



·光纤激光器·

高功率窄线宽光纤激光器的研究进展*

楚秋慧, 郭超, 颜冬林, 舒强, 史仪, 温静, 林宏奂, 王建军

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 近年来, 光纤激光器得到了快速发展, 且逐步应用于多个领域, 功率的进一步提升仍然是光纤激光器的研究热点, 光束合成是实现功率提升的重要手段, 光束合成要求子光束为窄线宽光纤激光器, 因此窄线宽光纤激光器的研究对光束合成功率提升有重要意义。本文对窄线宽高功率光纤激光器的发展和研究现状进行了详细的介绍, 并基于目前的研究现状分析了其发展的主要限制因素, 并展望了未来的发展趋势。

关键词: 窄线宽; 光纤激光器; 受激布里渊散射; 模式不稳定

中图分类号: O439

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.200144

Recent progress of high power narrow linewidth fiber laser

Chu Qiuhui, Guo Chao, Yan Donglin, Shu Qiang, Shi Yi, Wen Jing, Lin Honghuan, Wang Jianjun

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: In recent years, fiber laser has been developing rapidly, and gradually applied in many fields. Further improvement of output power is still the research hotspot of fiber laser. Beam combining is an important method to scale output power of fiber laser. Beam combining requires that the sub beam is a narrow linewidth fiber laser, so the research of narrow linewidth fiber laser is of great significance for power improvement. In this paper, the development and research status of narrow linewidth high power fiber lasers are introduced in detail, and based on the current research status, the future development trend is prospected.

Key words: narrow linewidth; fiber laser; stimulated Brillouin scattering; mode instability

光纤激光器具有效率高、体积小、光束质量好、工作稳定可靠和环境适应性强等突出优点, 在工业加工、医疗、国防等领域具有广阔的应用前景, 是激光研究的重要方向之一^[1-5]。随着双包层大模场光纤的产生、半导体泵浦性能的提升和光纤集成技术的快速发展, 光纤激光器的输出功率得到了迅速提升^[6]。目前, 美国 IPG 光纤激光器单纤输出功率最高可达 20 kW^[7], 而国内国防科技大学、清华大学、中国工程物理研究院也相继研制出 10 kW 级的光纤激光器^[8-9]。但是单纤输出功率的进一步提升受到非线性效应、热效应和光纤损伤等方面影响, 并且其输出功率存在理论上的阈值^[10-12], 因此光纤激光单纤输出功率很难进一步实现量级上的提升。目前, 光纤激光器输出功率进一步提升的有效方案是光束合成, 主要包括相干合成^[13]和光谱合成^[14]。而光束合成对激光光束提出了要求, 一般要求合成激光光束具有窄线宽和高功率高光束质量特性^[15-17]。这种高功率窄线宽激光器在引力探测、非线性频率转换等基础科研和国防工业领域中也有着极其重要的应用前景。

1 高功率窄线宽光纤激光器的研究现状

根据激光器结构的不同, 本文从自由空间结构光纤激光器和全光纤结构光纤激光器两个方面介绍常用波段高功率窄线宽光纤激光器的研究现状, 同时介绍短波长窄线宽光纤激光器研究现状。

1.1 自由空间结构光纤激光器

自由空间结构光纤激光器对激光器器件要求低, 可兼容多种光纤结构, 提高光纤激光器的输出能力。对于窄线宽光纤激光器, 目前主要的技术路线是对单频激光器进行相位调制展宽光谱来抑制光纤中的非线性效应, 该种

* 收稿日期: 2020-05-26; 修订日期: 2020-10-19

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB1104401)

作者简介: 楚秋慧 (1992—), 女, 博士, 从事高功率窄线宽光纤激光技术研究; chuqiuhui@163.com。

子源在光纤放大级中放大,从而实现高功率激光输出。

2011年,美国 Fibertek 公司的 Doruk Engin 等报道了线宽为 450 MHz,输出功率达到 1 kW 的光纤激光器,实验装置如图 1 所示。采用双通道正弦信号调制单频种子光,将线宽展宽为 450 MHz,再经过三级放大实现 1 kW 激光输出。主放大级采用 35/500 的增益光纤以降低纤芯中的功率密度,抑制 SBS 效应,输出激光的光束质量为 $M^2 < 1.4$ ^[18]。

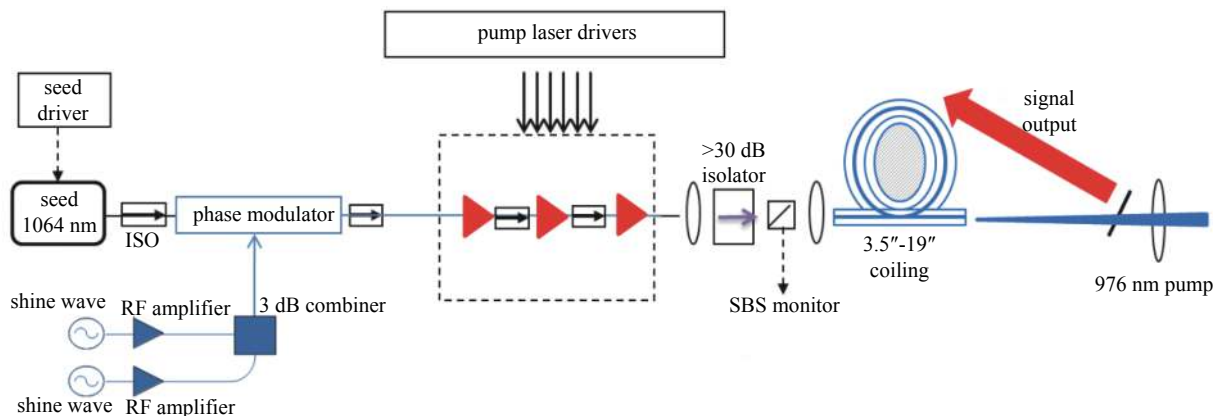


Fig. 1 Experiment setup of 450 MHz linewidth kW level fiber laser by Fibertek Inc.

图 1 美国 Fibertek 公司 450 MHz 线宽 kW 级光纤激光器实验装置图

2016年,耶拿大学在放大级中采用低数值孔径的光纤来抑制模式不稳定(MI)效应,实现了单模 3 kW 激光输出,光谱线宽为 0.17 nm。种子源采用单频激光器相位调制源,放大级采用自制的新型光纤,数值孔径为 0.04,光纤纤芯直径为 24.5 μm ,内包层直径为 450 μm ,有效模场面积为 360 μm^2 ,放大级输出效率为 90%,在放大过程中,没有发生 MI 效应。在 3 kW 输出功率下,放大自发辐射(ASE)效应抑制比为 70 dB^[19]。2017年,他们又继续采用自制的低数值孔径光纤进行窄线宽激光器实验,放大级结构如图 2 所示。当放大级采用低数值孔径的 30/460 增益光纤时,输出功率达到了 2.8 kW,光谱线宽为 0.18 nm,MI 效应抑制了输出功率的进一步提升。当放大级采用 23/460 增益光纤时,单模激光的输出功率达到了 3.5 kW,光谱线宽为 0.18 nm,功率的进一步提升主要受限于 SBS 效应,这是目前已报道的单模窄线宽光纤激光器的最高输出功率^[20]。但是由于匹配新型光纤的全光纤化器件的缺乏,该系统仍采用空间耦合结构。

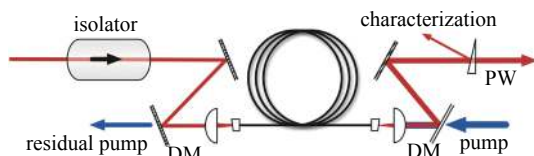


Fig. 2 Experimental setup of narrow linewidth fiber amplifier with low numerical aperture fiber by Jena University

图 2 耶拿大学基于低数值孔径光纤的窄线宽光纤放大器实验装置图

2016年,美国 MIT 林肯实验室采用金属包层的增益光纤搭建了双向泵浦放大器,放大级实验装置如图 3 所示。金属包层光纤能改变光纤中的热负载,增加高阶模式的弯曲损耗,从而抑制 MI 效应。种子光采用调制频

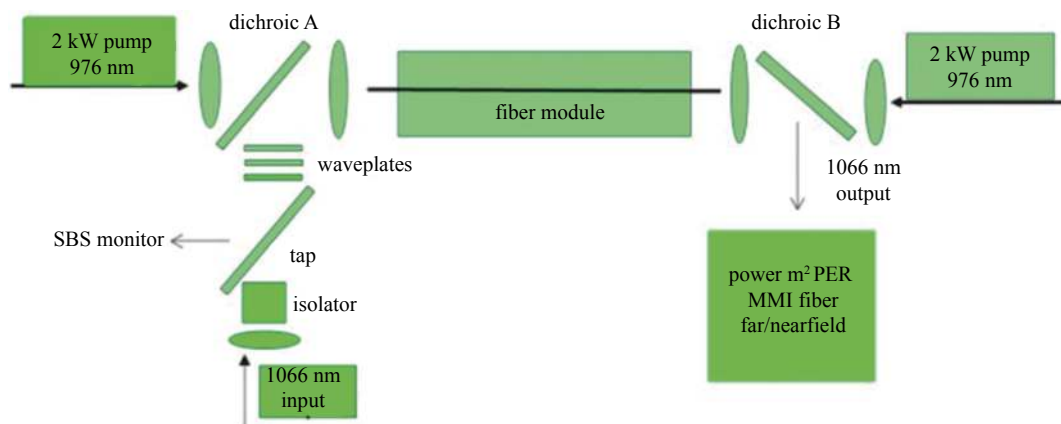


Fig. 3 Experimental setup of narrow linewidth fiber amplifier based on metal clad fiber by MIT

