



·光纤激光器·

# 高功率窄线宽光纤激光技术<sup>\*</sup>

来文昌，马鹏飞，肖虎，刘伟，李灿，姜曼，许将明，  
粟荣涛，冷进勇，马阎星，周朴

(国防科技大学前沿交叉学科学院,长沙 410073)

**摘要：**以波长拓展为主线介绍了单频光纤振荡器的研究进展，以功率提升为主线介绍了单频连续光纤放大器的发展现状，以产生窄线宽种子源的方法为依据总结了1 μm波段高功率窄线宽连续光纤激光器的国内外研究成果。分析当前高功率单频光纤激光器和高功率窄线宽光纤激光器的发展趋势和面临的主要挑战，梳理并讨论高功率窄线宽光纤激光的关键技术，并基于当前高功率窄线宽光纤激光器的发展现状介绍其在各领域的应用价值。

**关键词：**激光器；光纤放大器；窄线宽；高功率；模式不稳定；非线性效应

中图分类号：TN248.1

文献标志码：A doi: 10.11884/HPLPB202032.200186

## High-power narrow-linewidth fiber laser technology

Lai Wenchang, Ma Pengfei, Xiao Hu, Liu Wei, Li Can, Jiang Man, Xu Jiangming,  
Su Rongtao, Leng Jinyong, Ma Yanxing, Zhou Pu

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In this paper, the research progress of single-frequency fiber oscillators are introduced in the terms of wavelength expansion, the development of single frequency fiber amplifiers are introduced in the terms of power scaling. Besides, the research achievements of 1 μm-band high-power narrow-linewidth fiber laser are summarized based on the techniques of generating narrow-linewidth seed sources. Then the development trend and main challenges of high-power single-frequency and narrow-linewidth fiber laser are analyzed. The key technologies of high-power narrow-linewidth fiber laser are summarized and discussed. Finally, applications in various fields based on the current development status of high-power narrow-linewidth fiber laser are introduced.

**Key words:** lasers; fiber amplifiers; narrow linewidth; high power; mode instability; nonlinear effects

1961年, America Optical公司的Snitzer在掺钕玻璃波导中观察到激光现象,不久后便实现了光纤激光放大<sup>[1]</sup>,随后在1964年研制出第一台光纤激光器<sup>[2]</sup>。1973年,Bell实验室成功实现半导体泵浦的掺钕光纤激光器,大大提高激光器的泵浦效率<sup>[3]</sup>。然而,将低亮度的半导体激光高效率地耦合到直径几μm的纤芯内较为困难,限制了激光功率的提升。1988年,Snitzer等人提出双包层光纤的概念,使泵浦光在双包层光纤的内包层传输,信号光在纤芯传输。由于内包层几何尺寸和数值孔径较大,因此亮度相对较低、但输出功率较高的半导体激光器可被广泛应用于双包层光纤泵浦<sup>[4]</sup>。随着双包层光纤概念的提出和高亮度半导体泵浦源的发展,光纤激光器取得飞速发展,并由于其紧凑性好、热管理方便、系统稳定、光束质量高等优良特性在工业加工、生物医疗、基础科研等领域得到广泛应用<sup>[5-6]</sup>。

功率提升是光纤激光发展的主要方向之一,随着功率的提升,光纤激光的应用领域不断拓展<sup>[7-8]</sup>。2013年,美国IPG Photonics公司报道了单纤单模光纤激光器实现20 kW输出<sup>[9]</sup>,为目前单路光纤激光器最高输出功率,而该公司的多模连续光纤激光器系统输出功率可达100 kW<sup>[10]</sup>。此外,一些特定的应用场合诸如频率转换<sup>[11-12]</sup>、引力波探测<sup>[13-15]</sup>、相干雷达<sup>[16-17]</sup>、光束合成<sup>[18-20]</sup>等除了要求激光高功率输出外,还要求激光具有良好的相干性和高光束质

\* 收稿日期:2020-07-02; 修订日期:2020-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目(62035015, 62005316);湖南省自然科学基金项目(2019JJ10005)

作者简介:来文昌(1996—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光技术研究; laiwenchang203@163.com。

通信作者:周朴(1984—),男,研究员,博士生导师,主要从事光纤激光与光束合成技术研究; zhoup203@163.com。

量。因此,高功率窄线宽光纤激光由于其良好的相干性和高光束质量受到广泛关注<sup>[21-27]</sup>。由于应用需求不同,窄线宽的定义并无明确分界线,通常,光谱线宽低于或在0.1 nm量级的光纤激光被称作窄线宽光纤激光。特别的,在窄线宽光纤激光中,如果信号光仅含有一个纵模(即单一频率),则称之为单频光纤激光。

由于单一激光振荡器直接输出功率有限,为提升光纤激光的输出功率,通常采用种子源主振荡功率放大(MOPA)的技术方案,即使用低功率的光纤激光器作为主振荡种子源,然后采用多级放大器结构进行功率放大<sup>[22]</sup>。然而,高功率窄线宽光纤激光的功率提升受到模式不稳定(TMI)效应和受激布里渊散射(SBS)效应等非线性效应的限制。SBS产生的后向Stokes光将对激光器产生严重危害,从而限制其功率提升<sup>[28-29]</sup>。此外,随着功率提升,TMI效应的出现将使得激光能量在基模与高阶模之间转换,导致输出激光的光束质量突然退化<sup>[30-34]</sup>。截止目前,受限于SBS和TMI,单频光纤激光器输出功率尚停留在数百W量级<sup>[35]</sup>。而随着一系列抑制SBS和TMI的关键技术的研究发现,窄线宽光纤激光已实现数kW输出<sup>[21]</sup>。

本文对高功率窄线宽光纤激光器进行详细介绍。首先介绍单频光纤激光的发展现状、趋势与挑战,然后介绍高功率窄线宽光纤激光的发展现状,并对其关键技术进行总结,分析高功率窄线宽光纤激光的发展趋势与面临的挑战,最后对高功率窄线宽光纤激光器的应用进行详细介绍并进行总结和展望。

## 1 单频连续光纤激光器的现状、趋势与挑战

### 1.1 单频光纤振荡器的发展现状

单频光纤振荡器按谐振腔结构可分为线性腔与环形腔,其中线性腔主要包括分布反馈型(DBF)和分布布拉格反射型(DBR)两种<sup>[35-36]</sup>。DBF光纤振荡器通过在一段掺稀土离子光纤上直接刻写相移光栅形成极窄滤波器以实现单纵模振荡,然而,由于光纤热效应极易改变相移光栅特性,因此DBF光纤振荡器输出功率有限<sup>[37-41]</sup>。DBR光纤振荡器通常两端为窄带光纤布拉格光栅,中间为掺稀土离子有源光纤,为实现单纵模输出,线性腔通常较短,因此需要较高的增益系数以实现高功率输出<sup>[42-47]</sup>。环形腔结构光纤振荡器可提高谐振腔长度从而提高增益,其核心是构建窄带宽的滤波单元实现单频输出,然而环形腔结构相对复杂并引入额外的损耗<sup>[48-52]</sup>。因此,DBR光纤振荡器由于其紧凑性和稳定性更适用于实现单频光纤振荡器高功率输出<sup>[5]</sup>。

如上所述,线性腔腔体通常较短,要求掺稀土离子光纤具有较高增益系数,传统石英玻璃基质掺杂光纤由于对稀土离子溶解度较小,其掺杂浓度难以进一步提高,输出激光功率有限<sup>[36]</sup>。近年来,多组分光纤如磷酸盐光纤和锗酸盐光纤由于其对稀土离子具有更好的溶解度,被广泛用于单频光纤振荡器并将输出功率提升至数百mW甚至W量级<sup>[45-46, 53-54]</sup>。磷酸盐掺杂光纤和锗酸盐掺杂光纤的应用不仅极大提高单频光纤振荡器的输出功率,其结合不同的掺杂稀土离子更是极大丰富单频光纤振荡器的输出波段。**表1**列出了不同输出波段的单频光纤振荡器的研究成果<sup>[39-66]</sup>。

由于镱离子的特殊能级结构,掺镱光纤振荡器可以实现中心波长在波段范围为970~1200 nm的单频激光输出<sup>[55-56]</sup>。2004年,NP Photonics公司基于掺镱磷酸盐光纤,采取DBR振荡器结构实现功率200 mW、线宽3 kHz的光纤激光输出,其中心波长为1064.2 nm<sup>[57]</sup>;2012年,该公司基于同类型光纤和振荡腔结构又实现100 mW的976 nm单频激光输出,其输出激光线宽小于7 kHz<sup>[42]</sup>。国内华南理工大学在此领域研究较为深入,2011年,华南理工大学基于磷酸盐掺镱光纤和DBR腔体结构实现功率达400 mW、线宽小于7 kHz、中心波长为1064 nm的单频激光输出<sup>[53]</sup>;2013年,该研究团队将波长范围扩展到1014 nm和1083 nm,分别实现164 mW和100 mW功率输出,光谱线宽分别控制在7 kHz和2 kHz以内<sup>[58-59]</sup>;2016年,该研究团队首次基于掺镱磷酸盐光纤将波长范围扩展到1100 nm以上,实现中心波长为1120 nm的单频激光输出,其输出功率达62 mW,光谱线宽为5.7 kHz<sup>[60]</sup>;2020年,该研究团队又在掺钕石英玻璃基质光纤中实现中心波长为1120 nm单频激光输出,输出功率为15 mW,光谱线宽为71.5 kHz<sup>[44]</sup>。而基于石英YAG晶体光纤,2019年,山东大学也实现功率110 mW、线宽1.3 MHz、中心波长为1064 nm的激光振荡输出<sup>[43]</sup>。

1.5 μm波段单频光纤激光主要基于铒镱共掺磷酸盐光纤实现。2006年,美国亚利桑那大学基于铒镱共掺光子晶体光纤,采取DFB振荡结构实现输出功率高达2.3 W的单频光纤激光输出,激光中心波长为1534 nm,然而其光谱线宽并未明确<sup>[45]</sup>。2010年,中国科学院上海光学精密机械研究所基于DBR振荡结构实现功率100 mW中心波长为1535 nm的激光输出,输出激光线宽小于5 kHz<sup>[61]</sup>。同年,华南理工大学基于DBR振荡结构实现功率306 mW、线宽1.6 kHz的激光输出,其中心波长为1535 nm<sup>[62]</sup>。2013年,基于铒镱共掺光纤的单频光纤振荡器的输出波段进一步扩展到1538 nm,输出功率提升到550 mW,线宽限制在60 kHz以内<sup>[54]</sup>。

表 1 单频光纤振荡器研究进展  
Table 1 Typical progress of single frequency Yb-doped fiber oscillators

fiber type	doped ions	year	institution	structure	wavelength/nm	power/mW	linewidth/kHz	Ref.
silica fiber	Tm	2017	Tianjin University	DBR	1920	120	36	[63]
	Yb:YAG	2019	Shandong University	DBR	1064	110	1300	[43]
	Nd	2020	SCUT	DBR	1120	15	71.5	[44]
phosphate fiber	Yb	2004	NP Photonics	DBR	1064.2	200	3	[57]
	Yb	2011	SCUT	DBR	1064	400	<7	[53]
	Yb	2012	NP Photonics	DBR	976	100	<3	[42]
	Yb	2013	SCUT	DBR	1014	164	<7	[58]
	Yb	2013	SCUT	DBR	1083	100	<2	[59]
	Yb	2016	SCUT	DBR	1120	62	5.7	[60]
	Er-Yb	2003	—	DBR	1560	200	1.75	[64]
	Er-Yb	2005	The University of Arizona	DBR	1550	1600	—	[65]
	Er-Yb	2005	The University of Arizona	DBR	1535	1900	—	[66]
	Er-Yb(PCF)	2006	The University of Arizona	DFB	1534	2300	—	[45]
germanate fiber	Er-Yb	2008	The University of Arizona	DFB	1536	165	—	[40]
	Er-Yb	2010	SIOM	DBR	1535	100	<5	[61]
	Er-Yb	2010	SCUT	DBR	1535	306	1.6	[62]
	Er-Yb	2013	—	DBR	1538	550	<60	[54]
	Tm	2007	NP Photonics	DFB	1893	50	3	[39]
silicate fiber	Tm	2018	SCUT	DBR	1950	617	12.5	[46]
	Tm	2019	Zhejiang University	ring cavity	1957	400	20	[52]
silicate fiber	Tm	2019	University of Southampton	DBR	1952	1520	—	[47]
	Tm	2009	AdValue Photonics	DFB	1950	40	<3	[41]

2 μm 波段单频光纤激光主要基于掺铥锗酸盐光纤实现。2007年, NP Photonics 公司基于 DFB 振荡腔结构在掺铥锗酸盐光纤中实现中心波长为 1893 nm 的单频激光输出, 输出功率为 50 mW, 光谱线宽为 3 kHz<sup>[39]</sup>。2017 年, 天津大学基于 DBR 结构并在腔外额外加入一段掺铥光纤延长振荡器线性腔实现中心波长为 1920 nm、功率为 120 mW 单频激光输出, 其线宽在功率为 50 mW 时测得为 36 kHz<sup>[63]</sup>。2018 年, 华南理工大学基于 DBR 振荡腔结构实现中心波长为 1950 nm、输出功率为 617 mW、线宽为 12.5 kHz 的激光输出<sup>[46]</sup>。2019 年, 浙江大学基于环形振荡腔结构实现中心波长为 1957 nm、输出功率为 400 mW、线宽 20 kHz 的激光输出<sup>[52]</sup>。同年, 英国南安普顿大学也基于 DBR 振荡腔结构将波长范围扩展到 1952 nm, 输出功率达到 W 量级(1.52 W), 然而其输出激光线宽并未明确<sup>[47]</sup>。

## 1.2 单频光纤放大器的发展现状

为实现单频光纤激光更高功率输出, 通常采用 MOPA 技术方案, 将光纤振荡器的输出激光输入光纤放大器进行进一步功率放大<sup>[67]</sup>。与其他稀土离子相比, 镆离子具有能级结构简单、理论上不存在激发态吸收、量子亏损小等优势。另外, 镆离子在 1 μm 波段附近具有较高的发射系数, 在 900~980 nm 波段具有良好的吸收系数, 而常用的泵浦源半导体激光器在 900~980 nm 波段具有最高的输出功率和电光转换效率<sup>[35]</sup>, 因此掺镱光纤放大器是实现高功率光纤激光输出的首选方案。[表 2](#) 列出了当前国内外单频掺镱光纤放大器的代表性研究成果, 按结构划分可分为空间耦合结构和全光纤结构。

基于空间耦合结构: 2005 年, 英国南安普顿大学采用后向泵浦方式实现 264 W 单频保偏激光输出, 偏振消光比(PER)为 16 dB, 光束质量  $M^2 < 1.1$ <sup>[68]</sup>。2007 年, 该课题组采用大模场 D 型掺镱光纤抑制 SBS, 分别实现 511 W 单频非保偏近衍射极限( $M^2 = 1.6$ )激光输出和 402 W 单频保偏(PER<16 dB)近衍射极限( $M^2 < 1.1$ )激光输出<sup>[69]</sup>。同年, 美国康宁公司基于自主设计的大模场增益光纤, 降低纤芯中光场与声场的重叠度, 采用双向泵浦技术实现 502 W 的单频光纤激光输出, 光束质量  $M^2 = 1.4$ <sup>[70]</sup>。2011 年, 美国密歇根大学采用纤芯手性耦合(CCC)掺杂光纤作为增益光

