLER B, et al. Experimental investigations on the TMI thresholds of low-NA Yb-doped single mode fibers[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1291-1294.
- [118] PLATONOV N, YAGODKIN R, JOEL D L C, et al. Up to 2.5 kW on non-PM fiber and 2.0 kW linear polarized on PM fiber narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifiers in all-fiber format [C]//*Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers XV: Technology and Systems*. [S. l. : s. n.], 2018: 57-64.
- [119] MA P F, TAO R M, WANG X L, et al. High-power narrow-band and polarization-maintained all fiber superfluorescent source[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(8): 879-882.
- [120] XU J M, HUANG L, JIANG M, et al. Near-diffraction-limited linearly polarized narrow-linewidth random fiber laser with record kilowatt output[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(4): 350-354.
- [121] WANG Y, KE W, PENG W, et al. 3 kW, 0.2 nm narrow linewidth linearly polarized all-fiber laser based on a compact MOPA structure[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17(7): 075101.
- [122] JUN C, JUNG M, SHIN W, et al. 818 W Yb-doped amplifier with < 7 GHz linewidth based on pseudo-random phase modulation in polarization-maintained all-fiber configuration [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 16(1): 015102.
- [123] REN S, MA P F, LI W, et al. 3.96 kW all-fiberized linearly polarized and narrow linewidth fiber laser with near-diffraction-limited beam quality[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(15): 2541.
- [124] 任帅, 陈益沙, 马鹏飞, 等. 4.5 kW, 0.33 nm 近单模窄线宽保偏光纤激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(6): 133.  
REN Shuai, CHEN Yisha, MA Pengfei, et al. 4.5 kW, 0.33 nm near single mode narrow linewidth polarization maintaining fiber laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(6): 133. (in Chinese)
- [125] 任帅, 马鹏飞, 陈益沙, 等. 国产保偏光纤实现 5 kW 级窄线宽激光输出[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(2): 435-436.  
REN Shuai, MA Pengfei, CHEN Yisha, et al. 5 kW level narrow linewidth fiber laser output realized by homemade polarization-maintained fiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(2): 435-436. (in Chinese)
- [126] 王岩山, 马毅, 彭万敬, 等. 基于近平顶光谱实现 3.6 kW 窄线宽线偏振近单模光纤激光输出[J]. *中国激光*, 2021, 48(23): 195-196.
- [127] 王岩山, 彭万敬, 王珏, 等. 4.45 kW 窄线宽线偏振近单模全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2022, 49(18): 185-186.
- [128] 王岩山, 冯昱骏, 彭万敬, 等. 近衍射极限高消光比窄线宽保偏光纤激光输出功率突破 5 kW[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(11): 44.
- [129] LAI W C, MA P F, LIU W, et al. Seeding high brightness fiber amplifiers with multi-phase coded signal modulation for SBS effect management [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 127682-127689.
- [130] LIAO S, LUO T, XIAO R, et al. 3.2 kW, 0.22 nm narrow-linewidth MOPA configuration fiber laser with a homemade polarization-maintaining Yb-doped fiber[J]. *Frontiers in Physics*, 2023, 11: 141.
- [131] GOODNO G D, MCNAUGHT S J, ROTHENBERG J E, et al. Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1542-1544.
- [132] WANG Y S, FENG Y J, WANG X J, et al. 6.5 GHz linearly polarized kilowatt fiber amplifier based on active polarization control [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2760-2765.
- [133] SU R, LIU Y, YANG B, et al. Active polarization control of a 1.43 kW narrow linewidth fiber amplifier based on SPGD algorithm [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(4): 045802.
- [134] REN S, CHANG H, MA P F, et al. 3.38 kW all-fiberized narrow linewidth fiber laser based on active polarization control using RMS-Prop algorithm [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 166: 109634.
- [135] 陈楠渝, 陈晓龙, 刘万生, 等. 高效率高稳定性 1018 nm 单纤振荡器[J]. *中国激光*, 2022, 49(17): 9-15.  
CHEN Nanyu, CHEN Xiaolong, LIU Wansheng, et al. High efficiency and stability 1018 nm single fiber oscillator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(17): 9-15. (in Chinese)
- [136] YAN P, WANG X, WANG Z, et al. A 1150 W 1018 nm fiber laser bidirectional pumped by wavelength-stabilized laser diodes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1-6.
- [137] LIM W Y W, SEAH C, CHUA S L. Thermally in-