图 3 美国 MIT 基于金属包层光纤的窄线宽光纤放大器实验装置图

率为 12.5 GHz 的伪随机码 (PRBS) 信号调制单频激光器, 经放大级放大后激光输出功率为 3.1 kW, 光谱线宽为 12 GHz, 光光效率为 90%, 激光光束质量接近衍射极限 $M_x^2=1.12$, $M_y^2=1.13$ 。该系统也采用空间耦合方式, 集成度较低^[21]。

1.2 全光纤结构光纤激光器

相比于自由空间结构光纤激光器, 全光纤结构光纤激光器具有集成度高、稳定性好、工程化应用难度低等优点, 使得基于全光纤结构的窄线宽光纤激光器得到迅速发展。由于相干合成一般要求激光光子束光谱线宽小于 10 GHz, 而光谱合成要求激光器的光谱线宽不大于 100 GHz, 因此, 对于全光纤化的窄线宽光纤激光器, 本文从两种线宽要求来分别介绍目前的研究进展。

(1) 线宽 < 10 GHz 光纤激光器

2012 年, 国防科技大学采用白噪声信号对单频激光器进行相位调制, 使其光谱展宽约为 0.3 GHz, 该种子源输出功率为 10 mW, 之后该种子源经过四级放大器进行放大, 最终获得了功率为 666 W 的窄线宽激光输出, 光谱线宽小于 0.3 GHz^[22]。2015 年, 国防科技大学采用 976 nm 的半导体激光器泵浦基于 25/400 保偏光纤的放大系统, 对窄线宽种子源进行放大, 实验装置如图 4 所示。种子源采用正弦信号对单频激光器进行相位调制, 使光谱展宽约为 5 GHz, 经放大后将线偏激光的输出功率提升到了 560 W, 光束质量为 $M^2=1.3$, 光谱线宽保持约为 5 GHz, 偏振消光比为 ~14 dB。理论研究结果表明 5 GHz 线宽的种子源 SBS 阈值为 1.2 kW, 输出功率的进一步提升主要受限于 MI 效应^[23]。

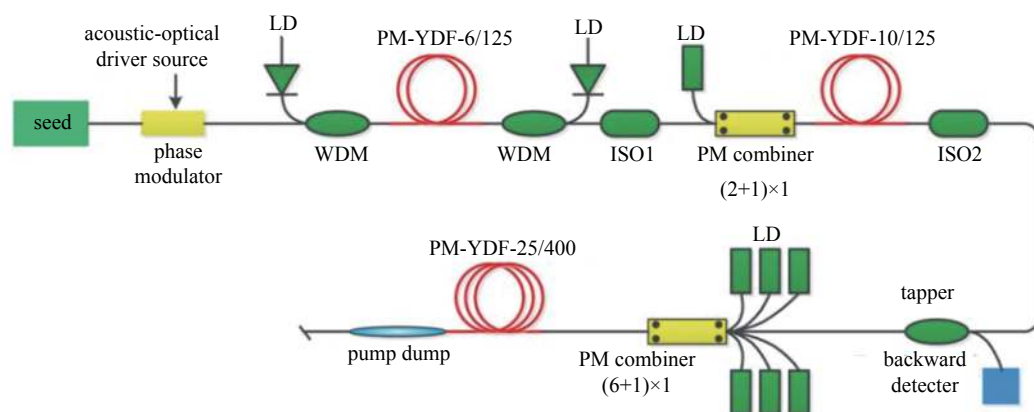


Fig. 4 Experimental setup of 560 W polarization maintaining fiber laser with 5 GHz linewidth in National University of Science and Technology

图 4 国防科技大学 560 W 输出功率 5 GHz 线宽保偏光纤激光器实验装置图

2014 年, 中国电子科技集团有限公司第 11 研究所利用正弦调制方式将单频激光器的光谱线宽展宽为 2.9 GHz, 采用三级放大结构进行放大, 实验装置如图 5 所示。采用 976 nm 的半导体激光器泵浦基于 25/400 光纤的主放大系统进行放大, 激光器最终输出功率达到了 780 W, 光谱线宽保持为 2.9 GHz, 光束质量为 $M_x^2=1.44$, $M_y^2=1.43$, 在最高输出功率下没有发生明显的非线性效应和 MI 效应, 功率的进一步提升主要受限于泵浦功率^[24]。

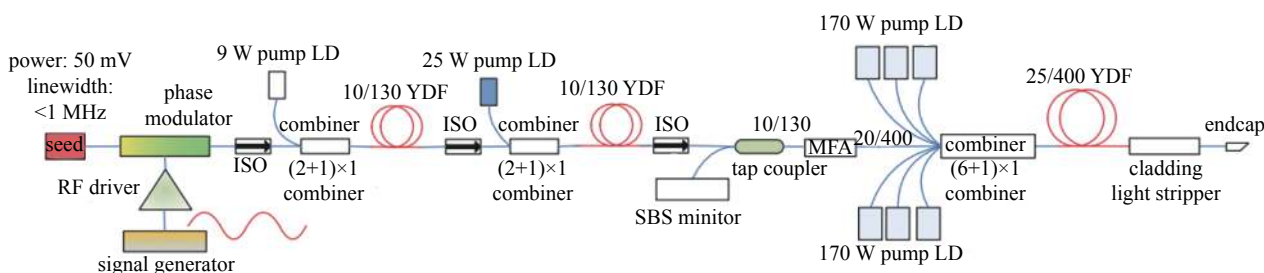


Fig. 5 Experimental setup of 780 W fiber laser with 2.9 GHz linewidth in No.11 Institute of CETC

图 5 中国电子科技集团第 11 研究所 780 W 输出功率 2.9 GHz 线宽光纤激光器实验装置图

2014 年, 美国空军实验室的 Iyad Dajani 采用 25/400 光纤作为主放光纤, 基于主振荡功率放大 (MOPA) 结构, 搭建了四级放大的窄线宽光纤激光器, 实验系统如图 6 所示。该激光器使用调制频率为 2 GHz 的 PRBS 信号作为相位调制源, 通过优化实验参数来抑制 SBS 效应, 最终获得了 1 kW 窄线宽激光输出, 光束质量为 $M^2=1.1$, 光谱线宽为 2 GHz^[25]。另外, 使用调制频率为 3 GHz 的 PRBS 信号作为相位调制源, 在光谱线宽为 3 GHz 时实现了 1.17 kW

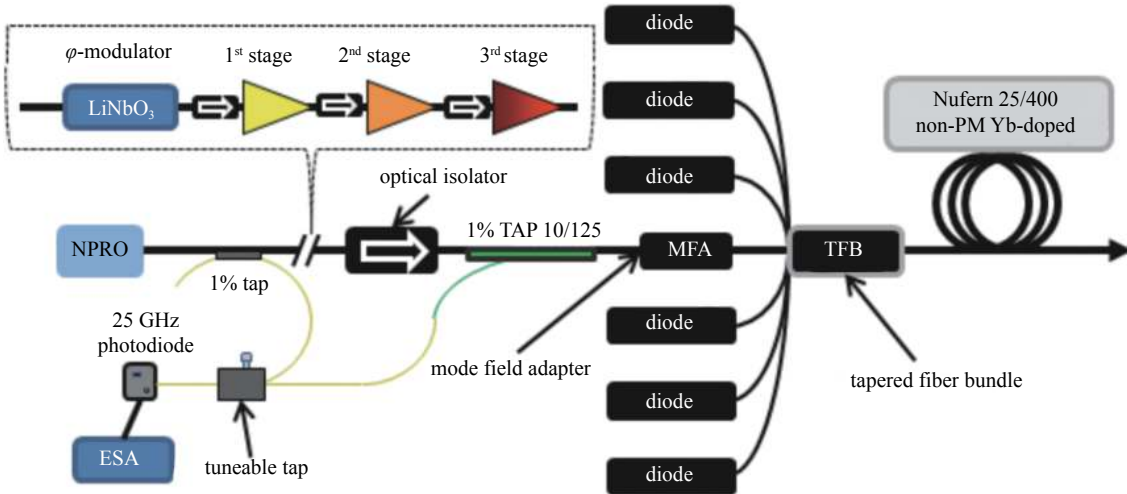


Fig. 6 Experimental setup of narrow linewidth fiber laser based on PRBS phase modulation in US Air Force Laboratory