纤实现 511 W 单频保偏激光输出, 偏振消光比大于 15 dB, 光束质量因子  $M^2$  约为 1.19<sup>[71]</sup>。同年, 美国空军实验室基于新型声场裁剪掺镱光子晶体光纤作为增益光纤, 结合后向泵浦技术和温度梯度实现 494 W 单频保偏激光输出, 偏振消光比为 15 dB, 光束质量因子  $M^2 < 1.3$ <sup>[72]</sup>。2014 年, 该实验室进一步对声场裁剪光子晶体光纤进行优化设计, 使得纤芯含有 7 个独立的掺杂区, 可产生三个横向声场, 并施加温度梯度, 最高温差可达 70 °C, 其实验结构图如图 1 所示, 该系统可同时抑制 SBS 和 TMI 效应, 最终实现功率高达 811 W, 光束质量因子  $M^2 < 1.2$  的单频保偏激光输出<sup>[73]</sup>, 这是目前公开报道的单频光纤激光最高输出功率。

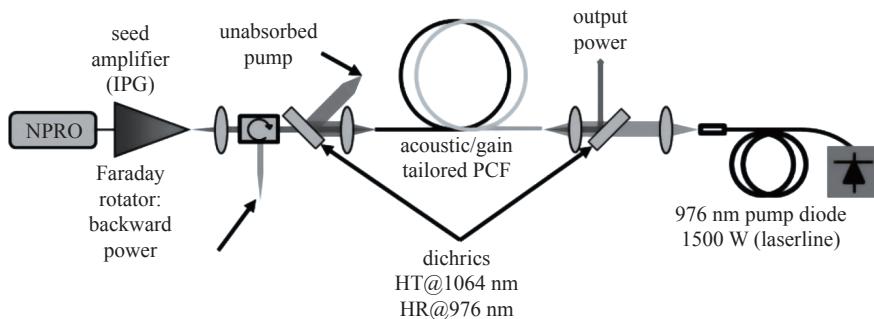


Fig. 1 Schematic of 811 W single frequency fiber amplifier with bulk optical structure in AFRL (cited from Ref. [72])

图 1 美国空军实验室 811 W 空间结构单频光纤放大器结构示意图<sup>[72]</sup>

与空间耦合结构相比, 全光纤结构具有稳定性好、结构紧凑、可维护性更好、可实现柔性操作等优势, 但由于光程更长等因素, 全光纤单频激光实现高功率输出难度更大<sup>[35]</sup>。基于全光纤结构: 2008 年, 美国 OFS 实验室在声场裁剪增益光纤中混合铝和锗元素, 基于四级放大结构实现 194 W 单频激光输出, 输出激光中心波长为 1083 nm, 光束质量因子  $M^2 = 1.2$ <sup>[74]</sup>。2012 年, 德国汉诺威激光中心结合温度梯度和后向泵浦方式抑制 SBS, 实现 301 W 单频激光输出<sup>[75]</sup>。2013 年, 国防科技大学采用保偏高掺杂 30/250 μm 光纤, 实现 332 W 单频保偏光纤激光输出, 偏振消光比为 21 dB, 光束质量因子  $M^2 = 1.4$ <sup>[76]</sup>。同年, 中国科学院上海光学精密机械研究所对单模光纤施加应力梯度和温度梯度实现了功率 171 W、光束质量  $M^2 = 1.02$  的单频激光输出, 主放大器增益光纤纤芯包层比为 10/125 μm, 这是目前单模光纤中单频激光最高输出功率<sup>[77]</sup>。2017 年, 国防科技大学采用大模场保偏高掺杂光纤, 其纤芯包层比为 25/250 μm, 光纤总长度为 2.68 m, 通过施加应力梯度将 SBS 增益谱展宽近 60 倍, 最终实现功率达 414 W、光束质量  $M^2 = 1.34$  单频保偏光纤激光输出, 偏振消光比为 16.9 dB<sup>[78]</sup>。2020 年, 该课题组采用长锥形大模场保偏掺杂光纤, 其输入端纤芯包层比为 36.1/249.3 μm, 输出端纤芯包层比为 57.8/397.3 μm, 光纤长度约为 1.3 m(其中锥区长度约为 0.74 m), 实验结构图如图 2 所示, 该系统最终实现 550 W 单频近衍射极限光纤激光输出, 光束质量因子  $M^2 = 1.47$ , 这是目前基于全光纤 MOPA 结构单频光纤激光的最高输出功率<sup>[79]</sup>。

此外, 1.5 μm、2 μm 波段单频光纤放大器也实现百 W 级激光输出。对于 1.5 μm 波段单频光纤放大器: 2015 年, 美国 BAE 系统公司的 Daniel Creeden 等人采用大模场铒镱共掺光纤实现中心波长为 1560 nm、功率为 207 W、线宽为 540 Hz 的单频光纤激光输出, 激光器斜率效率为 50.5%, 光束质量因子  $M^2 = 1.05$ <sup>[84]</sup>。2017 年, 德国汉诺威激光中心实现波长 1556 nm、功率为 111 W 的线偏振单频光纤激光输出, 偏振消光比约为 13 dB<sup>[85]</sup>。而对于 2 μm 波段单频光纤放大器: 2009 年, 格鲁曼(Northrop Grumman)公司的 Goodno 等人基于空间耦合结构和双向泵浦技术, 采用掺铥光纤实现波长为 2040 nm、功率为 608 W 的单频激光输出, 光束质量因子  $M^2$  约为 1.05<sup>[86]</sup>。而基于全光纤结构, 2013 年, 国防科技大学课题组采用掺铥光纤实现中心波长为 1970 nm、功率为 102 W 的单频光纤激光输出<sup>[87]</sup>。2015 年, 该课题组进一步将 2 μm 波段单频光纤放大器输出功率提升至 310 W, 并且放大器系统还未到 SBS 阈值, 进一步功率提升受限于泵浦功率<sup>[88]</sup>。此外, 2014 年, 北京工业大学课题组基于全光纤保偏系统实现中心波长 2000.9 nm、功率为 210 W 的单频线偏振光纤激光输出, 偏振消光比大于 17 dB, 光束质量因子  $M^2 = 1.6$ <sup>[89]</sup>。2020 年, 华南理工大学在单模掺铥光纤中实现中心波长为 1950 nm、功率为 55.3 W、线宽为 6.95 kHz 的单频线偏振光纤激光输出, 偏振消光比为 19 dB, 光束质量因子  $M^2$  小于 1.03<sup>[90]</sup>。

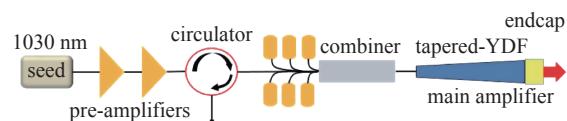


Fig. 2 Schematic of 550 W single frequency fiber amplifier with all-fiber structure in NUDT (cited from Ref. [79])

图 2 国防科技大学 550 W 全光纤结构单频光纤放大器结构示意图<sup>[79]</sup>

表 2 单频掺镱光纤放大器研究进展

Table 2 Typical progress of single frequency Yb-doped fiber amplifiers ( Non: nonlinearly polarized state, NA: not available, ATF: acoustically tailored fiber, T-YDF: tapered Yb-doped fiber, LMA: large mode area )

year	institution	configuration	power/W	wavelength/nm	PER/dB	$M^2$	approaches	Ref.
2005	University of Southampton	bulk	264	1060	16	<1.1	counter-pumping	[68]
2007	University of Southampton	bulk	511	1060	Non	1.6	LMA fiber	[69]
2007	Corning	bulk	502	1064	Non	1.4	bi-directionally pumping	[70]
2011	AFRL	bulk	494	1064	15	<1.3	ATF and counter-pumping	[72]
2011	University of Michigan	bulk	511	1064	15	1.19	chirally-coped-core fiber	[71]
2014	AFRL	bulk	811	1064	NA	<1.2	ATF and thermal gradient	[73]
2008	OFS Laboratories	all-fiber	194	1083	Non	1.2	acoustically-designed fiber	[74]
2011	AFRL	all-fiber	203	1065	NA	—	thermal gradient and gain competition	[80]
2012	Laser Zentrum Hannover	all-fiber	301	1064	Non	—	counter-pumping and thermal gradient	[75]
2012	NUDT	all-fiber	310	1064	Non	1.3	LMA fiber	[81]
2013	NUDT	all-fiber	332	1064	21	1.4	LMA fiber	[76]
2013	SIOM	all-fiber	170	1064	NA	1.02	strain gradient and thermal gradient	[77]
2017	NUDT	all-fiber	414	1064	16.9	1.34	LMA fiber and strain gradient	[78]
2020	NUDT	all-fiber	550	1030	Non	1.47	tapered fiber	[79]
2019	LIGO Laboratories	all-fiber	178	1064	19	<1.32	specialty LMA fiber	[15]
2019	Laser Zentrum Hannover	all-fiber	200	1064	19	—	LMA fiber and thermal gradient	[82]
2020	University of Bordeaux	all-fiber	365	1064	17	<1.1	LMA fiber and short fiber length	[83]

### 1.3 单频光纤激光器的发展趋势与挑战

单频光纤激光器的进一步发展主要包含波段扩展、功率提升、线宽压窄、噪声抑制等四个方面。虽然上述单频光纤振荡器的输出激光波长已经实现 1, 1.5, 2  $\mu\text{m}$  的宽波段范围覆盖, 然而, 进一步扩展输出波段范围以满足不同应用需求仍然是单频光纤激光器的主要研究方向之一, 除上述材质光纤之外, 基于氟化物基质光纤和硫化物基质光纤的单频光纤振荡器也受到研究人员关注<sup>[91-96]</sup>, 例如基于氟锆酸盐(ZBLAN)掺钬(Ho)光纤可实现 1.2  $\mu\text{m}$  和 3  $\mu\text{m}$  波段单频光纤激光输出<sup>[93-94]</sup>。然而, 由于掺杂稀土离子能级结构的限定, 光纤振荡器直接输出的激光波段范围仍然有限, 因此利用受激布里渊散射和受激拉曼散射等非线性效应实现单频激光波段扩展也是一种有效方法<sup>[97-98]</sup>。功率提升, 线宽压窄在相干探测尤其是引力波探测等领域具有重要意义, kW 级单频光纤激光器是下一代引力波探测系统的关键<sup>[14,82]</sup>。然而当前单频光纤激光输出功率仍未突破 kW 级关口, 尤其是全光纤结构单频光纤激光器功率提升更加困难<sup>[35]</sup>。当前, 单频光纤激光器的输出功率进一步提升受到 SBS 和 TMI 的双重制约, 综合考虑 SBS 和 TMI 的抑制是解决功率提升瓶颈的关键<sup>[73, 78]</sup>。近年来, 低噪声单频光纤激光器逐渐成为光纤激光领域研究热点<sup>[15,82-83]</sup>, 现代引力波探测系统对激光的相对强度噪声、频率噪声、光束指向性噪声都有较高要求<sup>[82]</sup>。2020 年, 法国波尔多大学基于全光纤结构实现 365 W 单频保偏激光超低强度噪声输出, 偏振消光比为 17 dB, 光束质量因子  $M^2 < 1.1$ , 在 2~10 kHz 之间的相对强度噪声降至 -160 dBc/Hz, 在连续工作 1100 h 的过程中功率稳定性达到 0.7% (RMS) 以下<sup>[83]</sup>。

## 2 高功率窄线宽光纤激光的发展现状、趋势与挑战

### 2.1 高功率窄线宽光纤激光的发展现状

如上所述, 受限于 SBS 和 TMI 的双重抑制, 单频光纤激光器输出功率还未突破 kW 量级。实际上, 在光束合成等领域, 激光的输出线宽并不需要严格单频, 线宽容忍度可达到几十 GHz 甚至 nm 量级<sup>[99-103]</sup>。而线宽的展宽可有效提升 SBS 阈值, 实现更高功率光纤激光输出, 因此高功率窄线宽光纤激光器受到广泛关注。然而, 考虑到对光束合成系统复杂程度、稳定性、合成效率等因素的影响, 单路光纤激光输出线宽应尽可能窄。因此功率提升与线宽压窄是高功率窄线宽光纤激光发展过程中不断平衡和追求的目标。产生窄线宽激光种子源的方法主要包括: 窄线宽半导体激光、窄线宽光纤振荡器、宽谱光源(超荧光光源、随机光纤激光)滤波、单频激光相位调制。

基于窄线宽半导体激光: 2016 年, 美国陆军研究实验室通过快速移动半导体激光谐振腔发射腔面反射镜, 实

现频率变化达到 $5 \times 10^{17}$  Hz/s的窄线宽啁啾种子源，种子源线宽为40 GHz，主放大器增益光纤纤芯包层比为25/400 μm，总长度为25 m，约90%泵浦光被前5.6 m增益光纤吸收，最终输出功率达1.6 kW<sup>[104]</sup>。2019年，韩国国防发展局地面技术研究所采用线宽为0.08 nm的稳态布拉格光栅半导体激光器作为种子源进行高功率放大，实现输出功率达2.05 kW窄线宽光纤激光，在放大过程中，激光线宽由于非线性效应从0.08 nm展宽到0.24 nm，最大功率输出时光束质量因子测得约为1.28。其实验结构如图3所示，主放大器采用20/400 μm掺镱增益光纤，长度为11.6 m。24路高功率976 nm半导体激光接入主放大器，可提供2.5 kW泵浦功率<sup>[105]</sup>。

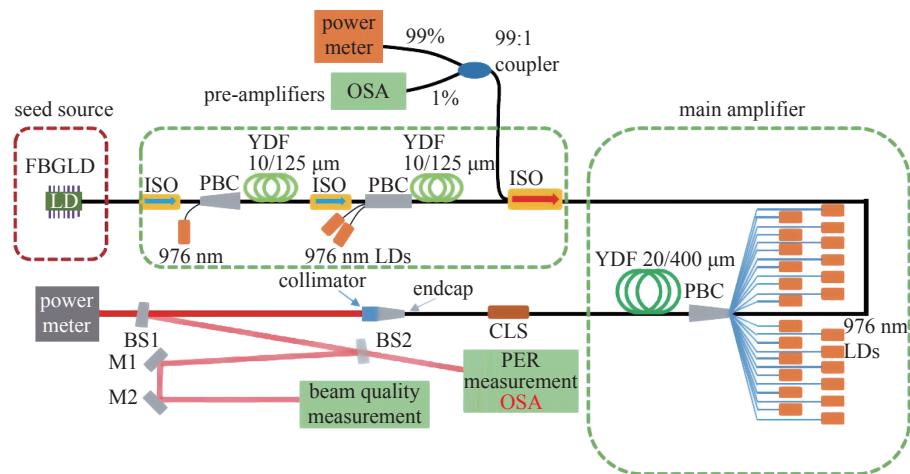


Fig. 3 Schematic of 2.05 kW narrow linewidth fiber laser based on FBG-stabilized LD in Ground Technology Research Institute of South Korea (cited from Ref. [105])