- sensitive 700 W Yb-doped fiber oscillator at 1018 nm [C]//Proceedings of the European Conference on Lasers and Electro-Optics. [S. l. : s. n. ], 2017.
- [138] YAN P, WANG X J, LI D, et al. High-power 1018 nm ytterbium-doped fiber laser with output of 805 W[J]. Optics Letters, 2017, 42(7): 1193-1196.
- [139] TIAN J, XIAO Q, LI D, et al. Hybrid-structure 1018 nm monolithic single-mode fiber laser producing high power and high efficiency[J]. OSA Continuum, 2019, 2(4): 1138-1147.
- [140] PLATONOV N, SHKURIKHIN O, FOMIN V, et al. High-efficient kW-level single-mode ytterbium fiber lasers in all-fiber format with diffraction-limited beam at wavelengths in 1000-1030 nm spectral range [C]//Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers XVII: Technology and Systems. [S. l. : s. n. ], 2020: 1126003.
- [141] CHU Q H, SHU Q, LIU Y, et al. 3 kW high OSNR 1030 nm single-mode monolithic fiber amplifier with a 180 pm linewidth[J]. Optics Letters, 2020, 45(23): 6502-6505.
- [142] YAGODKIN R, PLATONOV N, YUSIM A, et al. > 1.5 kW narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifier with 40 nm bandwidth[C]//Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications. [S. l. : s. n. ], 2016: 41-46.
- [143] NADERI N A, DAJANI I, FLORES A. High-efficiency, kilowatt 1034 nm all-fiber amplifier operating at 11 pm linewidth[J]. Optics Letters, 2016, 41(5): 1018-1021.
- [144] TIAN J D, XIAO Q R, LI D, et al. Tandem-pumped high-power narrow-linewidth fiber laser tunable from 1060-1090 nm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(6): 1461-1467.
- [145] SONG J X, MA P F, REN S, et al. 12 kW narrow-linewidth Yb-Raman fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2021, 46(10): 2404-2407.
- [146] XIE Z X, FANG Q, XU Y, et al. Hundred-watts-level monolithic narrow linewidth linearly-polarized fiber laser at 1018 nm [J]. Optical Engineering, 2019, 58(10): 106106.
- [147] PALMA-VEGA G, WALBAUM T, HEINZIG M, et al. Ring-up-doped fiber for the generation of more than 600 W single-mode narrow-band output at 1018 nm[J]. Optics Letters, 2019, 44(10): 2502-2505.
- [148] XU Y, FANG Q, CUI X L, et al. 1 kW monolithic narrow linewidth linear-polarized fiber laser at 1030 nm[C]//Proceedings of SPIE Conference on Fiber Lasers XV: Technology and Systems. [S. l. : s. n. ], 2018: 475-482.
- [149] CHU Q H, ZHAO P F, LIN H H, et al. kW-level 1030 nm polarization-maintained fiber laser with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality[J]. Applied Optics, 2018, 57(12): 2992-2996.
- [150] CHEN X, YAO T F, HUANG L J, et al. Functional fibers and functional fiber-based components for high-power lasers [J]. Advanced Fiber Materials, 2023, 5(1): 59-106.
- [151] ZHANG Y, YE J, MA X Y, et al. Efficient lasing through Raman-assisted four-wave mixing with intrinsic weak spectral broadening characteristics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(4): 1173-1180.
- [152] WU H, SONG J, MA P F, et al. Bidirectional tandem-pumped high-brightness 6 kW level narrow-linewidth confined-doped fiber amplifier exploiting the side-coupled technique[J]. Optics Express, 2022, 30(12): 21338-21348.
- [153] LIU Y K, SU R T, MA P F, et al. >1 kW all-fiberized narrow-linewidth polarization-maintained fiber amplifiers with wavelength spanning from 1065 to 1090 nm [J]. Applied Optics, 2017, 56(14): 4213-4218.
- [154] SONG J X, XU H Y, WU H S, et al. High power narrow linewidth LP11 mode fiber laser using mode-selective FBGs[J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(11): 115101.
- [155] SU R T, ZHANG P F, ZHOU P, et al. Theoretical and numerical study on narrow-linewidth nanosecond pulsed Raman fiber amplifier[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(15): 50-59.
- [156] ZHANG P F, YANG L, SU R T, et al. Nanosecond pulse pumped, fiber-integrated narrow linewidth linearly polarized Raman amplifier at 1120 nm[C]//Proceedings of AOPC 2017: Laser Components, Systems, and Applications. [S. l. : s. n. ], 2017: 704-708.
- [157] RAN Y, SU R T, MA P F, et al. High power narrow-linewidth linearly polarized nanosecond all-fiber amplifier with near-diffraction-limited beam quality [J]. Journal of Optics, 2015, 18(1): 015506.
- [158] RAN Y, SU R T, MA P F, et al. 293 W, GHz narrow-linewidth, polarization maintaining nanosecond fiber amplifier with SBS suppression employing simultaneous phase and intensity modulation[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25896-25905.
- [159] SU R T, HU X, PU Z, et al. Self-phase modulation