图 6 美国空军实验室基于 PRBS 相位调制的窄线宽光纤激光器实验装置图

近衍射极限输出, 功率的进一步提升主要受限于 SBS 效应^[26]。

2016 年, 美国空军实验室的 Nader A. Naderi 等进一步采用双波长种子注入和相位调制的方式实现了 1 kW 激光输出, 线宽为 2.3 GHz, 实验装置如图 7 所示。采用宽带 1038 nm 和窄带 1064 nm 的种子源同时注入, 主放大级采用 25/400 增益光纤进行放大。种子源利用 PRBS 信号进行相位调制, 通过双波长激光器的增益竞争效应和相位调制展宽光谱来同时抑制 SBS 效应。在实验中, 通过优化两种波长种子源的功率配比和相位调制参数, 最终在 1064 nm 波段实现了 1 kW 激光输出, 输出激光光束的质量因子 M^2 介于 1.1~1.2 之间, 光谱线宽为 2.3 GHz^[27]。

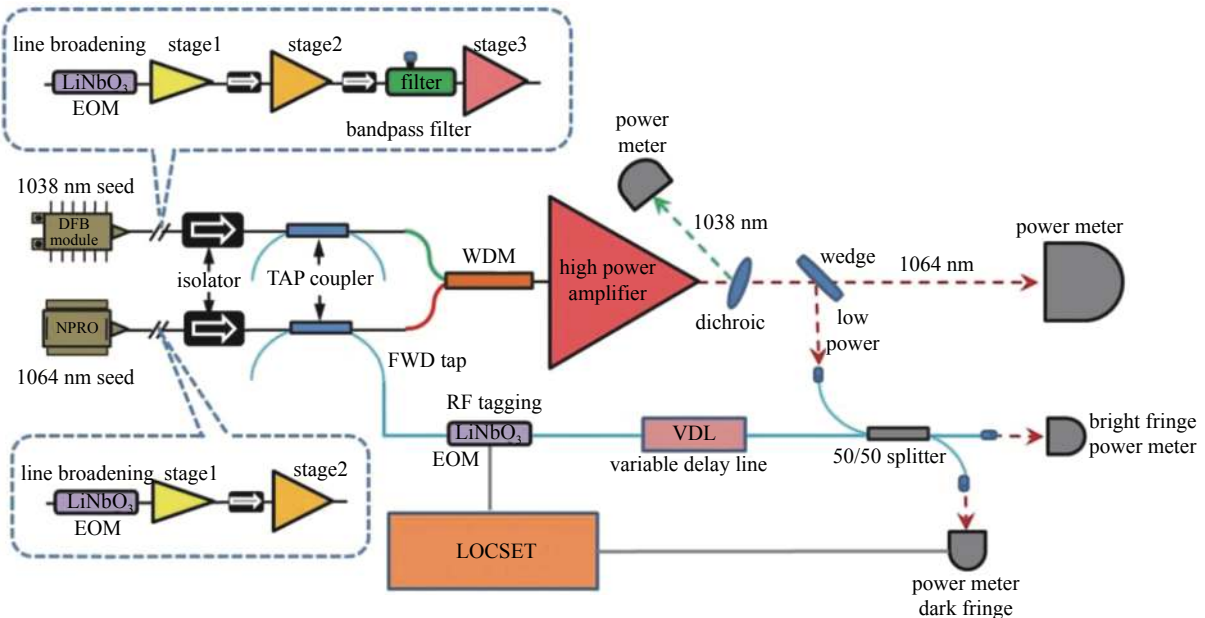


Fig. 7 Experimental setup of SBS suppression by combining dual wavelength gain competition and phase modulation in US Air Force Laboratory.

图 7 美国空军实验室双波长增益竞争与相位调制结合抑制 SBS 的实验装置图

韩国先进光学研究中心使用 20/400 保偏光纤搭建了全保偏光纤激光系统, 实验装置如图 8 所示^[28]。该系统采用调制频率为 6.6 GHz 的 PRBS 信号调制单频激光器, 经放大后输出功率达到 818 W, 输出效率为 85.2%, 激光光谱线宽 < 7 GHz, 偏振消光比为 13 dB, 功率的进一步提升主要受限于 SBS 效应。另外他们还理论预测了在 10 GHz 线宽下可实现 2.5 kW 激光输出。

2020 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所采用 PRBS 产生器产生调制频率为 6.5 GHz, 调制格式为 9 的 PRBS 相位调制信号, 之后经过 2.2 GHz 的低频滤波器进行滤波后分别调制 DBR 和 DFB 单频种子源, 使种子源光谱展宽为 2.2 GHz。DBR 和 DFB 种子源通过四级放大系统进行放大, 实验装置如图 9 所示。采用 DBR 和 DFB 种

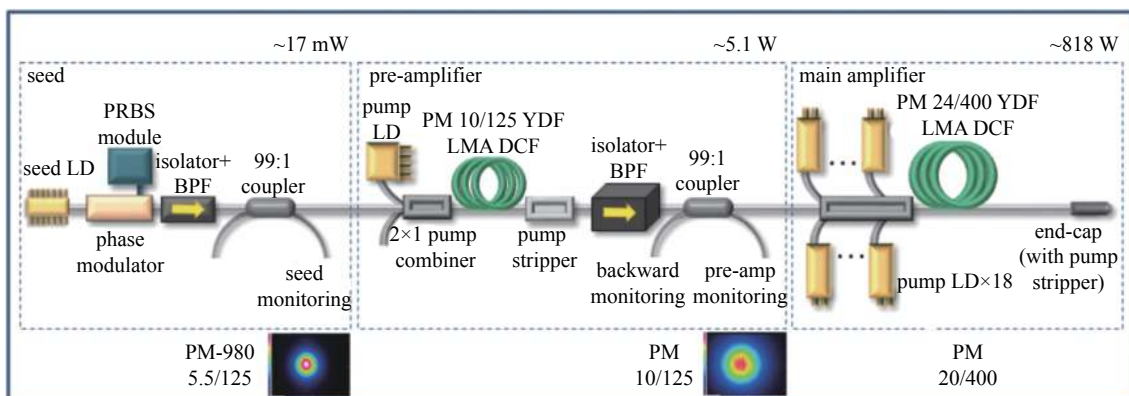


Fig. 8 Experimental setup of 818 W fiber amplifier with <7 GHz linewidth in Korea Advanced Optical Research Center

图 8 韩国先进光学研究中心 818 W 输出功率 <7 GHz 线宽光纤激光器实验装置图

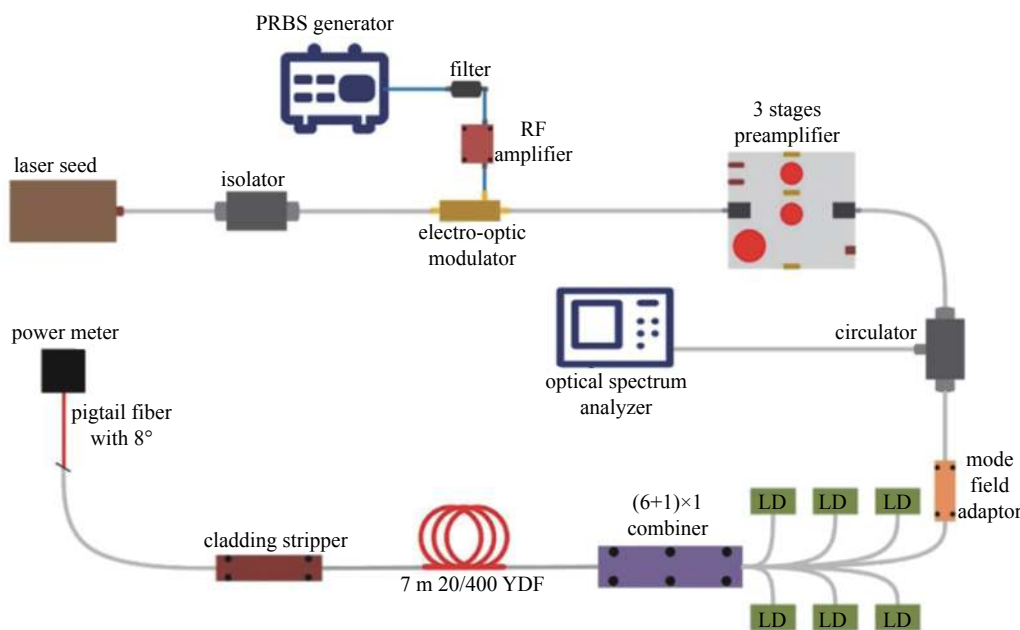


Fig. 9 Experimental setup of 1.27 kW fiber laser with 2.2 GHz linewidth in Shanghai Institute of Optics and Mechanics

图 9 上海光机所 1.27 kW 输出功率 2.2 GHz 线宽光纤激光器实验装置图

子源的激光器最终输出功率分别达到 1.2 kW 和 1.27 kW, 光谱中心波长分别为 1082 nm 和 1075 nm, 光谱线宽为 2.2 GHz, 光束质量为 $M^2 < 1.2$, 在最高输出功率下, 产生较为明显的 SBS 效应, 功率的进一步提升主要受限于 SBS 效应^[29]。

近年来, 光谱线宽小于 10 GHz 的窄线宽光纤激光器主要研究成果总结如表 1 所示。激光光谱线宽小于 10 GHz 时, 输出功率基本被限制在 1 kW 量级, 主要的限制因素为 SBS 和 MI 效应。

表 1 线宽小于 10 GHz 光纤激光器的代表性研究成果 (表中 PM 表示偏振保持)