图3 韩国国防发展局基于窄线宽半导体激光实现2.05 kW窄线宽光纤激光结构示意图<sup>[105]</sup>

基于窄线宽光纤振荡器：表3列出了近年来基于窄线宽光纤振荡器的高功率窄线宽光纤激光研究成果<sup>[22, 106-114]</sup>。2015年，山东海富光子科技有限公司采用DBR结构窄线宽光纤振荡器，提供功率约为6 W、线宽约为25 GHz的种子激光，然后采用两级放大器进行放大，最终实现2.05 kW激光输出，光谱线宽展宽到75 GHz，光束质量因子 $M^2 < 1.4$ <sup>[106]</sup>。2016年，中国工程物理研究院分别基于10/130 μm掺镱光纤振荡器和20/400 μm掺镱光纤振荡器实现功率高达2.9 kW和3.1 kW窄线宽激光输出，输出光谱线宽分别为0.31 nm和1.77 nm<sup>[107]</sup>。2017年，该课题组采用偏振控制技术基于窄线宽光纤振荡器实现近1.1 kW、线宽为6.5 GHz的线偏振激光输出，偏振消光比为14.5 dB，光束质量因子约为1.1<sup>[108]</sup>。2020年，该课题组又将窄线宽偏振光纤振荡器种子注入全保偏光纤放大器，实现功率为3.08 kW、线宽为0.2 nm的线偏振光纤激光输出，偏振消光比约为11.6 dB，光束质量因子 $M^2$ 小于1.45，实验结构如图4所示，主放大器增益光纤长度约为9 m，纤芯包层比为20/400 μm，这是目前公开报道的基于全光纤结构窄线宽偏振光纤激光器最高输出功率<sup>[22, 109]</sup>。同年，该课题组又实现中心波长1030 nm、功率为3 kW、线宽为0.18 nm的高功率窄线宽近衍射极限激光输出，光束质量因子 $M^2 < 1.174$ <sup>[110]</sup>。2017年，清华大学基于窄线宽振荡器实现功率高达3.1 kW激光输出，光束质量因子 $M^2 = 1.58$ ，然而其光谱线宽较宽，约为2.5 nm<sup>[111]</sup>。2019年，清华大学课题组采取后向泵浦方式并缩短增益光纤长度等方法压窄激光线宽，利用前级振荡器吸收多余后向泵浦光，实验结构图如图5所示，该系统最终实现2.19 kW光纤激光输出，激光线宽仅为0.0865 nm，光束质量因子 $M^2 = 1.46$ <sup>[112]</sup>。

表3 基于窄线宽光纤振荡器的高功率窄线宽光纤激光研究进展

Table 3 Progress of high power narrow-linewidth fiber lasers based on narrow-linewidth fiber oscillators

year	institution	power/kW	linewidth	$M^2$	PER/dB	Ref
2015	HFB Photonics	2.05	75 GHz	<1.4	Non	[106]
2015	Tianjin University	0.52	30 GHz	<1.09	>18	[113]
2016	CAEP	2.9	0.31 nm	—	Non	[107]
2017	NUDT	1.018	0.3 nm	<1.24	14	[114]
2017	Tsinghua University	3.12	2.5 nm	1.58	Non	[111]
2017	CAEP	1.093	6.5 GHz	1.1	14.5	[108]
2019	Tsinghua University	2.19	0.0865 nm	1.46	Non	[112]
2020	CAEP	3.08	0.2 nm	<1.45	11.6	[22]

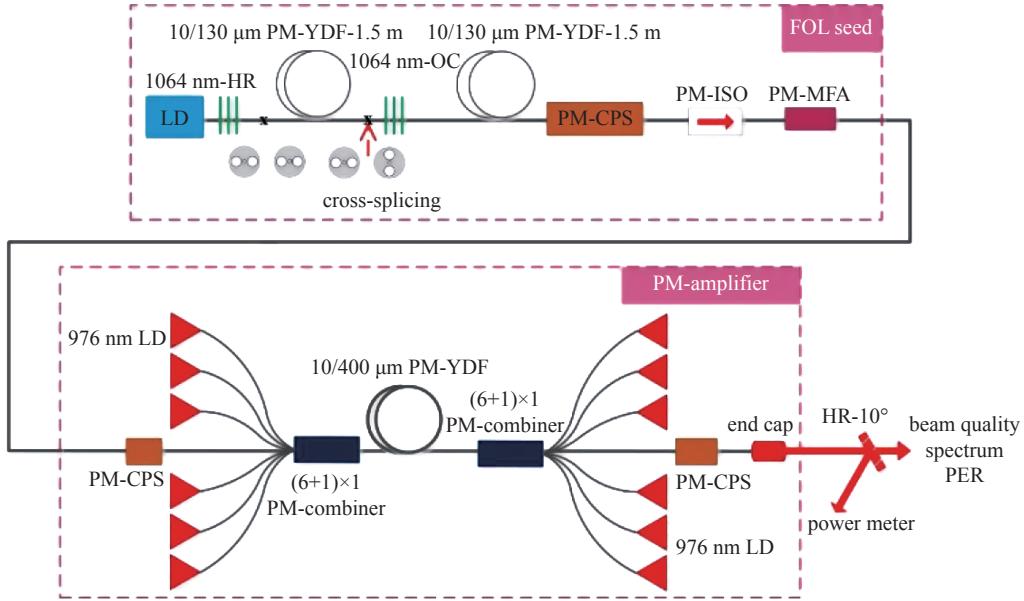


Fig. 4 Schematic of 3.08 kW narrow linewidth linearly polarized fiber laser based on narrow linewidth fiber oscillator in CAEP (cited from Ref. [22])

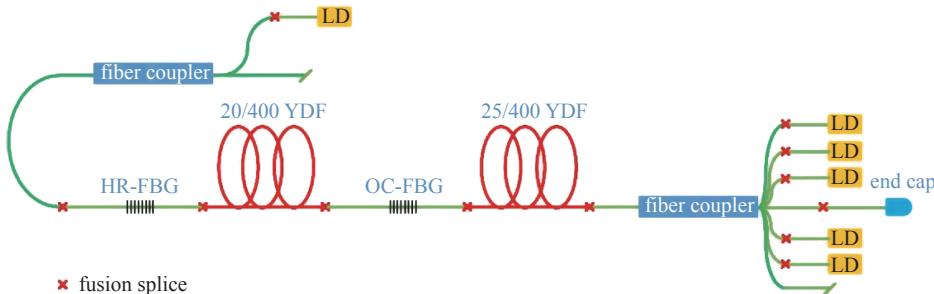
图 4 中国工程物理研究院基于窄线宽光纤振荡器实现 3.08 kW 窄线宽线偏振光纤激光结构示意图<sup>[22]</sup>

Fig. 5 Schematic of 2.19 kW narrow linewidth fiber laser based on narrow linewidth fiber oscillator in Tsinghua University (cited from Ref. [112])

图 5 清华大学基于窄线宽光纤振荡器实现 2.19 kW 窄线宽光纤激光结构示意图<sup>[112]</sup>

基于宽谱光源(超荧光光源(ASE)、随机光纤激光)窄带滤波: 2015 年, 国防科技大学采用 ASE 源窄带滤波实现功率 0.8 kW、线宽约为 0.2 nm 线偏振光纤激光输出, 偏振消光比大于 12 dB, 光束质量因子  $M^2$  约为 1.3<sup>[115]</sup>。同年, 该研究团队搭建三级放大器结构对 ASE 窄带滤波源进行放大, 实现功率 1.87 kW、线宽 1.7 nm 的激光输出, 光束质量因子  $M^2=1.71$ <sup>[116]</sup>。2017 年, 该研究团队又采用窄带滤波后线偏振随机激光作为种子源进行放大, 实验结构如图 6 所示, 种子激光中心波长为 1080 nm、线宽为 0.088 nm、功率为 0.71 W、偏振消光比为 22.5 dB; 输出激光最高功率可达 1.01 kW, 此时光谱线宽为 0.212 nm, 偏振消光比为 17 dB, 两个方向的光束质量因子分别为  $M_x^2=1.15$  和  $M_y^2=1.13$ <sup>[117]</sup>。中国科学院上海光学精密机械研究所基于 ASE 源窄带滤波的高功率窄线宽光纤激光器方面进行了一系列研究<sup>[25, 118-120]</sup>。2015 年, 该研究团队采用线宽为 20 GHz 的 ASE 窄带滤波源作为种子源, 通过模式控制和冷却技术实现 1.75 kW 激光输出, 光束质量因子  $M^2=1.77$ <sup>[119]</sup>。2016 年, 该研究团队基于光纤光栅级联滤波、线宽操控、光纤模式控制等技术实现了功率 2.5 kW、线宽 0.18 nm 的近衍射极限激光输出, 光束质量因子在功率为 2 kW 时测得为  $M_x^2=1.191$ ,  $M_y^2=1.186$ <sup>[120]</sup>。2017 年, 该研究团队进一步将基于 ASE 窄带滤波种子源的窄线宽光纤放大器的输出功率提升至 2.7 kW, 系统结构如图 7 所示, 种子源输出激光功率为 50 mW, 线宽为 50 GHz。主放大器采用 20/400 μm 双包层大模场掺镱光纤, 当达到最大输出功率时, 99.5% 的激光功率包含在以 1064.1 nm 为中央波长的 50 GHz 光谱带宽内, 光束质量因子  $M^2<1.2$ <sup>[25]</sup>。

基于单频激光相位调制: 与其他几种产生窄线宽光纤激光的方法相比, 单频激光相位调制种子源时域稳定, 在放大过程中光谱线宽特性保持良好, 被认为是基于 MOPA 结构实现高功率窄线宽激光输出的首选方案<sup>[21]</sup>。目前, 相位调制方法主要包括正弦(Sine)相位调制、白噪声(WNS)相位调制、伪随机编码(PRBS)相位调制等, 表 4 列出了近年来基于单频激光相位调制的高功率窄线宽光纤激光研究成果。2011 年, 美国 Fibertek 公司采用两束频率不同的正弦信号进行相位调制, 实现 kW 级窄线宽光纤激光输出, 线宽小于 0.5 GHz, 光束质量因子小于 1.4<sup>[121]</sup>。2016

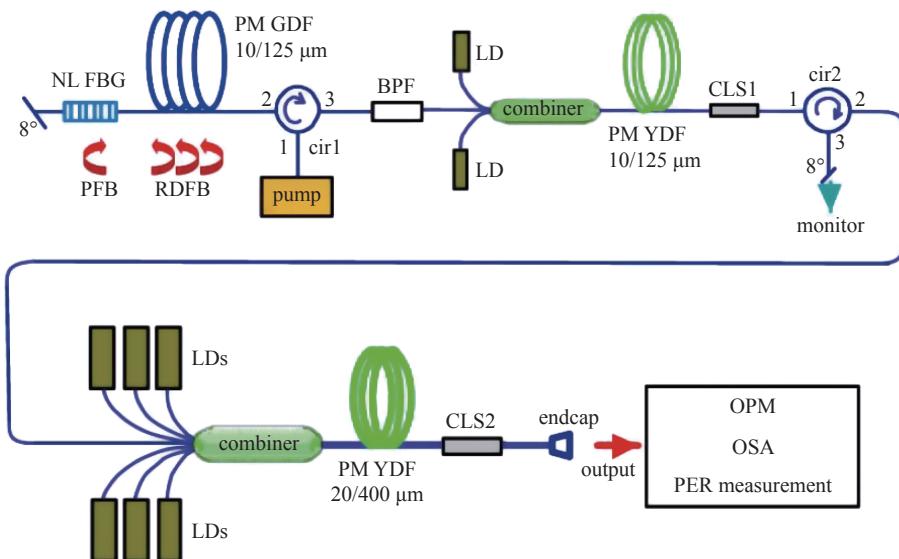


Fig. 6 Schematic of 1.01 kW narrow linewidth linearly polarized fiber amplifier based on random fiber laser in NUDT (cited from Ref. [117])

图 6 国防科技大学基于随机光纤激光实现 1.01 kW 窄线宽线偏振光纤放大器结构示意图<sup>[117]</sup>

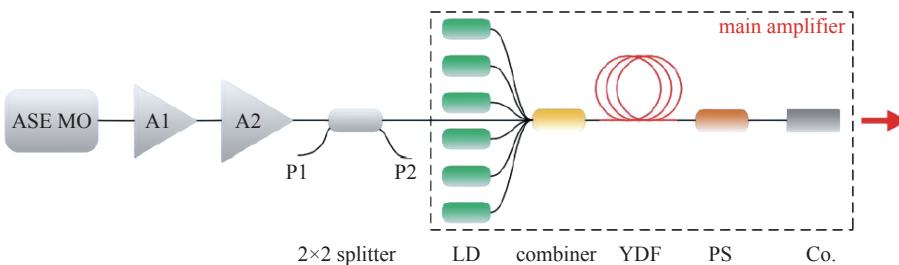


Fig. 7 Schematic of 2.7 kW narrow linewidth fiber laser based on filtered ASE source in SIOM (cited from Ref. [25])

图 7 上海光学精密机械研究所基于 ASE 滤波源实现 2.7 kW 窄线宽光纤激光结构示意图<sup>[25]</sup>

年,国防科技大学采取级联正弦相位调制展宽种子激光线宽,主放大器采用 8.5 m 保偏 20/400  $\mu\text{m}$  增益光纤,实验结构如图 8 所示,最终实现功率 1890 W、线宽 45 GHz 的线偏振激光输出,偏振消光比为 15.5 dB,在输出功率为 1520 W 时,两个方向光束质量因子  $M^2$  分别为 1.19 和 1.27<sup>[122]</sup>。2017 年,该课题组采用白噪声相位调制方式,将单频激光谱线展宽至 0.255 nm,并采用柱状缠绕光纤方式抑制模式不稳定效应,最终实现 2.43 kW 窄线宽线偏振光纤激光输出,偏振消光比约为 18.3 dB<sup>[123]</sup>。2018 年,该课题组进一步采用同带泵浦技术基于白噪声相位调制种子源实现功率高达 3.94 kW 激光输出,输出激光 90 % 以上功率集中在宽度为 0.89 nm 的光谱范围内,主放大器选用长度 31 m、纤芯直径 30  $\mu\text{m}$ 、包层直径 250  $\mu\text{m}$  的大模场掺镱光纤,最高输出功率时光束质量因子  $M^2=1.86$ <sup>[24]</sup>。近期,该课题组又基于白噪声相位调制技术抑制 SBS,引入高阶模相对损耗抑制 TMI,实现输出功率达 4.09 kW 的高功率、近单模窄线宽光纤激光输出,主放大器斜率效率达 78.5%,典型的输出光谱和光束质量测量结果分别如图 9(a) 和 9(b) 所示。在最高输出功率下,系统的 3 dB 线宽为 0.9 nm、输出光谱信噪比达 49.5 dB、光束质量因子  $M^2=1.05$ ,该结果是目前已报道的窄线宽光纤激光系统的最高输出功率。

2018 年,中国工程物理研究院应用电子学研究所基于白噪声相位调制种子源,采取双向泵浦技术实现 3 kW 激光输出,其 3 dB 线宽为 0.175 nm,光束质量因子  $M^2=1.5$ 。进一步将种子光谱展宽至 0.38 nm,提高泵浦功率,可得到 3.5 kW 高功率激光输出,光束质量因子  $M^2=1.9$ <sup>[124]</sup>。2019 年,该研究团队基于 WNS 相位调制进一步优化光谱线宽,采取反向泵浦结构提高 SBS 阈值,最终实现全光纤结构 2.62 kW 近衍射极限线偏振激光输出,3 dB 线宽约为 32 GHz,偏振消光比为 14.2 dB,光束质量因子  $M^2$  小于 1.3<sup>[125]</sup>。同年,中国工程物理研究院激光聚变中心通过优化白噪声相位调制和光纤缠绕方式同时抑制受激拉曼散射(SRS)效应和模式不稳定效应,采取 915 nm 泵浦方式,实现 3.7 kW 高功率激光输出,3 dB 线宽约为 0.3 nm,两个方向光束质量因子  $M^2$  分别为 1.358 和 1.202,实验结构图如图 10 所示<sup>[126]</sup>。