- pre-compensation of narrowlinewidth pulsed fiber lasers [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67 (16): 257-264.
- [160] JIANG M, WU H S, AN Y, et al. Fiber laser development enabled by machine learning: review and prospect[J]. Photonix, 2022, 3(1): 16.
- [161] LAI W C, MA P F, LIU W, et al. Evaluating spectral characteristics of narrow-linewidth fiber lasers in coherent beam combining system via using CDC metric[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 149: 106826.
- [162] ZHANG S, JIANG M, LI C, et al. High-power broadband supercontinuum generation through a simple narrow-bandwidth FBGs-based fiber laser cavity [J]. Chinese Optics Letters, 2022; 20(1): 85-88.
- [163] 周朴. 我国高功率光纤激光技术学科方向的历程、现状、挑战与建议[J]. 红外与激光工程, 2023, 52 (7): 20230071.
- ZHOU Pu. Review on the discipline of high power fiber laser in China[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(7): 20230071. (in Chinese)

### 作者简介



**周朴**

男, 1984年生, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 研究方向为光纤激光与光束合成

E-mail: zhoupu203@163.com



**马鹏飞**

男, 1987年生, 博士, 副研究员, 研究方向为高功率窄线宽光纤激光

E-mail: shandapengfei@126.com



**任帅**

男, 1988年生, 博士, 讲师, 研究方向为高功率窄线宽光纤激光

E-mail: hyrenshuai@126.com



**陈益沙**

男, 1993年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为光纤设计和高功率窄线宽光纤激光器

E-mail: yishachen1993@163.com



**刘伟**

男, 1991年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为高功率光纤激光技术和非线性光纤光学

E-mail: aiken09@163.com



**姚天甫**

女, 1989年生, 博士, 副研究员, 研究方向为拉曼光纤激光

E-mail: yaotianfumary@163.com



**潘志勇**

男, 1977年生, 高级工程师, 研究方向为特种光纤研制

E-mail: panzy168@163.com



**陈金宝**

男, 1970年生, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 研究方向为高能激光技术

E-mail: kdchenjinbao@aliyun.com

责任编辑 董莉