Table 1 Representative research results of fiber laser with linewidth less than 10 GHz (PM refers to polarization maintained)

time	organization	power/kW	linewidth/GHz	M^2	limited factors	polarization	reference
2014	Air Force Research Laboratory	1.17	3	1.2	SBS	Non PM	[26]
2015	National University of Defense Technology	0.56	5	1.3	MI	PM	[23]
2016	Air Force Research Laboratory	1	2.3	<1.2	SBS	Non PM	[27]
2019	Korea Advanced Optical Research Center	0.818	<7	near single mode	SBS	PM	[28]
2020	Shanghai Institute of Optics and Mechanics	1.27	2.2	<1.2	SBS	Non PM	[29]

(2) 线宽 < 100 GHz 光纤激光器

对于线宽在 10~100 GHz 范围的光纤激光器, 主要的技术方案包括基于少纵模光纤振荡器功率放大结构和相位调制单频激光器功率放大结构两种方案。两种方案的主要区别在于采用的种子源不同, 基本结构均为 MOPA

结构。基于直接振荡器的窄线宽光纤激光器结构相对简单,但是在放大过程中光谱线宽会不断展宽,在较高输出功率下,光谱线宽很难控制在很窄的范围内,而相位调制多级放大的窄线宽光纤激光器在放大过程中光谱线宽几乎不展宽,有利于光谱线宽的精确控制,但是结构相对较为复杂。因此,对于线宽要求较低的系统,可选择采用基于直接振荡器的窄线宽光纤激光方案,对于线宽要求较为严格的系统,多采用相位调制多级放大结构。

2016年,中国工程物理研究院激光聚变研究中心将少纵模振荡器作为种子源,经光纤放大器放大后输出功率达到了2.9 kW,光谱线宽为0.31 nm,输出激光为多模激光,实验装置如图10所示。在放大过程中,激光的光谱线宽不断展宽,经理论计算表明,放大器中的光谱展宽与种子源中的纵模数量成线性关系,因此可以通过控制种子源中的纵模数量来减弱放大过程中的光谱展宽。文中实验对比了将两种不同线宽的种子源注入到放大器中,放大级输出线宽随功率的变化情况,实验结果与理论分析一致^[30]。

2019年,清华大学精密仪器系采用窄线宽光纤布拉格光栅搭建了少纵模光纤振荡器,经过放大级放大后实现了2.19 kW激光输出,输出效率为78.3%,实验装置如图11所示。振荡级采用20/400增益光纤,高反光栅和低反光栅的线宽分别为1 nm和0.03 nm,振荡级的光谱线宽为36.6 pm。采用976 nm半导体激光器反向泵浦基于25/400增益光纤的主放大系统进行功率放大,在2190 W输出功率下光谱线宽展宽为86.5 pm,光束质量为 $M^2=1.46$,在实验中没有观察到SBS和MI效应产生^[31]。

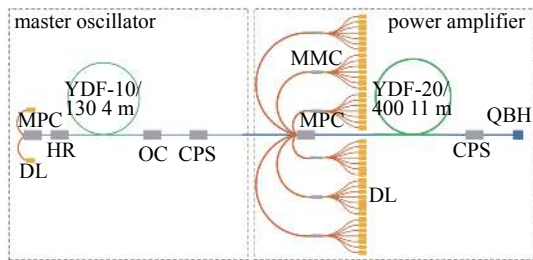


Fig. 10 Experimental setup of 2.9 kW fiber laser with 0.31 nm linewidth in China Academy of Engineering Physics

图10 中国工程物理研究院2.9 kW输出功率0.31 nm线宽光纤激光器实验装置

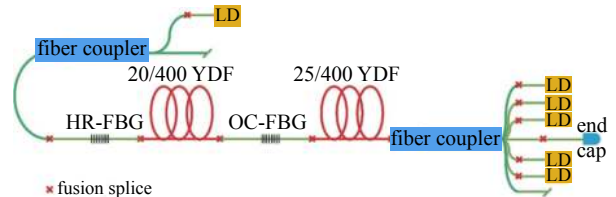


Fig. 11 Experimental setup of 2.19 kW fiber laser with 86.5 pm linewidth in Tsinghua University

图11 清华大学2.19 kW输出功率86.5 pm线宽激光器实验装置图

2019年,韩国国防发展局地面技术研究所报道了2.05 kW窄线宽光纤激光器,实验装置如图12所示。与清华大学精密仪器系2.19 kW窄线宽光纤激光器的技术方案类似,他们采用光谱线宽为0.08 nm的光纤光栅产生窄线宽振荡器,放大级泵浦源为波长锁定的976 nm半导体激光器,泵浦方式为正向泵浦,增益光纤为20/400掺镱光纤,经放大后输出功率达到2.05 kW,光谱线宽展宽为0.24 nm,输出激光的光束质量为 $M^2=1.28$ 。在最高输出功率下,

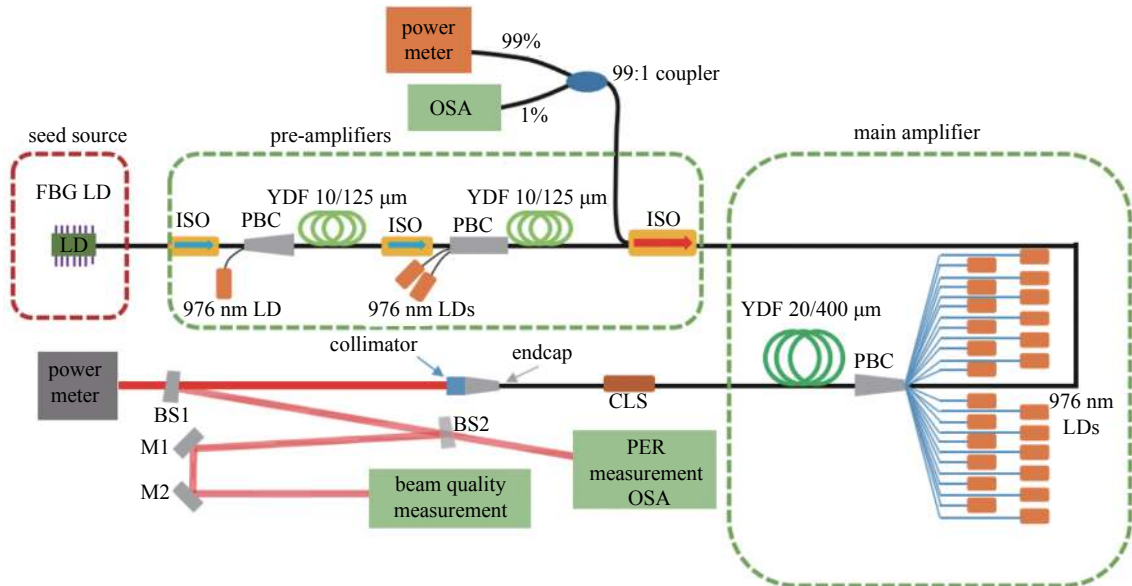


Fig. 12 Experimental setup of 2.09 kW fiber laser with 0.24 nm linewidth in South Korea

图12 韩国2.09 kW输出功率0.24 nm线宽光纤激光器实验装置

没有发生 SBS 效应和 MI 效应,但是随着输出功率的提升,光谱展宽非常明显,在更高输出功率下,光谱线宽将会是限制其应用的主要因素^[32]。

2020 年,中国工程物理研究院应用电子学研究所基于一对窄线宽保偏光栅和 10/130 保偏增益光纤构成振荡腔,以此作为种子源,经过放大后实现了 3 kW 级窄线宽保偏光纤激光输出,实验装置如图 13 所示。实验中,通过减短振荡腔中的光纤长度以减小纵模数量,从而控制光谱展宽,当输出功率为 3.08 kW 时,光谱线宽为 0.20 nm,光束质量为 $M^2=1.4$,偏振消光比(PER)为 94%^[33]。这是已报道的窄线宽全保偏光纤激光器的最高输出功率,功率的进一步提升受限于 SRS 效应。