2019 年,中国科学院上海光学精密机械研究所通过白噪声信号和正弦信号级联调制获得功率为 3 mW、线宽

表 4 基于相位调制技术的高功率窄线宽光纤激光研究进展

Table 4 Progress of high power narrow-linewidth fiber lasers based on phase modulation techniques

modulation methods	year	institution	power/kW	linewidth	$M^2$	PER/dB	Ref
sine modulation	2011	Fibertek, Inc.	1	<0.5 GHz	<1.4	Non	[121]
	2016	NUDT	1.89	45 GHz	<1.3	15.5	[122]
WNS modulation	2017	NUDT	2.43	0.255 nm	—	18.3	[123]
	2018	NUDT	3.94	0.89 nm	1.86	Non	[24]
	2018	CAEP	2.5	54 GHz	<1.21	Non	[138]
	2018	CAEP	3.5	0.38 nm	1.9	Non	[124]
	2019	CAEP	1.5	13 GHz	1.14	13	[139]
	2019	NUDT	0.827	1.8 GHz	—	12	[140]
	2019	SIOM	3.01	48 GHz	1.17	Non	[127]
	2019	CAEP	2.62	32 GHz	<1.3	14.2	[125]
	2019	CAEP	3.7	0.3 nm	<1.36	Non	[126]
	2020	NUDT	4.09	0.9 nm	1.05	Non	—
PRBS modulation	2014	AFRL	1.17	3 GHz	1.2	Non	[129]
	2015	AFRL	1.47	5 GHz	1.17	Non	[141]
	2016	AFRL	1	2.3 GHz	<1.2	Non	[130]
	2016	MIT	3.1	12 GHz	<1.15	10	[23]
	2018	University of Michigan	2.2	20 GHz	1.09	Non	[134]
	2020	SIOM	1.27	2.2 GHz	<1.2	Non	[128]
	2020	DSO National Laboratories, Singapore	1	6.9 GHz	1.19	Non	[135]
unavailable phase modulation	2016	Jena	3	0.17	1.3	Non	[136]
	2017	Jena	3.5	0.18	1.3	Non	[137]
	2018	Jena	4.4	—	—	Non	[26]
	2018	IPG	2.5	30 GHz	<1.1	Non	[27]

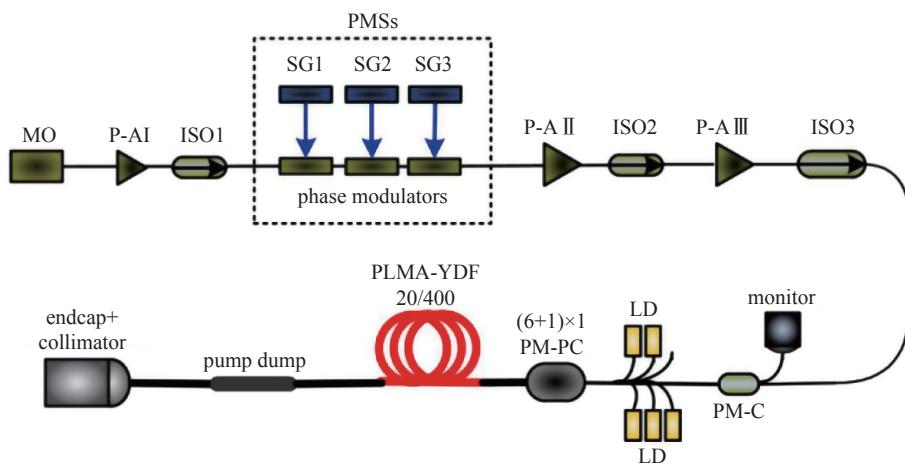


Fig. 8 Schematic of 1.89 kW narrow linewidth linearly polarized fiber laser based on cascaded sine phase modulation in NUDT (cited from Ref. [122])

图 8 国防科技大学基于级联正弦相位调制实现 1.89 kW 窄线宽线偏振光纤激光结构示意图<sup>[122]</sup>

为 48 GHz 的种子源, 经过三级预放大到 14 W 后注入主放大器, 主放大器选用 20/400  $\mu\text{m}$  增益光纤, 采取后向泵浦方式, 实验结构图如图 11 所示, 最终实现功率为 3.01 kW, 线宽为 48 GHz 近衍射极限激光输出, 光束质量因子  $M^2 = 1.17$ <sup>[127]</sup>。2020 年, 该研究团队采用伪随机编码信号 (PRBS) 调制种子激光相位, 搭建四级掺镱光纤放大器, 主放大器选用长度为 7 m、纤芯包层比为 20/400  $\mu\text{m}$  的双包层掺镱光纤, 实现输出功率 1.27 kW、线宽 22 GHz 的窄线宽激光输出, 光束质量因子  $M^2 < 1.2$ <sup>[128]</sup>。

美国空军实验室在伪随机编码 (PRBS) 相位调制方面进行了广泛研究<sup>[129-133]</sup>。2014, 该实验室采用 PRBS 信号

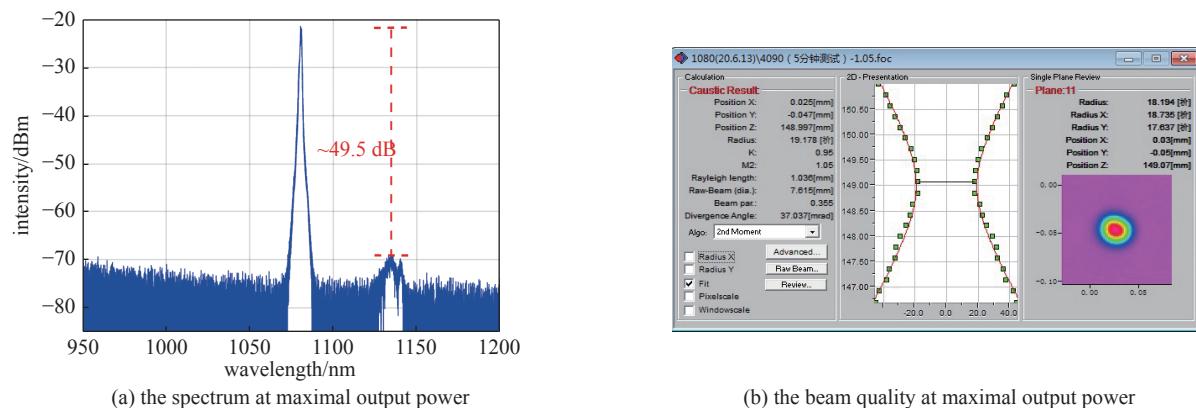


Fig. 9 Experimental results of 4.09 kW narrow linewidth fiber laser based on WNS modulation in NUDT

图 9 国防科技大学基于白噪声相位调制实现 4.09 kW 窄线宽光纤激光实验结果

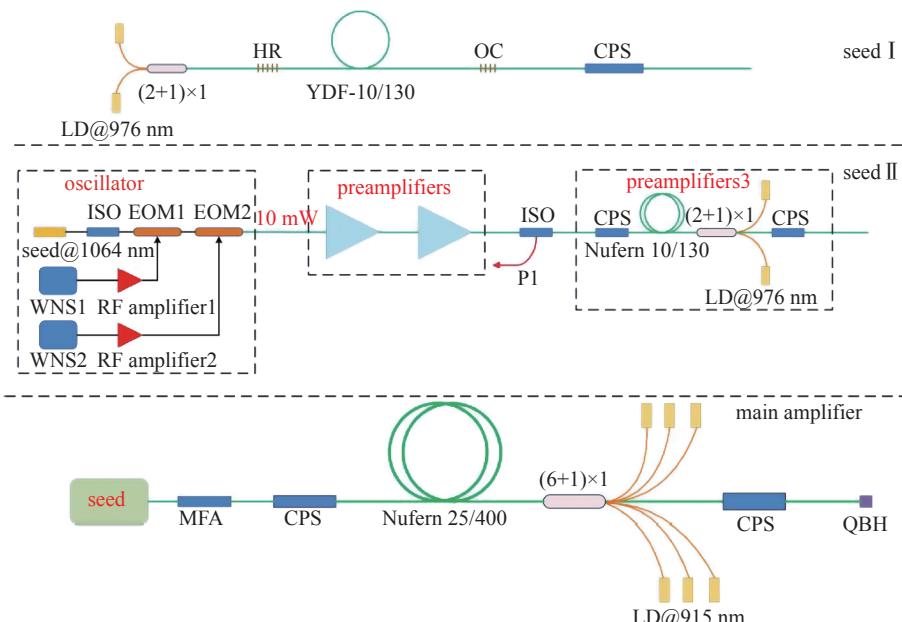


Fig. 10 Schematic of 3.7 kW narrow linewidth fiber laser based on WNS modulation in CAEP (cited from Ref. [126])

图 10 中国工程物理研究院基于白噪声相位调制实现 3.7 kW 窄线宽光纤激光结构示意图<sup>[126]</sup>

对 1064 nm 单频激光进行相位调制，模式数为  $2^5-1$ ，时钟频率为 3 GHz。实验结构如图 12 所示，主放大器采用长度 8 m、纤芯包层比为 25/400  $\mu\text{m}$  非保偏光纤，实现功率 1.17 kW、线宽 3 GHz 激光输出，光束质量因子  $M^2=1.2$ <sup>[129]</sup>。2015 年，该研究团队采用模式数为  $2^6-1$ 、时钟频率为 5 GHz 的 PRBS 信号作为相位调制信号，分别在纤芯包层比为 20/400  $\mu\text{m}$  和 25/400  $\mu\text{m}$  增益光纤中实现 1.47 kW 和 1.48 kW 激光输出，光束质量因子  $M^2<1.1$ 。同时，该研究团队结合 PRBS 相位调制和温度梯度结合的方法抑制 SBS，实现功率 1 kW、线宽 2 GHz 的激光输出<sup>[130]</sup>。2016 年，该研究团队同时采用 1038 nm 种子源和 1064 nm 种子源，分别采用 WNS 信号和 PRBS 信号进行相位调制，利用增益竞争效应提高 SBS 阈值，最终实现功率 1 kW、线宽 2.3 GHz 的激光输出<sup>[132]</sup>。同年，该研究团队还拓展高功率窄线宽光纤激光的输出波长，基于 PRBS 信号

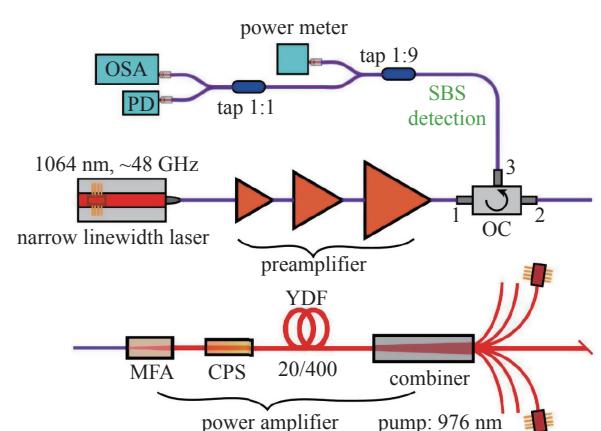


Fig. 11 Schematic of 3.01 kW narrow linewidth fiber laser based on WNS and sine modulation in SIOM (cited from Ref. [127])

图 11 中国科学院上海光学精密机械研究所基于白噪声相位调制和正弦相位调制实现 3.01 kW 窄线宽光纤激光结构示意图<sup>[127]</sup>

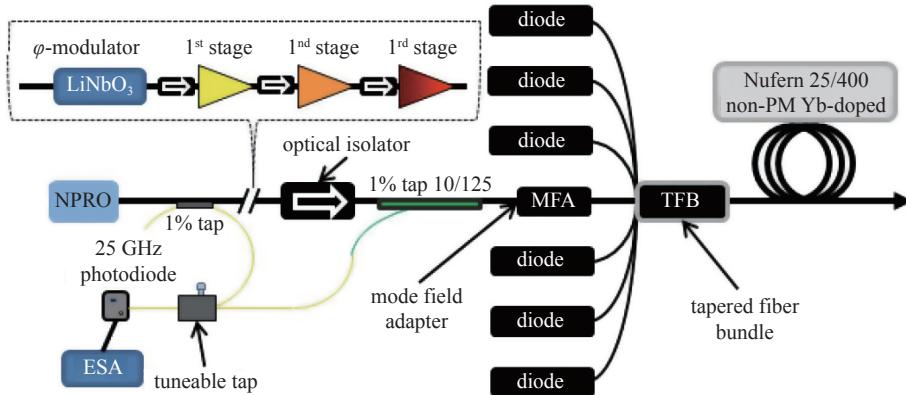


Fig. 12 Schematic of 1.17 kW narrow linewidth fiber laser based on PRBS modulation in AFRL (cited from Ref. [129])

图 12 美国空军实验室基于伪随机编码信号调制实现 1.17 kW 窄线宽光纤激光结构示意图<sup>[129]</sup>

调制在长度 6.4 m、纤芯包层比为 20/400  $\mu\text{m}$  的非保偏增益光纤中实现中心波长为 1034 nm、功率为 1 kW、线宽为 3.5 GHz 的激光输出, 光束质量因子  $M^2=1.1$ 。该研究成果拓展光束合成系统的子单元激光的输出波长, 对于提升合成总功率意义重大<sup>[131]</sup>。

2016 年, 美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室采用 PRBS 相位调制方法展宽单频种子源, 基于自主研发的镀金高掺杂大模场掺镱光纤和双向泵浦的空间耦合结构, 采用偏振控制技术实现功率 3.1 kW、线宽 12 GHz 的线偏振激光输出, 偏振消光比为 10 dB, 中心波长为 1.66 nm, 光束质量因子  $M^2<1.15$ , 实验结构如图 13 所示, 这是目前公开报道的窄线宽线偏振光纤激光的最高输出功率<sup>[23]</sup>。2018 年, 美国密歇根大学采用 PRBS 相位调制技术将单频种子线宽展宽至 20 GHz, 基于大模场掺镱光纤和纤芯手性耦合(Chirally-coupled core)掺镱光纤分别实现了 2.2 kW 和 2.6 kW 激光输出, 光束质量因子  $M^2=1.09$ <sup>[134]</sup>。2020 年, 新加坡国防科技研究院采用时钟频率为 6.9 GHz 的 PRBS 相位调制信号调制单频种子源, 实现输出功率大于 1 kW、输出波长在 1036~1071 nm 范围内可调谐的激光输出, 光束质量因子  $M^2=1.19$ <sup>[135]</sup>。

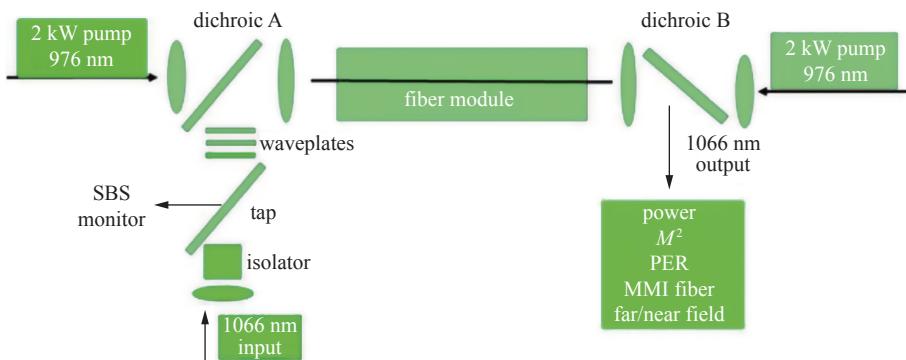


Fig. 13 Schematic of 3.1 kW narrow linewidth linearly polarized fiber laser based on PRBS modulation in MIT (cited from Ref. [23])

图 13 麻省理工学院基于伪随机编码信号调制实现 3.1 kW 窄线宽偏振光纤激光结构示意图<sup>[23]</sup>

此外, 德国耶拿大学基于相位调制种子源取得了一系列研究成果<sup>[26, 136-137]</sup>, 然而并未明确相位调制信号细节。2016 年, 该研究团队基于相位调制将单频外腔半导体激光器展宽至 170 pm 注入到自主研制的芯径 24.5  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.04 的增益光纤中, 采取反向泵浦的空间耦合结构实现 3 kW 的激光输出, 线宽为 45 GHz, 光束质量因子  $M^2=1.3$ , 实验结构如图 14 所示<sup>[136]</sup>。2017 年, 该研究团队设计出纤芯直径 23  $\mu\text{m}$ 、包层直径 460  $\mu\text{m}$  的低数值孔径的增益光纤, 通过相位调制获得 180 pm 的窄线宽种子源, 仍然采用图 12 所示的反向泵浦结构实现 3.5 kW 激光输出, 光束质量因子  $M^2=1.3$ <sup>[137]</sup>。2018 年, 该研究团队进一步通过优化光纤缠绕直径基于上述光纤实现 4.4 kW 单模光纤激光输出, 然而并未明确激光线宽<sup>[26]</sup>。