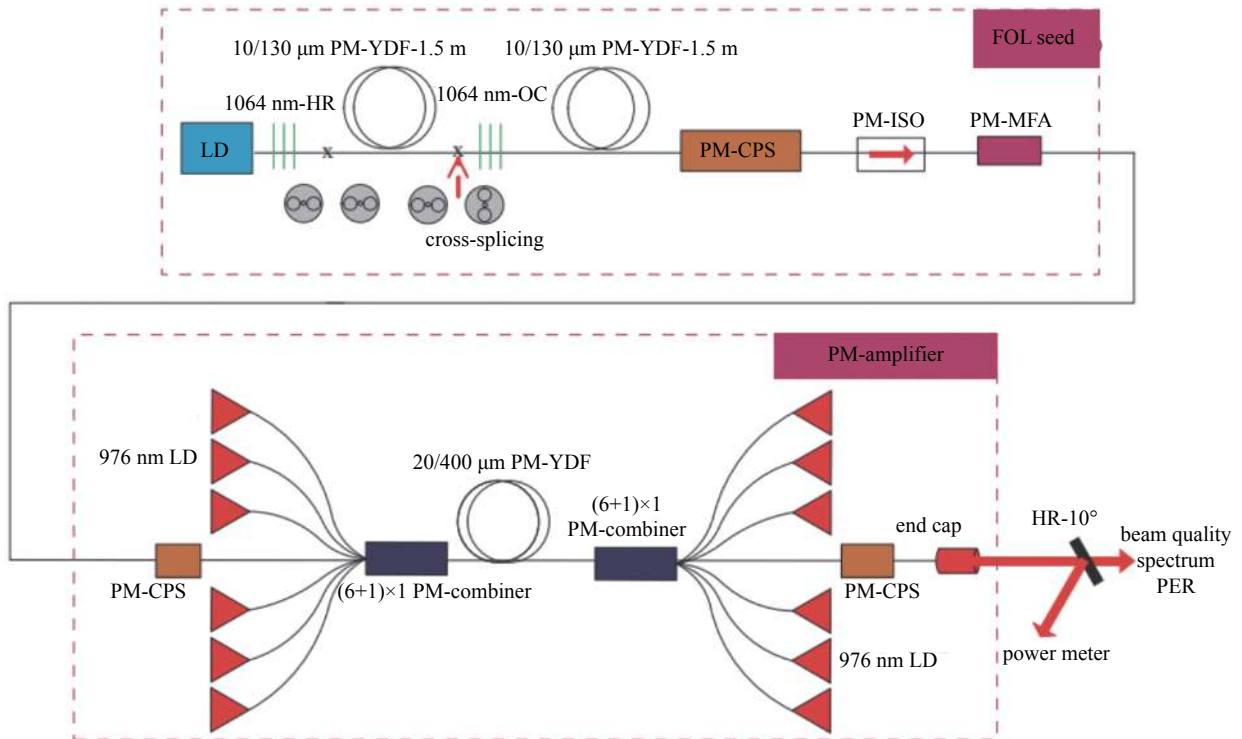


Fig. 13 3 kW level narrow linewidth polarization maintaining fiber laser system of China Academy of Engineering Physics

图 13 中国工程物理研究院 3 kW 级窄线宽保偏光纤激光系统

对于相位调制单频激光器功率放大的方案,目前的研究更为广泛。美国 IPG 公司于 2017 年报道了 1.5 kW 保偏窄线宽激光器和 2 kW 非保偏窄线宽激光器,输出光谱线宽分别为 15 GHz 和 20 GHz,光束质量因子 $M^2 < 1.1$ ^[34]。2018 年,他们又进一步将保偏光纤激光器的输出功率提升至 2 kW,非保偏光纤激光器的输出功率提升至 2.5 kW,实验方案如图 14 所示,在最高输出功率下,光谱线宽均为 30 GHz,光束质量因子 $M^2 < 1.1$ ^[35]。

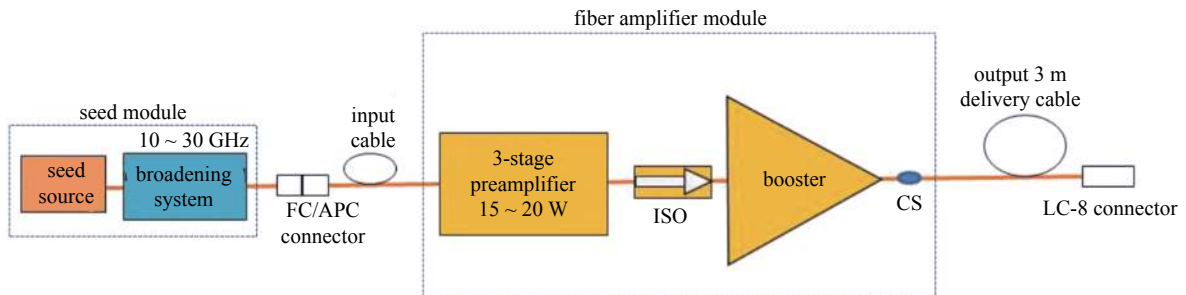


Fig. 14 2 kW narrow linewidth fiber laser system of IPG company

图 14 美国 IPG 公司 2 kW 级窄线宽光纤激光系统

2018 年,美国 nLight 公司将手性耦合纤芯光纤(CCC 光纤)应用到窄线宽光纤激光系统中,以抑制光纤激光器中的 MI 效应,实验装置如图 15 所示,单频激光器经相位调制后进行放大,最终实现了 20 GHz 线宽 2.4 kW 激光输出,在 2.2 kW 输出功率下达到 MI 阈值,进一步功率提升受限于 MI 效应^[36]。

国内,2015 年,国防科技大学报道了线性偏振窄线宽光纤激光器,实验装置如图 16 所示。种子源采用正弦信

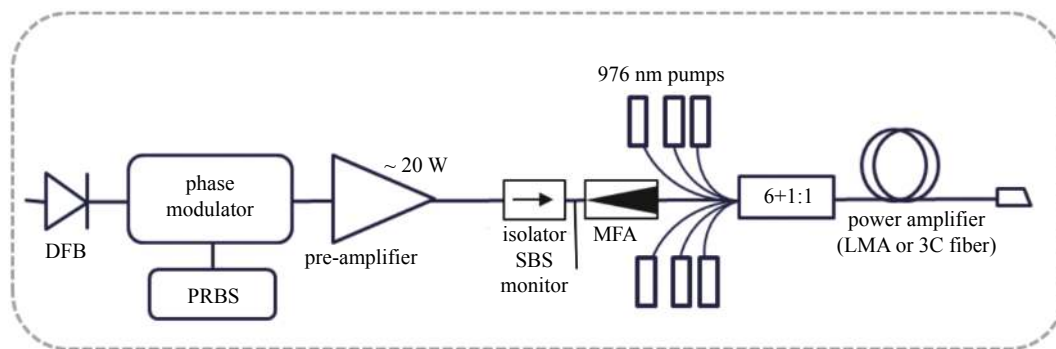


Fig. 15 Narrow linewidth fiber laser system based on CCC fiber of nLight company

图 15 美国 nLight 公司基于 CCC 光纤的窄线宽光纤激光系统

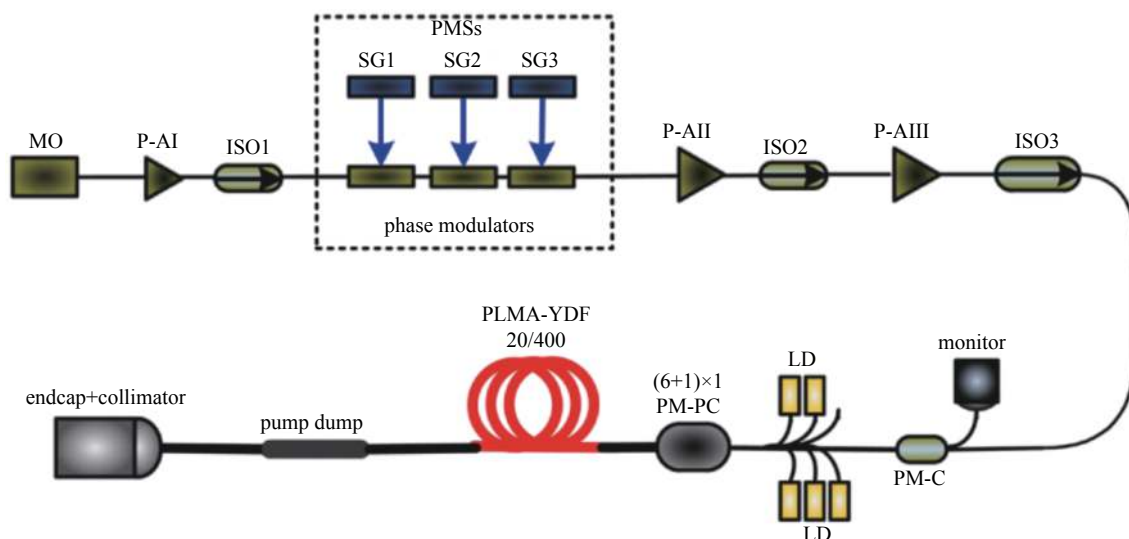


Fig. 16 Three stage sinusoidal phase modulation narrow linewidth laser system of National University of Defense Science and Technology

图 16 国防科技大学三级正弦相位调制保偏窄线宽激光系统

号对单频激光器进行相位调制, 通过增加正弦调制的级数可以增加光谱线宽, 当光谱线宽为 6, 18.5 和 45 GHz 时, 经过三级保偏放大级放大后, 激光输出功率分别达到 477, 1040 和 1890 W, 在 1520 W 输出功率下, 光束质量为 $M_x^2=1.19$, $M_y^2=1.27$, 功率的进一步提升受限于 MI 效应^[37]。

2017 年, 国防科技大学通过采用柱状盘绕的方式抑制 MI 效应, 将窄线宽保偏光纤激光器的输出功率提升至 2.43 kW, 实验装置如图 17 所示。在最高输出功率下, 没有发生 SBS 和 MI 效应, 光谱线宽为 0.255 nm, 偏振消光比为 18.3 dB, 功率的进一步提升主要受限于泵浦功率^[38]。

2015 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所报道了 1.75 kW 窄线宽光纤激光器, 激光光束质量为 $M^2=1.77$, 光谱线宽 20 GHz^[39]。2017 年, 进一步采用 ASE 种子源, 通过三级放大的激光系统, 如图 18 所示, 实现了 2.7 kW 激光输出, 光