## 2.2 高功率窄线宽光纤激光整体发展趋势与挑战

在同等线宽条件下提升输出功率或者在不影响输出功率条件下压窄激光线宽是高功率窄线宽光纤激光一直以来追求的目标。随着以上关键技术的发展, 窄线宽光纤激光功率的提升通常不仅仅受到单一受限因素的限制, 而是受到 TMI 和 SBS 等非线性效应的多重抑制。而在抑制 SBS 和 TMI 的过程中存在一定的“矛盾”, 给整体激光

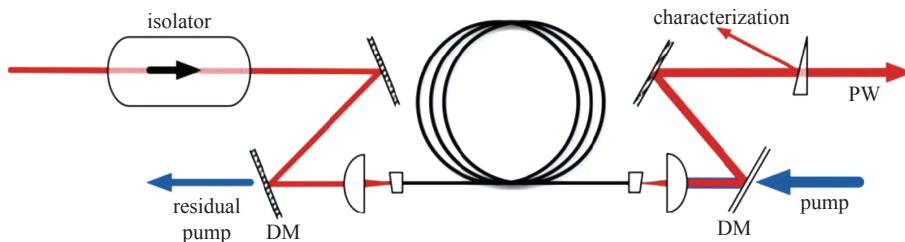


Fig. 14 Schematic of narrow linewidth fiber amplifier obtained by Jena University (cited from Ref. [136])

图 14 耶拿大学窄线宽光纤放大器结构示意图<sup>[136]</sup>

功率提升带来较大困难。例如增大增益光纤的纤芯尺寸可以增大模场面积,有助于提高 SBS 阈值,却容易产生高阶模,不利于抑制 TMI;增大种子激光注入功率,可以有效提高 TMI 阈值,但是不利于抑制主放大器中的 SBS 效应;对于掺镱光纤放大器而言,976 nm 泵浦光具有较好的泵浦吸收系数,有利于提高 SBS 阈值,但是较大的吸收系数会导致上能级粒子束较多,容易激发 TMI 效应。以上抑制 SBS 和 TMI 的“矛盾”之处给窄线宽激光功率的提升带来较大挑战。此外,激光线宽的保持和压窄也面临较大挑战,如上所述,单频激光相位调制由于良好的线宽保持特性而被广泛用于窄线宽放大器的种子源,其深层次原因是单频激光经相位调制后时域特性基本不变,保持稳定状态,因此放大器中自相位调制效应将不会引起光谱展宽效应。而对于多纵模振荡器、宽谱光源滤波、窄线宽半导体激光器等种子光源,其输出激光在时域上均有一定的起伏,因此在放大过程中的自相位调制等非线性效应将引起光场相位起伏,从而引起光谱展宽<sup>[142-144]</sup>。因此,在窄线宽光纤放大器中,如何实现种子源线宽的保持也是其发展过程中面临的较大挑战。

### 3 高功率窄线宽光纤激光的关键技术

#### 3.1 高功率窄线宽光纤激光功率提升的关键技术

如上所述,高功率窄线宽光纤激光的功率提升过程就是不断突破 SBS 和 TMI 阈值的过程,其关键技术即为相应的抑制 SBS 和 TMI 的技术方法。对于 SBS 抑制而言,主要包括增大光纤模场面积<sup>[76, 80-81]</sup>、减小光纤长度<sup>[68, 83]</sup>、优化主放大器泵浦结构<sup>[70, 75]</sup>、引入增益竞争<sup>[80, 132]</sup>、施加温度或应力梯度展宽布里渊增益谱<sup>[73, 77-78]</sup>等技术。除此之外,对基于单频种子相位调制的窄线宽激光器而言,优化相位调制信号也是提升 SBS 阈值的关键。除上述提出的正弦信号、白噪声信号和伪随机编码信号之外,近年来,美国空军实验室提出过滤的 PRBS 信号调制,相比于一般的 PRBS 信号调制和 WNS 信号调制,其提升 SBS 阈值的能力更加突出<sup>[133]</sup>;英国南安普顿大学提出基于非线性算法产生优化信号进行相位调制,从而实现功率提升和线宽压窄之间的最优平衡<sup>[145-146]</sup>;美国马里兰大学提出分段抛物线型信号对单频激光进行相位调制产生矩形光谱,理论计算结果表明该信号在同等线宽下具有更高的 SBS 阈值<sup>[147]</sup>;美国格鲁曼公司提出非线性解调方法抑制 SBS,同时施加强度调制和相位调制,先将激光能量分担至边带光谱以减弱 SBS 效应,然后利用自相位调制效应压窄激光线宽<sup>[148]</sup>。由此可见,探索更优的相位调制信号实现光谱优化是提升窄线宽光纤激光器 SBS 阈值的热点途径。

而对于抑制 TMI 的关键技术,可以从优化种子激光、优化泵浦激光和优化主放大器光纤参数等三个方面概括:优化种子激光包括增加种子激光功率<sup>[149-150]</sup>、增加种子激光线宽<sup>[151]</sup>、选择发射截面更大的种子激光波长<sup>[152-153]</sup>等技术;优化泵浦激光包括采取后向或双向泵浦结构方式<sup>[154]</sup>、采取 915 nm 激光泵浦、同带泵浦等技术<sup>[155-157]</sup>;优化主放大器光纤参数包括减小纤芯包层比<sup>[158]</sup>、减小数值孔径<sup>[159]</sup>、减弱光子暗化<sup>[160-161]</sup>、增大高阶模损耗等技术<sup>[162]</sup>。

从窄线宽光纤激光的功率提升进程来看,研发新型特殊结构的增益光纤往往具有良好的 SBS 和 TMI 抑制效果。其中包括声场裁剪光纤、光子带隙光纤、镀金大模场掺杂光纤、纤芯手性耦合光纤、长锥形光纤等。2014 年美国空军实验室采用声场裁剪光子晶体光纤减弱光纤里声场与光场相互作用,结合温度梯度抑制 SBS,同时其特殊结构可减少泵浦吸收,提升 TMI 阈值,最终实现 811W 单频光纤激光输出<sup>[73]</sup>。2015 年,该研究团队基于全固态大模场光子带隙光纤搭建光纤放大器,其特殊结构可将高阶模激光泄出光纤以增加 TMI 阈值,最终实现 400 W 单频近衍射极限光纤激光输出<sup>[163]</sup>。2016 年,美国麻省理工学院自主研发出镀金大模场掺杂光纤,极大提高系统热管理能力,实现 3.1 kW 线偏振窄线宽激光输出<sup>[23]</sup>。2018 年,美国密歇根大学比较纤芯手性耦合光纤与同等纤芯尺寸的传统大模场光纤的抑制 TMI 的能力,实验中发现纤芯手性耦合光纤具有更高的 TMI 阈值<sup>[134]</sup>。2020 年,德国汉诺威激光中心也基于纤芯手性耦合光纤实现 100 W 线偏振单频基模光纤激光输出<sup>[164]</sup>。而长锥形光纤也由于锥形结

构可以使光束在传输过程中保持较好光束质量，同时锥形结构可引起 SBS 频移以展宽 SBS 增益谱，具有较高 SBS 阈值，近年来也受到广泛关注<sup>[165-167]</sup>。

### 3.2 高功率窄线宽光纤激光线宽压窄的关键技术

如上所述，在不影响输出功率前提下压窄激光线宽也是高功率窄线宽光纤激光的发展趋势。激光线宽压窄可以从种子源线宽压窄和放大器线宽压窄两方面来分析。种子源线宽压窄方法主要包括基于 SBS 效应压窄线宽<sup>[168-171]</sup>、基于瑞利散射效应(RBS)压窄线宽<sup>[172-174]</sup>、基于虚拟折叠环形腔结构压窄线宽<sup>[175-176]</sup>、利用慢光效应压窄线宽<sup>[176-178]</sup>、自注入锁模技术压窄线宽<sup>[179-180]</sup>等方法。虽然 SBS 效应是窄线宽光纤激光功率提升的受限因素，但相关研究表明 SBS 效应的 Stokes 光线宽比泵浦光线宽窄几个数量级<sup>[169]</sup>。在掺铒布里渊光纤激光器中，线宽 20 MHz 的泵浦光利用 SBS 效应可实现 40 Hz 的超窄线宽输出<sup>[170]</sup>。类似的，瑞利散射效应同样由于其 kHz 量级的散射带宽而被用于产生窄线宽激光输出，为了防止激发 SBS 效应，基于 RBS 光纤激光器通常采用锥形光纤等特殊光纤结构<sup>[172, 174]</sup>。而在 2017 年，重庆大学同时利用 SBS 和 RBS 压窄激光线宽，实现线宽 75 Hz、抑制比为 70 dB 的激光输出<sup>[171]</sup>。2014 年，华南理工大学提出虚拟折叠环形腔结构的方案，通过在腔内熔接一段保偏光纤延迟偏振态的传输消除空间烧孔，获得 820 Hz 的单频激光输出<sup>[175]</sup>。同年，上海光机所提出在激光腔内加入慢光装置提高腔内光子寿命，将长延时的光纤环作为反射腔镜实现 150 Hz 的单频激光输出<sup>[177]</sup>。而后，华南理工大学课题组将虚拟折叠环形腔与慢光腔相结合，在环形腔内熔接基于 FBG 的 Fabry-Perot 滤波器来引入慢光效应，实现线宽 600 Hz 的单频输出<sup>[176]</sup>。然而，虚拟折叠环形腔和慢光装置的引入增加激光系统的复杂性，对激光系统的搭建带来较大难度。最后，利用光学反馈的方式将激光自注入锁定到谐振腔可实现线宽压窄。2016 年，华南理工大学课题组利用自注入锁模技术在 101 m 长延时光纤中实现 200 Hz 单频激光输出<sup>[179]</sup>。另外自注入锁模技术还可以结合受激瑞利散射来实现超窄线宽单频激光输出<sup>[180]</sup>。放大器线宽压窄主要通过种子源预调制方式实现，如上所述，美国格鲁曼公司通过对种子激光同时进行强度调制和相位调制展宽激光光谱，在放大过程中由于自相位调制效应可压缩输出激光线宽<sup>[148]</sup>。

### 3.3 多模光纤中的 SBS 理论模型

随着窄线宽高功率光纤激光器的发展，SBS 成为其功率提升的首要因素，大模场的多模光纤被广泛用于窄线宽光纤放大器来提升 SBS 阈值，为进一步拓展功率提升的空间，多模光纤中的 SBS 效应的动态过程和布里渊增益谱特性受到广泛研究<sup>[181-183]</sup>。目前已建立的精确的三波耦合模型可以很好地描述单模光纤中 SBS 动力学特性<sup>[184]</sup>，而对于多模光纤的 SBS 而言，还需额外考虑光纤本身具有的波导特性对于声波和光波模式的影响，光波场和声波场在多模光纤中均是以多个不同的本征模式叠加存在，需要考虑不同光声模式的相互耦合作用。值得一提的是，近年来，国内的 Weiwei Ke 等人提出描述多模光纤内 SBS 的稳态模型，考虑不同光波模式之间的耦合效应以及不同声波和光波模式分布对布里渊增益谱分布的影响，给出不同模式组合下的布里渊增益谱分布，与实验结构吻合较好<sup>[182]</sup>。而国防科技大学课题组建立了能够描述多模光纤内 SBS 一般动力学特性的理论模型，该模型考虑多模光纤的波导特性对光声模场分布的影响以及不同光声模式之间的耦合。此外，该模型还考虑了群速度色散、自相位调制和交叉相位调制等非线性效应，在应用于多模增益光纤过程中还考虑由于增益空间饱和而引起的模式竞争效应<sup>[183]</sup>。以上多模光纤中的 SBS 模型的提出可以准确分析高功率状态下大模场增益光纤中 SBS 的动力学过程，对于高功率窄线宽光纤放大器的设计和提升 SBS 阈值具有重要理论指导意义。

## 4 高功率窄线宽光纤激光器的应用

### 4.1 频率变换

目前，常见的光纤激光器输出波长大多集中在近红外波段，通过非线性频率转换技术可有效扩展激光的波长范围。而高功率窄线宽激光源是常见的非线性频率转换晶体的泵浦源，通常泵浦源功率越高、线宽越窄，转换效率就越高。在获得可见光方面，如图 15 所示，1064 nm 的单频光纤激光通过 KTP 倍频晶体或者 MgO:sPPLT 晶体等非线性晶体进行频率转换后可获得 532 nm 的激光<sup>[11]</sup>，该波段激光可用于泵浦高功率钛宝石激光器<sup>[185-186]</sup>。此外，1178 nm 的窄线宽光纤激光倍频后可获得 589 nm 的黄光，可用作天文观测系统的钠信标光源<sup>[187-188]</sup>；1540 nm 的窄线宽光纤激光通过硼酸锂晶体倍频后产生 770 nm 激光，1560 nm 的窄线宽光纤激光通过 MgO:PPLN 晶体倍频后可产生 780 nm 激光，该波段激光可用作激光冷却、原子捕获等<sup>[189-190]</sup>。

在获得中红外激光方面，一般采用光参量振荡器来获得宽带可调谐、新波段激光系统，图 16 展示一个基于四腔镜环形腔的单谐振光参量振荡器的实验结构图，采用窄线宽光纤激光泵浦 MgO: PPLN 晶体，通过对泵浦光波长

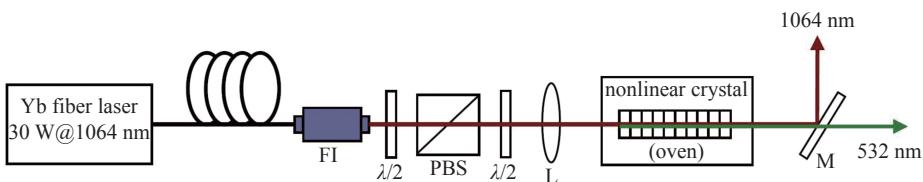


Fig. 15 Schematic of nonlinear frequency transformation of single-frequency fiber laser from 1064 nm to 532 nm (cited from Ref. [11])

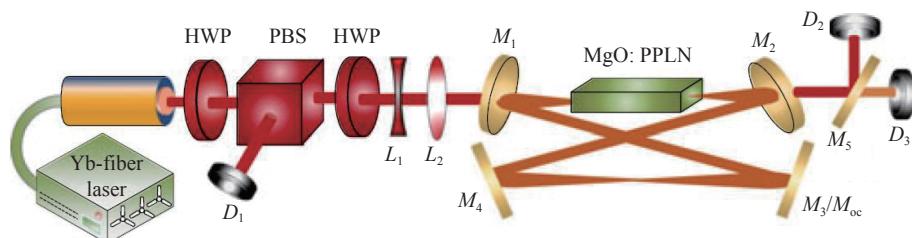
图 15 1064 nm 单频光纤激光通过非线性晶体转换产生 532 nm 单频光纤激光结构示意图<sup>[11]</sup>

Fig. 16 Experiment setup for four mirror ring cavity single resonant optical parametric oscillator (cited from Ref. [191])

图 16 四腔镜环形腔单谐振光参量振荡腔的实验结构图<sup>[191]</sup>

进行调谐, 可实现 3761~3970 nm 光谱范围的激光输出<sup>[191]</sup>。近年来, 特殊波长窄线宽光纤激光输出功率也得到了显著提升<sup>[192-193]</sup>, 有望为频率变换提供新的泵浦工具, 进一步拓宽变频激光的波长覆盖范围。

#### 4.2 光束合成

尽管目前单路光纤激光已经实现单模 20 kW 高功率输出, 但单路光纤激光器的功率提升存在理论极限<sup>[28]</sup>。为实现更高功率的激光输出, 构建模块化光纤激光阵列, 然后对阵列光束进行光束合成是理想的解决方案。考虑到光束合成系统的稳定性、复杂性和合成效率, 单路光纤激光的线宽应尽可能窄, 因此高功率窄线宽光纤激光是理想的合成子光源。光束合成主要包括相干合成和光谱合成, 目前国内外多家单位对窄线宽光纤激光相干合成和光谱合成进行了研究, 获得数 kW 级高功率输出<sup>[19, 194-206]</sup>。

相干合成根据孔径填充的方式可分为共孔径相干合成和分孔径相干合成, 图 17 展示两种相干合成方法的结构示意图, 光束经共孔径相干合成后输出光束光轴完全重合, 而分孔径相干合成后的光束仍是多个独立口径的光束, 各个孔径间通过相位锁定, 在近场获得稳定相位差, 在远场获得稳定干涉。通过对 32 路窄线宽掺镱光纤激光进行相干合成, 以色列 Civan 先进技术公司实现了 16 kW 高功率光纤激光输出<sup>[196]</sup>。

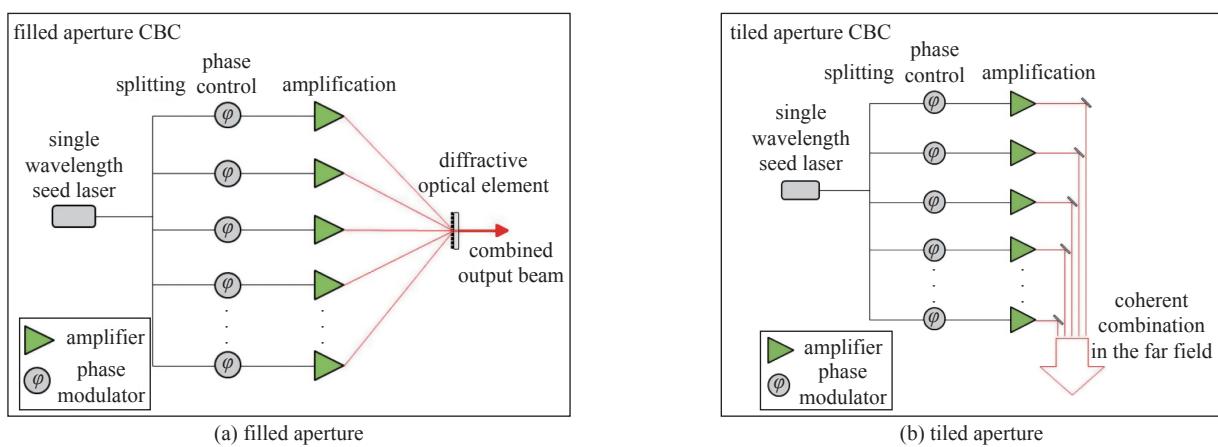


Fig. 17 Schematic of filled aperture coherent beam combining (CBC) and tiled aperture CBC (cited from Ref. [196])

图 17 共孔径和分孔径相干合成示意图<sup>[196]</sup>

光谱合成是通过光栅等色散元件使不同入射方向的单元激光束在空间重叠, 实现高功率输出。图 18 展示中国科学院上海光学精密机械研究所通过对 8 路单元光束进行光谱合成实现 10.8 kW 高功率输出的系统结构图, 可以看出光谱合成的核心元件为系统中的色散元件, 图 18 的合成系统中即为多层电介质衍射光栅 (MLD grating)。此外, 美国洛克希德马丁公司通过对窄线宽光纤激光进行光谱合成实现了 30 kW 激光输出<sup>[200]</sup>。

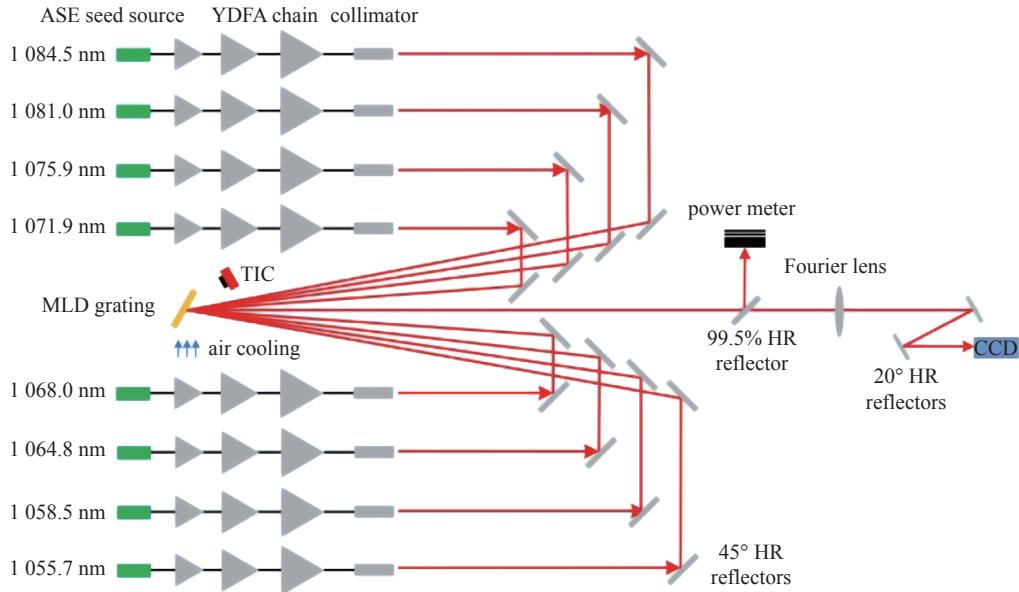
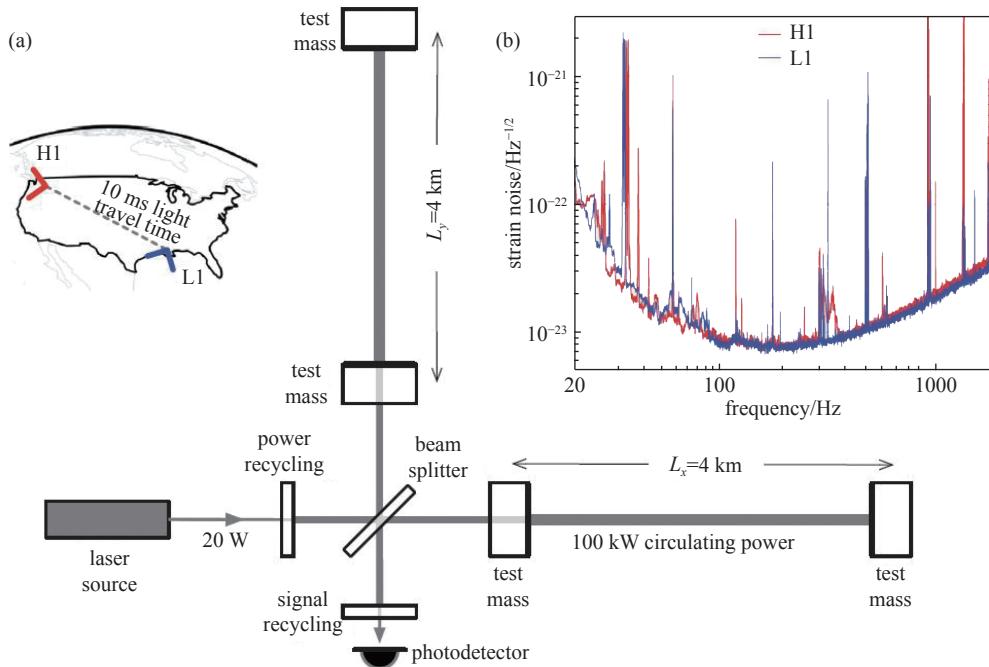


Fig. 18 Schematic of 10.8 kW spectra beam combining in SIOM (cited from Ref. [201])

图 18 中国科学院上海光学精密机械研究所 10.8 kW 光谱合成结构原理图<sup>[201]</sup>

### 4.3 相干探测

高功率单频光纤激光由于其良好的时间相干性,在相干探测比如引力波探测和相干雷达等领域发挥至关重要的作用。2016年,基于1064 nm固体单频激光的引力波探测装置LIGO首次成功探测到宇宙引力波<sup>[13]</sup>,其探测装置图如图19所示,可以看出,高功率、低噪声单频激光源是提高引力波探测装置灵敏度的关键<sup>[14]</sup>。当前,研究人员对低噪声、高功率、高光束质量的单频光纤激光进行深入的研究,旨在为下一代引力波探测装置提供核心探测光源<sup>[82-83]</sup>。



inset (a): location and orientation of the LIGO detectors at Hanford, WA (H1) and Livingston, LA (L1);

inset (b): the instrument noise for each detector near the time of the signal detection

Fig. 19 Simplified diagram of an advanced LIGO detector (not to scale)(cited from Ref. [13])

图 19 LIGO 探测器简化示意图<sup>[13]</sup>

激光雷达以激光为载体,结合光电探测技术,广泛用于测速、测距等场合<sup>[207-208]</sup>。与微波雷达相比,激光雷达具有指向性好、带宽大、精度高、实现无损伤探测等优势。具有良好相干性的光纤激光光源是激光雷达的基础,一般激光雷达采用单频激光作为相干光源<sup>[209]</sup>,为提升激光雷达的灵敏度和分辨率,也常采用双频激光作为相干光源<sup>[17]</sup>,

为了提高激光雷达的空间分辨率和探测距离,对单频光纤激光的光束质量也有较高要求。

## 5 结 论

综上所述,单频光纤振荡器的波长范围已实现1, 1.5, 2 μm波段的宽范围输出,进一步的波段拓展可采用频率转换、非线性效应频移等技术。单频连续光纤激光器最高输出功率可达811 W,其采用的是空间耦合结构,而基于全光纤结构的单频光纤激光器最高输出功率为550 W。为进一步拓展在引力波探测等领域的应用,单频光纤激光器需突破kW大关,并保持低噪声输出。因此探索低噪声、高功率单频光纤激光器成为光纤激光领域研究热点。目前,窄线宽(小于1 nm)光纤激光器的最高输出功率可达4.09 kW,其3 dB线宽约为0.9 nm,而kW级窄线宽光纤激光器线宽最窄可达2 GHz。然而进一步提升功率、压窄线宽将面临严重的TMI效应和SBS等非线性效应多重抑制等挑战,同时光谱评价也是当下窄线宽光纤激光需解决的问题。通过同时考虑TMI效应和SBS等非线性效应的抑制,窄线宽光纤激光器将不断向着更高功率、更窄线宽的方向发展,为频率转换、光束合成、相干探测等领域提供优质光源,使得光纤激光器的应用价值进一步提升。