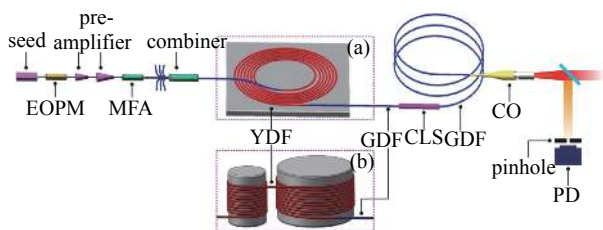


Fig. 17 Experimental setup of 2.43 kW polarization maintaining fiber laser with 0.255 nm linewidth of National Defense University of Science and Technology

图 17 国防科技大学 2.43 kW 输出功率 0.255 nm 线宽保偏光纤激光实验系统图

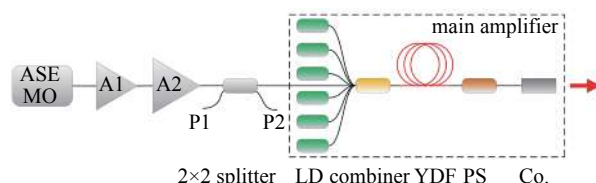


Fig. 18 Experimental setup of 2.7 kW fiber laser with 50 GHz linewidth in Shanghai Institute of Optics and Mechanics, CAS

图 18 中国科学院上海光学精密机械研究所 2.7 kW 输出功率 50 GHz 线宽光纤激光实验系统

束质量为 $M^2 < 1.2$, 光谱线宽为 50 GHz, 在最高输出功率下, 没有发生 SBS 效应和 MI 效应, 进一步功率提升受限于泵浦功率^[40]。

2018 年, 中国工程物理研究院应用电子学研究所采用白噪声相位调制方式将单频激光器的光谱线宽展宽为 0.18 nm, 之后经过三级放大, 实现了 3.5 kW 窄线宽光纤激光输出, 实验装置如图 19 所示。输出功率为 3.5 kW 时, 激光光谱线宽为 0.18 nm, 没有发生 SBS 效应, 但是当激光输出功率高于 3.17 kW 时, 发生 MI 效应。当输出功率为 3.5 kW 时, 激光光束质量为 $M_x^2 = 1.867$, $M_y^2 = 1.912$, 为多模激光。因此, 对于该系统, 限制其输出功率进一步提升的主要因素是 MI 效应^[41]。

2019 年, 中国工程物理研究院应用电子学研究所又进一步研究了保偏窄线宽光纤激光器, 实验装置如图 20 所示。种子源采用白噪声信号相位调制方式展宽单频激光器光谱, 之后通过多级放大器进行功率放大。实验中对比了不同光谱线宽下的 SBS 阈值, 当光谱线宽为 13 GHz 时, 实现了 1.5 kW 线偏振激光输出。随着激光输出功率的增加, 输出激光没有发生明显的模式劣化现象, 即没有达到 MI 阈值, 功率的进一步提升受限于 SBS 效应^[42]。当光谱线宽为 32 GHz 时, 实现了 2.62 kW 线偏激光输出, 光束质量为 $M^2 < 1.3$, 偏振消光比为 96.3%, 功率的进一步提升受限于 MI 效应^[43]。

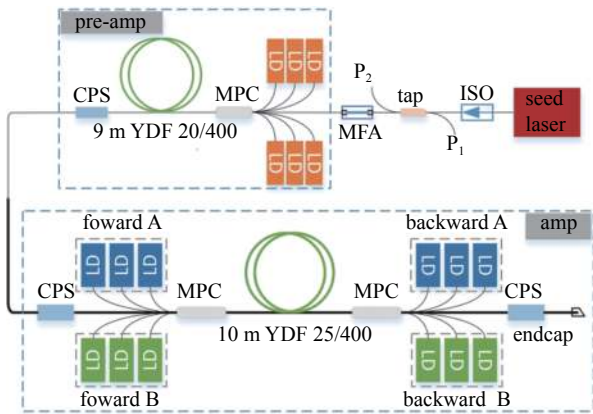


Fig. 19 Experimental setup of 3.5 kW fiber laser with 0.18 nm linewidth in China Academy of Engineering Physics

图 19 中国工程物理研究院 3.5 kW 输出功率 0.18 nm 线宽光纤激光器实验装置图

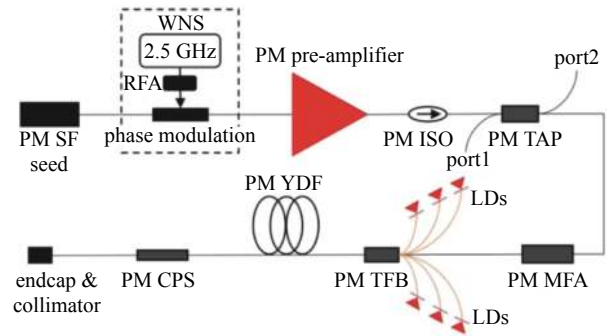


Fig. 20 Experimental setup of 1.5 kW fiber laser with 13 GHz linewidth in China Academy of Engineering Physics

图 20 中国工程物理研究院 1.5 kW 输出功率 13 GHz 线宽光纤激光实验装置图

表 2 给出了 10~100 GHz 线宽光纤激光器的主要研究成果。总结来看, 线宽在 100 GHz 以内的光纤激光器目前最高输出功率为 3.5 kW, 但是其光束质量较差, 为多模激光输出。输出功率的进一步提升主要受限于 SBS 效应和 MI 效应。

表 2 10~100 GHz 线宽光纤激光器的代表性研究成果 (表中 PM 表示偏振保持)

Table 2 Representative research results of fiber laser with 10~100 GHz linewidth (PM refers to polarization maintained)

time	organization	power/kW	linewidth/GHz	M^2	limited factors	polarization	reference
2016	China Academy of Engineering Physics	2.9	82	multi-mode	MI	Non PM	[30]
2017	Shanghai Institute of Optics and Mechanics	2.7	50	< 1.2	pump power	Non PM	[40]
2018	China Academy of Engineering Physics	3.5	48	1.89	MI	Non PM	[41]
2017	National University of Defense Technology	2.43	68	near single mode	pump power	PM	[38]
2019	Tsinghua University	2.19	23	1.46	pump power	Non PM	[31]
2019	China Academy of Engineering Physics	1.5	13	1.24	SBS	PM	[42]
2019	China Academy of Engineering Physics	2.62	32	< 1.3	MI	PM	[43]

1.3 短波长窄线宽光纤激光器

对于光谱合成技术, 增加合成激光光束的数量是提高合成功率的重要途径之一, 拓展光纤激光器的光谱范围有助于增加光谱合成的激光光束数量, 提升光谱合成功率^[44-45]。目前常用的光谱合成范围为 1050~1072 nm, 进一步拓展窄线宽光纤激光器的波长范围至 1030 nm 波段对光谱合成技术具有重要意义, 因此, 很多研究机构对短波

长(波长小于 1040 nm)窄线宽光纤激光器进行了研究。本论文主要对 1030 nm 光纤激光器进行研究,将光谱合成激光光子束的波长范围扩展至 1030 nm。

不同波长光纤激光器的输出特性主要受增益光纤吸收谱和发射谱的影响,对于短波长光纤激光器,相比于光纤激光器的传统波段(1060~1080 nm),增益光纤的吸收截面较大,产生的短波长激光很容易在增益光纤中被重吸收产生更长波长的激光输出,即产生 ASE,使其输出功率受限。

2011 年,耶拿大学的 O. Schmidt 等采用窄线宽 ASE 源作为种子光进行放大,种子源结构如图 21 所示。采用两个光栅将种子线宽控制在 12 pm,种子输出功率为 400 mW,中心波长为 1030 nm。种子源经过两级放大,第一级采用 40/200 的光子晶体光纤,第二级为 42/500 的光子晶体光纤,最终输出功率为 697 W,光束质量为 $M^2=1.34$ ^[46]。

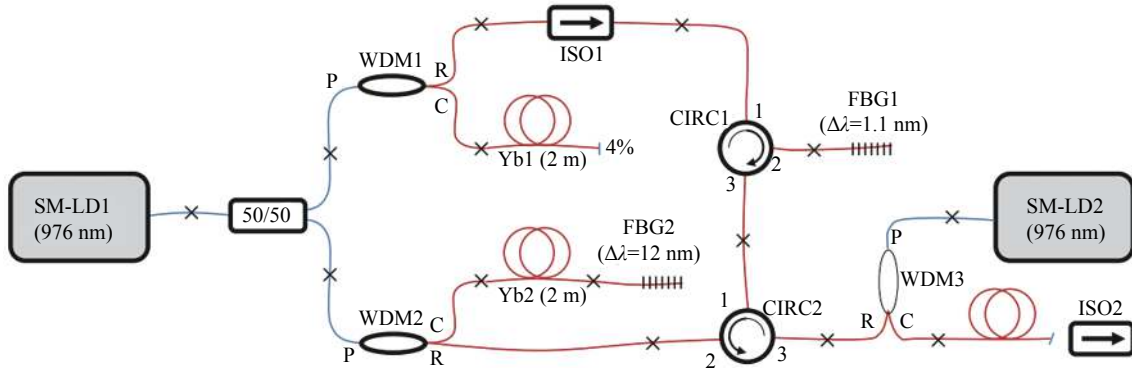


Fig. 21 Experimental structure of narrow linewidth ASE source in Jena University

图 21 耶拿大学窄线宽 ASE 源实验结构图

2016 年,美国空军实验室的 Nader A. Naderi 等使用 PRBS 信号调制 1030 nm 的单频激光器作为种子源,种子源光谱线宽为 3.5 GHz,之后经放大级进行放大,实验装置如图 22 所示。该系统将 1030 nm 波段的激光输出功率提升至 1034 W,光谱线宽为 11 pm,放大级输出效率为 80%,ASE 抑制比达 40 dB,光束质量为 $M^2=1.1\sim 1.2$ 。实验中通过控制增益光纤长度来抑制 SBS 和 ASE 效应^[47-48]。

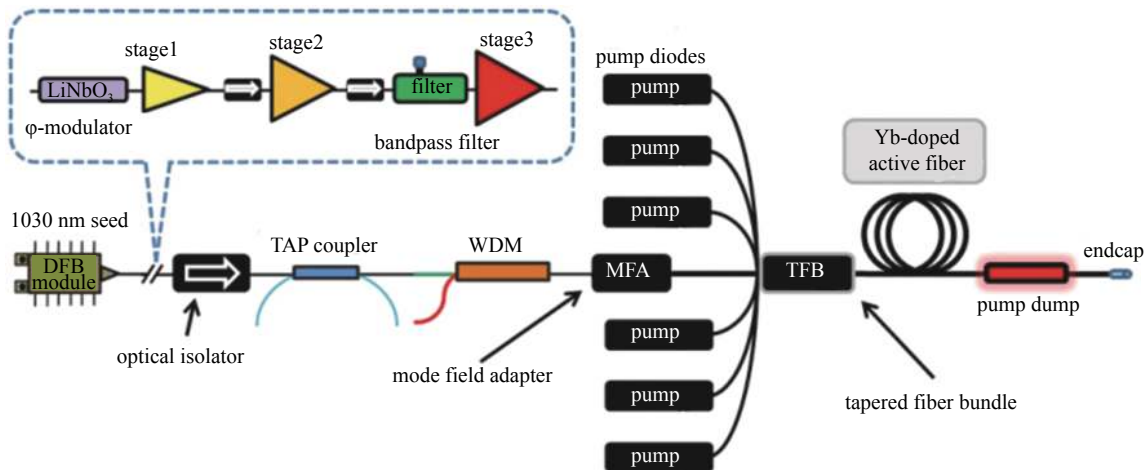


Fig. 22 Experimental setup of 1030 nm narrow linewidth fiber laser in US Air Force Laboratory

图 22 美国空军实验室 1030 nm 窄线宽光纤激光器实验装置图

2014 年,美国 Nufern 公司的 Ye Huang 等在 1028~1100 nm 的波长范围内,实现了 kw 级的激光输出^[49]。实验中主要对 1028 nm 和 1100 nm 的激光器进行了研究,并将结果与 1064 nm 的激光器对比,发现相比于传统波段光纤激光器,短波长和长波长光纤激光器的 ASE 效应都会明显增强。最终经过对 ASE 效应的抑制,在 1028 nm 波段实现了 1215 W 单模激光输出,光光效率为 75%。

2016 年,美国 IPG 公司的 Roman Yagodkin 等对单频激光器进行相位调制作为种子源,经放大后得到 >1.5 kW 激光输出,激光中心波长范围为 1030~1070 nm,光谱线宽 <15 GHz^[50],不同波长下的输出光谱图如图 23 所示。从光谱图中可以看出,相对于 1064 nm 附近的激光,短波长激光光谱的 ASE 抑制比低约 15 dB。2017 年,美国 IPG 公

司又对 1030 nm 的单频激光器进行相位调制,使光谱展宽为 20 GHz,经过三级预放大级后输出功率达到 15~20 W,最后经主放大级放大后得到 2.2 kW 短波长激光输出,是目前 1030 nm 波段光纤激光器的最高输出功率^[50]。

综上所述,由于 ASE 效应的影响,短波长窄线宽光纤激光器的最高输出功率仅为 2.2 kW,相比于典型波长 1064 nm 附近的窄线宽光纤激光器,还有很大的发展空间。

2 高功率窄线宽光纤激光器的限制因素

目前,高功率窄线宽光纤激光器的主要限制因素为 SBS 效应和 MI 效应。当光纤激光器的输出功率达到 kW 级以上时,由于光纤纤芯中功率密度很高,产生 SBS 效应,它是限制窄线宽光纤激光输出功率提升的重要因素^[51]。相比于 SBS 效应,MI 效应发现较晚,直到 2010 年才被德国耶拿大学的研究者发现^[52],之后迅速引起了各个研究机构的广泛关注,其主要实验现象是当光纤激光器的输出功率提高到特定值后,光纤中稳定传输的基模会发生模式劣化,产生强度和相位不断变化的高阶模式^[53-54]。MI 效应产生的根源在于大模场光纤无法做到只支持基横模运转,而是同时还支持一个以上的高阶模运转。种子相位噪声或者强度噪声中的高阶模成分在增益光纤中传输时,会与基模发生相互干涉作用,从而产生周期性的纵向和横向的强度分布,激光量子亏损加热与信号光场强度的正相关导致光纤出现横向和纵向的温度梯度,热光效应形成热致折射率光栅,其周期与模式干涉拍长相匹配,这种光栅反过来增强了基模和高阶模之间的相互耦合,在足够高的功率水平下导致 MI 效应的出现^[55]。MI 效应具有明显的阈值特性,在阈值之下,激光器输出光束质量较好,在阈值之上,光束质量急剧劣化,近场出现基模与高阶模的 ms 级的跳变^[56-57]。在窄线宽光纤激光器中,主要通过增大模场面积,减小光纤纤芯中功率密度来抑制 SBS 效应^[58-59],而提高 MI 阈值的重要方式是通过减小模场面积减少光纤中传导的模式数量^[60]。因此,SBS 效应的抑制和 MI 阈值的提升相互制约,如何同时抑制两种非线性效应,实现两者的平衡是实现更高功率输出的单模窄线宽光纤激光器的关键问题。另外,线偏振窄线宽光纤激光器也是目前的一个主要发展方向,偏振控制是实现线偏振光纤激光器的关键技术。

3 结论

高功率窄线宽光纤激光器在光束合成等领域具有广泛的应用前景,近年来得到了快速发展。本文在回顾了高功率窄线宽光纤激光技术的研究现状之后,对目前发展的主要限制因素进行了描述和说明,即激光器中非线性效应和模式不稳定效应限制了其输出功率的提升和输出激光光束质量的优化。进一步提高光纤激光器的性能仍是未来窄线宽光纤激光器发展的主要方向,如继续提高输出功率,改善窄线宽光纤激光的光束质量,拓展窄线宽光纤激光器的波段,继续压窄激光的光谱线宽,线偏振窄线宽激光输出以及进行整机小型化、实用化、智能化的研究。

参考文献:

- [1] Shi Wei, Fang Qiang, Zhu Xiushan, et al. Fiber lasers and their applications[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6554-6558.
- [2] Qu Zhou, Li Qiushi, Meng Hailong, et al. Application and the key technology on high-power fiber-optic laser in laser weapon[C]//Proc of SPIE. 2014: 92940C.
- [3] Naeem M. Advances in drilling with fiber lasers[C]//Industrial Laser Applications Symposium. 2015.
- [4] Tony H. Laser marking with fiber lasers[J]. *Industrial Laser Solutions*, 2012, 27(5): 7.
- [5] Clery D. Laser fusion, with a difference [J]. *Science*, 2015, 347(6218):111-112.
- [6] 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.
- [7] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. 2013.
- [8] Lin Honghuan, Xu Lixin, Li Chengyu, et al. 10.6 kW high-brightness cascade-end-pumped monolithic fiber lasers directly pumped by laser diodes in step-index large mode area double cladding fiber[J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102479.
- [9] Lin Aoxiang, Zhan Huan, Peng Kun, et al. 10 kW-level pump-gain integrated functional laser fiber[C]//Asia Communications and Photonics Conference. 2018.
- [10] 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.
- [11] 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: 18645-

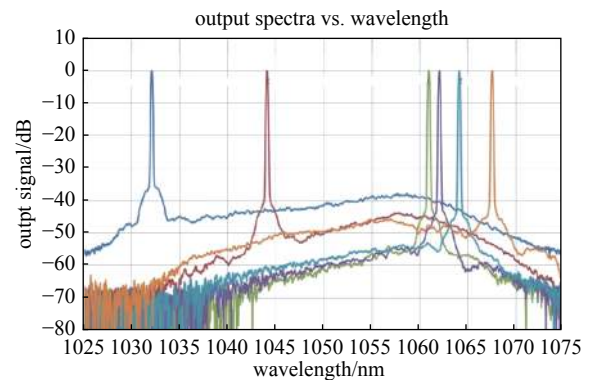


Fig. 23 Spectrums of fiber laser with different wavelengths at output power of > 1.5 kW in IPG company

图 23 美国 IPG 公司 > 1.5 kW 输出功率下不同波长激光输出光谱图

18654.