## 参考文献:

- [1] Snitzer E. Proposed fiber cavities for optical masers[J]. *J Appl Phys*, 1961, 32(1): 36-39.
- [2] Koester C J, Snitzer E. Amplification in a fiber laser[J]. *Appl Opt*, 1964, 3(10): 1182-1186.
- [3] Stone J, Burrus C A. Neodymium-doped silica lasers in end-pumped fiber geometry[J]. *Appl Phys Lett*, 1973, 23(7): 388-389.
- [4] Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Double-clad offset core Nd fiber laser[C]//Optical Fiber Sensor Conference. 1989, PD5: 533-536.
- [5] Shi W, Fang Q, Zhu X, et al. Fiber lasers and their applications[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(28): 6554.
- [6] 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 laser: 30 years of developments[J]. *Scientia Sinica Tech*, 2020, 50(2): 123-135)
- [7] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nat Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [8] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: A review[J]. *IEEE J Sel Top Quant*, 2014, 20(5): 219-241.
- [9] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. 2013: AF2J.
- [10] IPG Photonics. IPG set to ship 100 kW laser[DB/OL]. <http://optics.org/news/3/10/44>.
- [11] Kumar S C, Samanta G K, Ebrahim-Zadeh M. High-power, single-frequency, continuous-wave second-harmonic-generation of ytterbium fiber laser in PPKTP and MgO:sPPLT[J]. *Opt Express*, 2009, 17(16): 13711-13726.
- [12] Henderson A, Stafford R. Low threshold, singly-resonant CW OPO pumped by an all-fiber pump source[J]. *Opt Express*, 2006, 14(2): 767.
- [13] Abbott B P. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 061102.
- [14] Steinke M, Tunnermann H, Kuhn V, et al. Single-frequency fiber amplifiers for next-generation gravitational wave detectors[J]. *IEEE J Sel Top Quant*, 2018, 24: 3100613.
- [15] Buikema A, Jose F, Augst S J, et al. Narrow-linewidth fiber amplifier for gravitational-wave detectors[J]. *Opt Lett*, 2019, 44(15): 3833.
- [16] Cariou J, Augere B, Valla M. Laser source requirements for coherent lidars based on fiber technology[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2006, 7(2): 213-223.
- [17] Diaz R, Chan S, Liu J. Lidar detection using a dual-frequency source[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(24): 3600.
- [18] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J Sel Top Quant*, 2005, 11(3): 567-577.
- [19] Liu Z, Ma P, Su R, et al. High-power coherent beam polarization combination of fiber lasers: progress and prospect[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A7.
- [20] Loftus T H, Thomas A M, Hoffman P R, et al. Spectrally beam-combined fiber lasers for high-average-power applications[J]. *IEEE J Sel Top Quant*, 2007, 13(3): 487-497.
- [21] 郑也, 李磐, 朱占达, 等. 高功率窄线宽光纤激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55: 080002. (Zheng Ye, Li Pan, Zhu Zhanda, et al. Progress in high-power narrow-linewidth fiber lasers[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2018, 55: 080002)
- [22] 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 Phys Lett*, 2020, 17: 075101.
- [23] Yu C X, Shatrov O, Fan T Y, et al. Diode-pumped narrow linewidth multi-kilowatt metalized Yb fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2016, 41(22): 5202.
- [24] Ma P, Xiao H, Meng D, 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, 6: e57.
- [25] Qi Y, Yang Y, Shen H, 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.
- [26] Beier F, Moller F, Sattler B, et al. Experimental investigations on the TMI thresholds of low-NA Yb-doped single-mode fibers[J]. *Opt Lett*, 2018, 43(6): 1291-1294.
- [27] Platonov N, Yagodkin R, De La Cruz J, 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.
- [28] 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]. *Opt Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [29] Kobyakov A, Sauer M, Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Adv Opt Photonics*, 2010, 2(1): 1.
- [30] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, et al. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2011, 19(14): 13218.
- [31] Jauregui C, Stihler C, Limpert J. Transverse mode instability[J]. *Adv Opt Photonics*, 2020, 12(2): 429.
- [32] Zervas M N. Transverse mode instability, thermal lensing and power scaling in Yb<sup>3+</sup>-doped high-power fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2019, 27(13): 19019.
- [33] Zhu S, Li J, Li L, et al. Mode instabilities in Yb:YAG crystalline fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2019, 27(24): 35065.
- [34] Tao R, Wang X, Zhou P. Comprehensive theoretical study of mode instability in high-power fiber lasers by employing a universal model and its implications[J]. *IEEE J Sel Top Quant*, 2018, 24: 0903319.
- [35] Fu S, Shi W, Feng Y, et al. Review of recent progress on single-frequency fiber lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A49.
- [36] 杨中民, 徐善辉. 单频光纤激光器[M]. 北京: 科学出版社, 2017. (Yang Zhongmin, Xu Shanhui. Single frequency fiber lasers[M]. Beijing: Science Press, 2017)
- [37] Jiang Man, Zhou Pu, Gu Xijia, et al. Ultralong  $\pi$ -phase shift fiber Bragg grating empowered single longitudinal mode DFB phosphate fiber laser with low-threshold and high-efficiency[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 13131.
- [38] Babin S A, Churkin D V, Ismagulov A E, et al. Single frequency single polarization DFB fiber laser[J]. *Laser Phys Lett*, 2007, 4(6): 428-432.
- [39] Geng J, Wu J, Jiang S. Efficient single-frequency thulium doped fiber laser near 2- $\mu\text{m}$ [C]//Advanced Solid-State Lasers. 2007: WE4.
- [40] Schülzgen A, Li L, Nguyen D, et al. Distributed feedback fiber laser pumped by multimode laser diodes[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(6): 614.
- [41] Geng J, Wang Q, Luo T, et al. Single-frequency narrow-linewidth Tm-doped fiber laser using silicate glass fiber[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(22): 3493.
- [42] Zhu X, Shi W, Zong J, et al. 976 nm single-frequency distributed Bragg reflector fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(20): 4167.
- [43] Liu Z, Xie Y, Cong Z, et al. 110 mW single-frequency Yb:YAG crystal-derived silica fiber laser at 1064 nm[J]. *Opt Lett*, 2019, 44(17): 4307-4310.
- [44] Wang Y, Wu J, Zhao Q, et al. Single-frequency DBR Nd-doped fiber laser at 1120 nm with a narrow linewidth and low threshold[J]. *Opt Lett*, 2020, 45(8): 2263.
- [45] Schülzgen A, Li L, Temyanko V L, et al. Single-frequency fiber oscillator with watt-level output power using photonic crystal phosphate glass fiber[J]. *Opt Express*, 2006, 14(16): 7087.
- [46] Guan X, Yang C, Qiao T, et al. High-efficiency sub-watt in-band-pumped single-frequency DBR Tm<sup>3+</sup>-doped germanate fiber laser at 1950 nm[J]. *Opt Express*, 2018, 26(6): 6817.
- [47] Slimen F B, Chen S, Lousteau J, et al. Highly efficient Tm<sup>3+</sup>-doped germanate large mode area single mode fiber laser[J]. *Opt Mater Express*, 2019, 9(10): 4115.
- [48] Park N, Dawson J W, Vahala K J, et al. All fiber, low threshold, widely tunable single-frequency, erbium-doped fiber ring laser with a tandem fiber Fabry–Perot filter[J]. *Appl Phys Lett*, 1991, 59(19): 2369-2371.
- [49] Gloag A, Langford N, McCallion K, et al. Continuously tunable single-frequency erbium ring fiber laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1996, 13(5): 921.
- [50] Zhang X, Zhu N H, Xie L, et al. A stabilized and tunable single-frequency erbium-doped fiber ring laser employing external injection locking[J]. *J Lightwave Technol*, 2007, 25(4): 1027-1033.
- [51] Cheng X P, Shum P, Tse C H, et al. Single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser based on high finesse fiber Bragg grating Fabry—Perot etalon[J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2008, 20(12): 976-978.
- [52] Yin T, Song Y, Jiang X, et al. 400 mW narrow linewidth single-frequency fiber ring cavity laser in 2  $\mu\text{m}$  waveband[J]. *Opt Express*, 2019, 27(11): 15794.
- [53] Xu S, Yang Z, Zhang W, et al. 400 mW ultrashort cavity low-noise single-frequency Yb<sup>(3)K+</sup>-doped phosphate fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(18): 3708-3710.
- [54] Hofmann P, Voigtlander C, Nolte S, et al. 550-mW output power from a narrow linewidth all-phosphate fiber laser[J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(5): 756-760.
- [55] Kurkov A S. Oscillation spectral range of Yb-doped fiber lasers[J]. *Laser Phys Lett*, 2007, 4(2): 93-102.
- [56] Zhou P, Wang X, Xiao H, et al. Review on recent progress on yb doped fiber laser in a variety of oscillation spectral ranges 1[J]. *Laser Phys*, 2012, 22(5): 823-831.
- [57] Kaneda Y, Spiegelberg C, Geng J, et al. 200-mW, narrow-linewidth 1064.2-nm Yb-doped fiber laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. 2004, CThO3, 1-2.
- [58] Mo S, Xu S, Huang X, et al. A 1014 nm linearly polarized low noise narrow-linewidth single-frequency fiber laser[J]. *Opt Express*, 2013, 21(10): 12419.
- [59] Xu S, Li C, Zhang W, et al. Low noise single-frequency single-polarization ytterbium-doped phosphate fiber laser at 1083 nm[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(4): 501.
- [60] Yang C, Zhao Q, Feng Z, et al. 1120 nm kHz-linewidth single-polarization single-frequency Yb-doped phosphate fiber laser[J]. *Opt Express*, 2016, 24(26): 29794.
- [61] Pan Zhengqing, Cai Haiwen, Meng Li, et al. Single-frequency phosphate glass fiber laser with 100-mW output power at 1535 nm and its polarization

- characteristics[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(1): 52-54.
- [62] Xu S H, Yang Z M, Liu T, et al. An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at 1.5 mm[J]. *Opt Express*, 2010, 18(2): 1249-1254.
- [63] Fu S, Shi W, Sheng Q, et al. Compact hundred-mW 2  $\mu\text{m}$  single-frequency thulium-doped silica fiber laser[J]. *IEEE Photo Tech Lett*, 2017, 29(11): 853-856.
- [64] Spiegelberg C, Geng J, Hu Y, et al. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm (June 2003)[J]. *J Lightwave Technol*, 2004, 22(1): 57-62.
- [65] Qiu T, Suzuki S, Schülzgen A, et al. Generation of Watt-level single-longitudinal-mode output from cladding-pumped short fiber lasers[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(20): 2748.
- [66] Polynkin P, Polynkin A, Mansuripur M, et al. Single-frequency laser oscillator with watts-level output power at 1.5 microm by use of a twisted-mode technique[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(20): 2745-2747.
- [67] Ball G A, Holton C E, Hull-Allen G, et al. 60 mW 1.5  $\mu\text{m}$  single-frequency low-noise fiber laser MOPA[J]. *IEEE Photonic Tech L*, 1994, 6(2): 192-194.
- [68] Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, et al. Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier source with 264 W of output power[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(5): 459.
- [69] Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, et al. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W[J]. *IEEE J Sel Top Quant*, 2007, 13(3): 546-551.
- [70] Gray S, Liu A, Walton D T, et al. 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier[J]. *Opt Express*, 2007, 15(25): 17044-17050.
- [71] Zhu C, Hu I, Ma X, et al. Single-frequency and single-transverse mode Yb-doped CCC fiber MOPA with robust polarization SBS-free 511W output[C]. OSA/ASSP, 2011, AMC5, 1-3.
- [72] Robin C, Dajani I, Chiragh F. Experimental studies of segmented acoustically tailored photonic crystal fiber amplifier with 494 W single-frequency output[C]//Proc of SPIE. 2011, 79140B.
- [73] Robin C, Dajani I, Pulford B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811 W output power[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(3): 666.
- [74] Mermelstein M D, Brar K, Andrejco M J, et al. All-fiber 194 W single-frequency single-mode Yb-doped master-oscillator power-amplifier[C]//Proc of SPIE. 2008: 68730L.
- [75] Theeg T, Sayinc H, Neumann J, et al. All-fiber counter-propagation pumped single frequency amplifier stage with 300-W output power[J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2012, 24(20): 1864-1867.
- [76] Ma P, Zhou P, Ma Y, et al. Single-frequency 332 W, linearly polarized Yb-doped all-fiber amplifier with near diffraction-limited beam quality[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(20): 4854.
- [77] Zhang L, Cui S, Liu C, et al. 170 W, single-frequency, single-mode, linearly-polarized, Yb-doped all-fiber amplifier[J]. *Opt Express*, 2013, 21(5): 5456-5462.
- [78] Huang L, Wu H, Li R, et al. 414 W near-diffraction-limited all-fiberized single-frequency polarization-maintained fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2017, 42(1): 1-4.
- [79] 来文昌, 马鹏飞, 刘伟, 等. 全光纤单频光纤放大器实现550W近衍射极限输出[J]. *中国激光*, 2020, 47: 0415001. (Lai Wenchang, Ma Pengfei, Liu Wei, et al. 550 W single-frequency all-fiber amplifier with near-diffraction-limited beam quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47: 0415001)
- [80] Zeringue C, Vergien C, Dajani I. Pump-limited, 203 W, single-frequency monolithic fiber amplifier based on laser gain competition[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(5): 618-620.
- [81] Wang X L, Zhou P, Xiao H, et al. 310 W single-frequency all-fiber laser in master oscillator power amplification configuration[J]. *Laser Phys Lett*, 2012, 9(8): 591-595.
- [82] Wellmann F, Steinke M, Meylahn F, et al. High power, single-frequency, monolithic fiber amplifier for the next generation of gravitational wave detectors[J]. *Opt Express*, 2019, 27(20): 28523.
- [83] Dixneuf C, Guiraud G, Bardin Y, et al. Ultra-low intensity noise, all fiber 365 W linearly polarized single frequency laser at 1064 nm[J]. *Opt Express*, 2020, 28(8): 10960.
- [84] Creeden D, Pretorius H, Limongelli J, et al. Single frequency 1560 nm Er: Yb fiber amplifier with 207W output power and 50.5% slope efficiency[C]//Proc of SPIE. 2015: 97282L.
- [85] De Varona O, Fittkau W, Booker P, et al. Single-frequency fiber amplifier at 1.5 microm with 100 W in the linearly-polarized TEM<sub>00</sub> mode for next-generation gravitational wave detectors[J]. *Opt Express*, 2017, 25(21): 24880-24892.
- [86] Goodno G D, Book L D, Rothenberg J E. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(8): 1204.
- [87] Wang X, Zhou P, Wang X, et al. 102 W monolithic single frequency Tm-doped fiber MOPA[J]. *Opt Express*, 2013, 21(26): 32386.
- [88] Wang X, Jin X, Wu W, et al. 310-W single frequency Tm-doped all-fiber MOPA[J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2015, 27(6): 677-680.
- [89] Liu J, Shi H, Liu K, et al. 210 W single-frequency, single-polarization, thulium-doped all-fiber MOPA[J]. *Opt Express*, 2014, 22(11): 13572.
- [90] Guan X, Yang C, Gu Q, et al. 55 W kilohertz-linewidth core- and in-band-pumped linearly polarized single-frequency fiber laser at 1950 nm[J]. *Opt Lett*, 2020, 45(8): 2343-2346.
- [91] Tokita S, Murakami M, Shimizu S, et al. Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(20): 3062.
- [92] Mollaee M, Zhu X, Zong J, et al. Single-frequency blue laser fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2018, 43(3): 423.

- [93] Zhu X, Zong J, Miller A, et al. Single-frequency Ho<sup>(3+)</sup>-doped ZBLAN fiber laser at 1200 nm[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(20): 4185-4187.
- [94] Hudson D D, Williams R J, Withford M J, et al. Single-frequency fiber laser operating at 2.9 μm[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(14): 2388-2390.
- [95] Shaw L B, Cole B, Thielen P A, et al. Mid-wave IR and long-wave IR laser potential of rare-earth doped chalcogenide glass fiber[J]. *IEEE J Quantum Elect*, 2001, 37(9): 1127-1137.
- [96] Quimby R S, Shaw L B, Sanghera J S, et al. Modeling of cascade lasing in Dy: chalcogenide glass fiber laser with efficient output at 4.5 mm[J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2008, 20(2): 123-125.
- [97] Loranger S, Karpov V, Schinn G W, et al. Single-frequency low-threshold linearly polarized DFB Raman fiber lasers[J]. *Opt Lett*, 2017, 42(19): 3864.
- [98] Jiang S, Guo C, Che K, et al. Visible Raman and Brillouin lasers from a microresonator/ZBLAN-fiber hybrid system[J]. *Photonics Res*, 2019, 7(5): 566.
- [99] Peng C, Liang X, Liu R, et al. High-precision active synchronization control of high-power, tiled-aperture coherent beam combining[J]. *Opt Lett*, 2017, 42(19): 3960.
- [100] Muller M, Klenke A, Steinkopff A, et al. 3.5 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2018, 43(24): 6037-6040.
- [101] Loftus T H, Liu A, Hoffman P R, et al. 522 W average power, spectrally beam-combined fiber laser with near-diffraction-limited beam quality[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(4): 349-351.
- [102] Schmidt O, Wirth C, Nodop D, et al. Spectral beam combination of fiber amplified ns-pulses by means of interference filters[J]. *Opt Express*, 2009, 17(25): 22974-22982.
- [103] Wirth C, Schmidt O, Tsypin I, et al. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(16): 3118-3120.
- [104] White J O, Harfouche M, Edgecumbe J, et al. 1.6 kW Yb fiber amplifier using chirped seed amplification for stimulated Brillouin scattering suppression[J]. *Appl Opt*, 2017, 56(3): B116-B122.
- [105] 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]. *Appl Opt*, 2019, 58(23): 6251-6256.
- [106] Xu Y, Fang Q, Qin Y, et al. 2 kW narrow spectral width monolithic continuous wave in a near-diffraction-limited fiber laser[J]. *Appl Opt*, 2015, 54(32): 9419.
- [107] Huang Z, Liang X, Li C, et al. Spectral broadening in high-power Yb-doped fiber lasers employing narrow-linewidth multilongitudinal-mode oscillators[J]. *Appl Opt*, 2016, 55(2): 297.
- [108] Wang Y, Feng Y, Wang X, et al. 6.5 GHz linearly polarized kilowatt fiber amplifier based on active polarization control[J]. *Appl Opt*, 2017, 56(10): 2760-2765.
- [109] 王岩山, 王珏, 常哲, 等. 基于简单MOPA结构实现3.08kW全光纤窄线宽线偏振激光输出[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 011004. (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: 011004)
- [110] 楚秋慧, 舒强, 林宏奂, 等. 窄线宽光纤激光器在1 030 nm波段实现3 kW近衍射极限输出[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 011005. (Chu Qiuwei, Shu Qiang, Lin Honghuan, et al. All-fiber narrow linewidth fiber laser achieved 3 kW near diffraction limited output at 1 030 nm[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 011005)
- [111] Yan P, Huang Y, Sun J, et al. 3.1 kW monolithic MOPA configuration fibre laser bidirectionally pumped by non-wavelength-stabilized laser diodes[J]. *Laser Phys Lett*, 2017, 14: 080001.
- [112] Huang Y, Yan P, Wang Z, et al. 2.19 kW narrow linewidth FBG-based MOPA configuration fiber laser[J]. *Opt Express*, 2019, 27(3): 3136.
- [113] Shi W, Fang Q, Fan J, et al. High power monolithic linearly polarized narrow linewidth single mode fiber laser at 1064 nm[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim. 2015.
- [114] Jiang M, Ma P, Huang L, 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.
- [115] Ma P, Tao R, Wang X, et al. High-power narrow-band and polarization-maintained all fiber superfluorescent source[J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2015, 27(8): 879-882.
- [116] Xu J, Liu W, Leng J, et al. Power scaling of narrowband high-power all-fiber superfluorescent fiber source to 1.87 kW[J]. *Opt Lett*, 2015, 40(13): 2973-2976.
- [117] Xu Jiangming, Huang Long, Jiang Man et al. Near-diffraction-limited linearly polarized narrow-linewidth random fiber laser with record kilowatt output[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(4): 350-354.
- [118] 刘广柏, 杨依枫, 雷敏, 等. 1.5 kW 近衍射极限全光纤窄带超荧光光源[J]. *中国激光*, 2015, 42: 1202001. (Liu Guangbo, Yang Yifeng, Lei Min, et al. 1.5 kW near-diffraction-limited narrowband all-fiber superfluorescent source[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42: 1202001)
- [119] Qi Y, Ming Lei, Liu C, 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.
- [120] 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: 0419004. (Yang Yifeng, Shen Hui, Chen Xiaolong, et al. All-fiber, high efficiency and narrow linewidth fiber laser achieves 2.5 kW near-diffraction limit output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43: 0419004)
- [121] 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]//Proc of SPIE. 2011: 791407.