- [12] Otto H J, Jauregui C, Limpert J, et al. Average power limit of fiber-laser systems with nearly diffraction-limited beam quality[C]//Proc of SPIE. 2016:97280E.
- [13] Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun, et al. Coherent beam combining of high power fiber lasers: Progress and prospect[J]. *Science China (Technological Sciences)*, 2013, 56(7): 1597-1606.
- [14] Madasamy P, Thomas A, Loftus T, et al. Comparison of spectral beam combining approaches for high power fiber laser systems[C]//Proc of SPIE. 2008: 695207.
- [15] 蒲世兵, 姜宗福, 许晓军. 基于体布拉格光栅的光谱合成的数值分析[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(5): 721-724. (Pu Shibing, Jiang Zongfu, Xu Xiaojun. Numerical analysis of spectral beam combining by volume Bragg grating[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(5): 721-724)
- [16] 姜曼, 马鹏飞, 周朴, 等. 基于多层电介质光栅光谱合成的光束质量[J]. *物理学报*, 2016, 65: 104203. (Jiang Man, Ma Pengfei, Zhou Pu, et al. Beam quality in spectral beam combination based on multi-layer dielectric grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65: 104203)
- [17] Tian Fei, Yan Hong, Chen Li, et al. Investigation on the influence of spectral linewidth broadening on beam quality in spectral beam combination[C]//Proc of SPIE. 2015:92553N.
- [18] Doruk E, 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]//Proc of SPIE. 2011: 791407.
- [19] Beier F, Hupel C, Nold J, et al. Narrow linewidth, single mode 3 kW average power from a directly diode pumped ytterbium-doped low NA fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6011-6020.
- [20] Liem A, Tünnermann A, Sattler B, 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.
- [21] Yu C X, Shatrovov O, Fan T Y, et al. Diode-pumped narrow linewidth multi-kilowatt metalized Yb fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5202-5205.
- [22] 王小林, 周朴, 肖虎, 等. 窄线宽全光纤激光器实现666 W高功率输出[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(6): 1261-1262. (Wang Xiaolin, Zhou Pu, Xiao Hu, et al. Narrow linewidth all-fiber laser with 666 W power output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1261-1262)
- [23] Ran Yang, Tao Rumao, Ma Pengfei, et al. 560 W all fiber and polarization-maintaining amplifier with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(24): 7258-7263.
- [24] 张利明, 周寿桓, 赵鸿, 等. 780 W全光纤窄线宽光纤激光器[J]. *物理学报*, 2014, 63: 134205. (Zhang Liming, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, et al. 780 W narrow linewidth all fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 134205)
- [25] Naderi N A, Flores A, Anderson B M, et al. Beam combinable, kilowatt, all-fiber amplifier based on phase-modulated laser gain competition[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 3964-3967.
- [26] Dajani I, Flores A, Ehrenreich T. Multi-kilowatt power scaling and coherent beam combining of narrow-linewidth fiber lasers [C]//Proc of SPIE. 2016: 972801.
- [27] 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.
- [28] 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*, 2019, 16: 015102.
- [29] Liu Meizhong, Yang Yifeng, Shen Hui, 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: 629.
- [30] Huang Zhihua, Liang Xiaobao, Li Chengyu, 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.
- [31] Huang Yusheng, Yan Ping, Wang Zehui, et al. 2.19 kW narrow linewidth FBG-based MOPA configuration fiber laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3136-3145.
- [32] Junsu L, Kwang H L, Hwanseong J, 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.
- [33] 王岩山, 王珏, 常哲, 等. 基于简单MOPA结构实现3.08 kW全光纤窄线宽线偏振激光输出[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 011006. (Wang Yanshan, Wang Jue, Chang Zhe, et al. Output of 3.08 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber laser based on a simple MOPA structure[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 011006)
- [34] Platonov N, Yagodkin R, Cruz J, et al. 1.5 kW linear polarized on PM fiber and 2 kW on non-PM fiber narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifier [C]//Proc of SPIE. 2017: 100850M.
- [35] Nikolai P, Roman Y, 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]//Proc of SPIE. 2018: 105120E.
- [36] Kanskar M, Zhang J, Kaponen J, et al. Narrowband transverse-modal-instability (TMI)-free Yb-doped fiber amplifiers for directed energy applications[C]//Proc of SPIE. 2018: 2291253.
- [37] Ma Pengfei, Tao Rumao, Su Rongtao, 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.
- [38] Su Rongtao, Tao Rumao, Wang Xiaolin, et al. 2.43 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber amplifier based on mode instability suppression[J]. *Laser*

- [Physics Letters](#), 2017, 14: 085102.
- [39] Qi Yunfeng, Lei Ming, Liu Chi, et al. 1.75 kW CW narrow linewidth Yb-doped all-fiber amplifiers for beam combining application[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. 2015: ATu4M.4.
- [40] Qi Yunfeng, Yang Yifeng, Shen Hui, et al. 2.7 kW CW narrow linewidth Yb-doped all-fiber amplifiers for beam combining application [C]//Advanced Solid-State Lasers. 2017: ATu3A.1.
- [41] Li Tenglong, Zha Congwen, Sun Yinhong, 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.
- [42] Chang Zhe, Wang Yanshan, Sun Yinhong, et al. 1.5 kW polarization-maintained Yb-doped amplifier with 13 GHz linewidth by suppressing the self-pulsing and stimulated Brillouin scattering[J]. [Applied Optics](#), 2019, 58(23): 6419.
- [43] 王岩山, 马毅, 孙毅宏, 等. 2.62 kW, 30 GHz窄线宽线偏振近衍射极限全光纤激光器[J]. [中国激光](#), 2019, 46(12): 1215001. (Wang Yanshan, Ma Yi, Sun Yinhong, et al. 2.62 kW, 30 GHz linearly polarized all-fiber laser with narrow linewidth and near diffraction limit beam quality[J]. [Chinese Journal of Lasers](#), 2019, 46(12): 1215001)
- [44] Ott D, Divliansky I, Anderson B, et al. Scaling the spectral beam combining channels in a multiplexed volume Bragg grating[J]. [Optics Express](#), 2013, 21(24): 29620-29627.
- [45] Andrusyak O, Ciapurin I, Smirnov V, et al. Spectral beam combining of fiber lasers with increased channel density[C]//Proc of SPIE. 2007: 64531L.
- [46] Schmidt O, Rekas M, Wirth C, et al. High power narrow-band fiber-based ASE source[J]. [Optics Express](#), 2011, 19: 4421-4427.
- [47] Naderi N A, Dajani I, and Flores A. High-efficiency, kilowatt 1034 nm all-fiber amplifier operating at 11 pm linewidth[J]. [Optics Letters](#), 2016, 41(5): 1018-1021.
- [48] Naderi N A, Flores A, Anderson B M, et al. Kilowatt high-efficiency narrow-linewidth monolithic fiber amplifier operating at 1034 nm[C]// Proc of SPIE. 2016: 972803.
- [49] Huang Y, Edgcombe J, Ding J, et al. Performance of kW class fiber amplifiers spanning a broad range of wavelengths: 1028–1100 nm[C]//Proc of SPIE. 2014:89612K.
- [50] Yagodkin R, Platonov N, Yusim A, et al. >1.5 kW narrow linewidth cw diffraction-limited fiber amplifier with 40 nm bandwidth[C]//Proc of SPIE. 2016: 972807.
- [51] Moloney J V, Newell A C. Nonlinear optics[J]. [Physics D Nonlinear Phenomena](#), 1990, 44(1): 1-37.
- [52] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, et al. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. [Optics Express](#), 2011, 19(14): 13218-13224.
- [53] Smith A V, Smith J J. Mode competition in high power fiber amplifiers[J]. [Optics Express](#), 2011, 19(12): 11318-29.
- [54] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, et al. Theoretical analysis of mode instability in high-power fiber amplifiers[J]. [Optics Express](#), 2013, 21(2): 1944-1971.
- [55] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. [Optics Express](#), 2011, 19(11): 10180-10192.
- [56] Smith J J, Smith A V. Influence of signal bandwidth on mode instability threshold of fiber amplifiers[C]//Proceedings of SPIE. 2014: 93440L.
- [57] Otto H J, Stutzki F, Jansen F, et al. Temporal dynamics of mode instabilities in high-power fiber lasers and amplifiers[J]. [Optics Express](#), 2012, 20(14): 15710.
- [58] Broderick N G R, Offerhaus H L, Richardson D J, et al. Large mode area fibers for high power applications[J]. [Optics Fiber Technology](#), 1999, 5(2): 185-196.
- [59] Shiraki K, Ohashi M, Tated M. Suppression of stimulated brillouin scattering in a fibre by changing the core radius[J]. [Electronic Letter](#), 1995, 31(8): 668-669.
- [60] Jauregui C, Otto H J, Stutzki F, et al. Passive mitigation strategies for mode instabilities in high-power fiber laser systems[J]. [Optics Express](#), 2013, 21(16): 19375-19386.