- [122] Ma P, Tao R, Su R, et al. 1.89 kW all-fiberized and polarization-maintained amplifiers with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality[J]. *Opt Express*, 2016, 24(4): 4187.
- [123] Su R, Tao R, Wang X, et al. 2.43 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber amplifier based on mode instability suppression[J]. *Laser Phys Lett*, 2017, 14: 085102.
- [124] Li T, Zha C, Sun Y, et al. 3.5 kW bidirectionally pumped narrow-linewidth fiber amplifier seeded by white-noise-source phase-modulated laser[J]. *Laser Phys*, 2018, 28: 105101.
- [125] 王岩山, 马毅, 孙殷宏, 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: 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: 1215001)
- [126] 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]. *Opt Express*, 2019, 27(7): 9716.
- [127] 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 μm active fiber and counterpumped configuration[J]. *Appl Opt*, 2019, 58(12): 3053-3058.
- [128] 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(1): 629.
- [129] Flores A, Robin C, Lanari A, et al. Pseudo-random binary sequence phase modulation for narrow linewidth, kilowatt, monolithic fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2014, 22(15): 17735.
- [130] Dajani I, Flores A, Holten R, et al. Multi-kilowatt power scaling and coherent beam combining of narrow-linewidth fiber lasers[C]//Proc of SPIE. 2015: 972801.
- [131] Naderi N A, Dajani I, Flores A. High-efficiency, kilowatt 1034 nm all-fiber amplifier operating at 11pm linewidth[J]. *Opt Lett*, 2016, 41(5): 1018.
- [132] Naderi N A, Flores A, Anderson B M, et al. Beam combinable, kilowatt, all-fiber amplifier based on phase-modulated laser gain competition[J]. *Opt Lett*, 2016, 41(17): 3964.
- [133] Anderson B M, Flores A, Dajani I. Filtered pseudo random modulated fiber amplifier with enhanced coherence and nonlinear suppression[J]. *Opt Express*, 2017, 25(15): 17671.
- [134] Kanskar M, Zhang J, Koponen J, et al. Narrowband transverse-modal-instability (TMI)-free Yb-doped fiber amplifiers for directed energy applications[C]// Proc SPIE. 2018: 15120F.
- [135] Lim W Y W, Seah K W, Seah C P, et al. Wavelength flexible, kW-level narrow linewidth fibre laser based on 7GHz PRBS phase modulation[C]//Proc of SPIE. 2020: 1126006.
- [136] 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]. *Opt Express*, 2016, 24(6): 6011.
- [137] Beier F, Hupel C, Kuhn S, et al. Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier[J]. *Opt Express*, 2017, 25(13): 14892.
- [138] Chu Q, Shi Y, Wen J, et al. 2.5 kW narrow linewidth fiber amplifier with white noise signal phase modulated seed[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. 2018: W1A.
- [139] Chang Z, Wang Y, Sun Y, et al. 1.5 kW polarization-maintained Yb-doped amplifier with 13 GHz linewidth by suppressing the self-pulsing and stimulated Brillouin scattering[J]. *Appl Opt*, 2019, 58(23): 6419-6425.
- [140] Meng D, Lai W, He X, et al. Kilowatt-level, mode-instability-free, all-fiber and polarization-maintained amplifier with spectral linewidth of 1.8 GHz[J]. *Laser Phys*, 2019, 29: 035103.
- [141] Anderson B, Flores A, Holten R, et al. Comparison of phase modulation schemes for coherently combined fiber amplifiers[J]. *Opt Express*, 2015, 23(21): 27046.
- [142] Kablukov S I, Zlobina E A, Podivilov E V, et al. Output spectrum of Yb-doped fiber lasers[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(13): 2508.
- [143] Liu W, Ma P, Lü H, et al. General analysis of SRS-limited high-power fiber lasers and design strategy[J]. *Opt Express*, 2016, 24(23): 26715-26721.
- [144] Liu W, Ma P, Lü H, et al. Investigation of stimulated Raman scattering effect in high-power fiber amplifiers seeded by narrow-band filtered superfluorescent source[J]. *Opt Express*, 2016, 24(8): 8708.
- [145] Harish A V, Nilsson J. Optimization of phase modulation with arbitrary waveform generators for optical spectral control and suppression of stimulated Brillouin scattering[J]. *Opt Express*, 2015, 23(6): 6988.
- [146] Harish A V, Nilsson J. Optimization of phase modulation formats for suppression of stimulated brillouin scattering in optical fibers[J]. IEEE J Sel Top Quant, 2018, 24(3): 1-10.
- [147] White J O, Young J T, Wei C, et al. Seeding fiber amplifiers with piecewise parabolic phase modulation for high SBS thresholds and compact spectra[J]. *Opt Express*, 2019, 27(3): 2962.
- [148] Goodno G D, Rothenberg J E. Suppression of stimulated Brillouin scattering in high power fibers using nonlinear phase demodulation[J]. *Opt Express*, 2019, 27(9): 13129.
- [149] Stihler C, Jauregui C, Otto H, 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]//Proc of SPIE. 2017: 100830P.

- [150] Tao Rumao, Wang Xiaolin, Zhou Pu, et al. Seed power dependence of mode instabilities in high-power fiber amplifiers[J]. *J Optics*, 2017, 19: 065202.
- [151] Smith J J, Smith A V. Influence of signal bandwidth on mode instability thresholds of fiber amplifiers[C]//Proc of SPIE. 2015: 93440L.
- [152] Tao R, Ma P, Wang X, et al. Study of wavelength dependence of mode instability based on a semi-analytical model[J]. *IEEE J Quantum Elect*, 2015, 51(8): 1600106.
- [153] Otto H, Modsching N, Jauregui C, et al. Wavelength dependence of maximal diffraction-limited output power of fiber lasers[C]//Proc of SPIE. 2015: 93441Y.
- [154] Sanjabi Eznaveh Z, López-Galmiche G, Antonio-López E, et al. Bi-directional pump configuration for increasing thermal modal instabilities threshold in high power fiber amplifiers[C]//Proc of SPIE. 2015: 93442G.
- [155] 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]//Proc of SPIE. 2014: 89641W.
- [156] Jauregui C, Otto H, Breitkopf S, et al. Optimizing high-power Yb-doped fiber amplifier systems in the presence of transverse mode instabilities[J]. *Opt Express*, 2016, 24(8): 7879.
- [157] Tao R, Ma P, Wang X, et al. Theoretical study of pump power distribution on modal instabilities in high power fiber amplifiers[J]. *Laser Phys Lett*, 2017, 14: 025002.
- [158] Smith A V, Smith J J. Increasing mode instability thresholds of fiber amplifiers by gain saturation[J]. *Opt Express*, 2013, 21(13): 15168.
- [159] Tao R, Su R, Ma P, et al. Suppressing mode instabilities by optimizing the fiber coiling methods[J]. *Laser Phys Lett*, 2017, 14(2): 25101.
- [160] Otto H, Modsching N, Jauregui C, et al. Impact of photodarkening on the mode instability threshold[J]. *Opt Express*, 2015, 23(12): 15265.
- [161] Chen Y S, Xu H Z, Xing Y B, et al. Impact of gamma-ray radiation-induced photodarkening on mode instability degradation of an ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *Opt Express*, 2018, 26(16): 20430.
- [162] Hejaz K, Norouzey A, Poozesh R, et al. Controlling mode instability in a 500 W ytterbium-doped fiber laser[J]. *Laser Phys*, 2014, 24(2): 25102.
- [163] Pulford B, Ehrenreich T, Holten R, et al. 400-W near diffraction-limited single-frequency all-solid photonic bandgap fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2015, 40(10): 2297.
- [164] Hochheim S, Steinke M, Wessels P, et al. Single-frequency chirally coupled-core all-fiber amplifier with 100 W in a linearly polarized TEM<sub>00</sub> mode[J]. *Opt Lett*, 2020, 45(4): 939.
- [165] Filippov V, Kerttula J, Chamorovskii Y, et al. Highly efficient 750 W tapered double-clad ytterbium fiber laser[J]. *Opt Express*, 2010, 18(12): 12499-12512.
- [166] Trikshev A I, Kurkov A S, Tsvetkov V B, et al. A 160 W single-frequency laser based on an active tapered double-clad fiber amplifier[J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10: 065101.
- [167] Shi C, Zhang H, Wang X, et al. kW-class high power fiber laser enabled by active long tapered fiber[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e16.
- [168] Spirin V V, López-Mercado C A, Kinet D, et al. A single-longitudinal-mode Brillouin fiber laser passively stabilized at the pump resonance frequency with a dynamic population inversion grating[J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10: 015102.
- [169] Chen M, Meng Z, Wang J, et al. Strong linewidth reduction by compact Brillouin/erbium fiber laser[J]. *IEEE Photonics J*, 2014, 6(5): 1-8.
- [170] Chen M, Meng Z, Zhang Y, et al. Ultranarrow-linewidth Brillouin/erbium fiber laser based on 45-cm erbium-doped fiber[J]. *IEEE Photonics J*, 2015, 7(1): 1-6.
- [171] Huang S, Zhu T, Yin G, et al. Tens of hertz narrow-linewidth laser based on stimulated Brillouin and Rayleigh scattering[J]. *Opt Lett*, 2017, 42(24): 5286-5289.
- [172] Zhu T, Bao X, Chen L. A single longitudinal-mode tunable fiber ring laser based on stimulated Rayleigh scattering in a nonuniform optical fiber[J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(12): 1802-1807.
- [173] Yin G, Saxena B, Bao X. Tunable Er-doped fiber ring laser with single longitudinal mode operation based on Rayleigh backscattering in single mode fiber[J]. *Opt Express*, 2011, 19(27): 25981.
- [174] Zhu T, Chen F Y, Huang S H, et al. An ultra-narrow linewidth fiber laser based on Rayleigh backscattering in a tapered optical fiber[J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10: 055110.
- [175] Shupe Mo Z L X H, Zhang W, Li C, et al. 820 Hz linewidth short-linear-cavity single- frequency fiber laser at 1.5 mm[J]. *Laser Phys Lett*, 2014, 11: 035101.
- [176] Mo S, Huang X, Xu S, et al. 600-Hz linewidth short-linear-cavity fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(20): 5818.
- [177] Pan Z, Ye Q, Cai H, et al. Fiber ring with long delay used as a cavity mirror for narrowing fiber laser[J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2014, 26(16): 1621-1624.
- [178] Mo S, Huang X, Xu S, et al. Compact slow-light single-frequency fiber laser at 1550 nm[J]. *Appl Phys Express*, 2015, 8(8): 82703.
- [179] Huang X, Zhao Q, Lin W, et al. Linewidth suppression mechanism of self-injection locked single-frequency fiber laser[J]. *Opt Express*, 2016, 24(17): 18907.
- [180] Zhu T, Huang S, Shi L, et al. Ultra-narrow linewidth fiber laser with self-injection feedback based on Rayleigh backscattering[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. 2014: SW1N5.
- [181] Kovalev V I, Harrison R. Waveguide-induced inhomogeneous spectral broadening of stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. *Opt Lett*, 2002, 27(22): 2022.
- [182] Ke W, Wang X, Tang X. Stimulated Brillouin scattering model in multi-mode fiber lasers[J]. *IEEE J Sel Top Quant*, 2014, 20(5): 305-314.
- [183] Lu H, Zhou P, Wang X, et al. Theoretical and numerical study of the threshold of stimulated Brillouin scattering in multimode fibers[J]. *J Lightwave Technol*, 2015, 33(21): 4464-4470.

- [184] Zeringue C, Dajani I, Naderi S, et al. A theoretical study of transient stimulated Brillouin scattering in optical fibers seeded with phase-modulated light[J]. *Opt Express*, 2012, 20(19): 21196-21213.
- [185] Meier T, Willke B, Danzmann K. Continuous-wave single-frequency 532 nm laser source emitting 130 W into the fundamental transversal mode[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(22): 3742.
- [186] Cui S, Zhang L, Jiang H, et al. High efficiency frequency doubling with a passive enhancement cavity[J]. *Laser Phys Lett*, 2019, 16(3): 35105.
- [187] Taylor L R, Feng Y, Calia D B. 50W CW visible laser source at 589nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers[J]. *Opt Express*, 2010, 18(8): 8540.
- [188] Zhang L, Jiang H, Cui S, et al. Versatile Raman fiber laser for sodium laser guide star[J]. *Laser Photonics Rev*, 2014, 8(6): 889-895.
- [189] Dong J, Zeng X, Cui S, et al. More than 20 W fiber-based continuous-wave single frequency laser at 780 nm[J]. *Opt Express*, 2019, 27(24): 35362.
- [190] Kwon M, Yang P, Huft P, et al. Generation of 14.0 W of single-frequency light at 770 nm by intracavity frequency doubling[J]. *Opt Lett*, 2020, 45(2): 339-342.
- [191] Shukla M K, Das R. High-power single-frequency source in the mid-infrared using a singly resonant optical parametric oscillator pumped by Yb-fiber laser[J]. *IEEE J Sel Top Quant*, 2018, 24(5): 1-6.
- [192] Gouhier B, Guiraud G, Rota-Rodrigo S, et al. 25 W single-frequency, low noise fiber MOPA at 1120 nm[J]. *Opt Lett*, 2018, 43(2): 308-311.
- [193] Ma P, Miao Y, Liu W, et al. Kilowatt-level ytterbium-Raman fiber amplifier with a narrow-linewidth and near-diffraction-limited beam quality[J]. *Opt Lett*, 2020, 45(7): 1974.
- [194] Goodno G D, Mcnaught S J, Rothenberg J E, et al. Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(10): 1542-1544.
- [195] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(14): 2686-2688.
- [196] Shekel E, Vidne Y, Urbach B. 16 kW single mode CW laser with dynamic beam for material processing[C]//Proc of SPIE. 2020: 1126021.
- [197] Fsaifes I, Daniault L, Bellanger S, et al. Coherent beam combining of 60 femtosecond fiber amplifiers[C]//Proc of SPIE. 2020: 112600L.
- [198] Flores A, Dajani I, Holten R, et al. Multi-kilowatt diffractive coherent combining of pseudorandom-modulated fiber amplifiers[J]. *Opt Eng*, 2016, 55(9): 96101.
- [199] Muller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2020, 45(11): 3083-3086.
- [200] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, et al. Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling[C]//Proc of SPIE. 2016: 97300Y.
- [201] Zheng Y, Yang Y, Wang J, et al. 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation[J]. *Opt Express*, 2016, 24(11): 12063.
- [202] Chen F, Ma J, Wei C, et al. 10 kW-level spectral beam combination of two high power broad-linewidth fiber lasers by means of edge filters[J]. *Opt Express*, 2017, 25(26): 32783.
- [203] Zheng Y, Zhu Z, Liu X, et al. High-power, high-beam-quality spectral beam combination of six narrow-linewidth fiber amplifiers with two transmission diffraction gratings[J]. *Appl Opt*, 2019, 58(30): 8339.
- [204] 马鹏飞, 马阎星, 栗荣涛, 等. 8 kW级光纤激光优质高效相干合成(简讯)[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(5): 246. (Ma Pengfei, Ma Yanxing, Su Rongtao, et al. High quality and efficient coherent beam combining of 8 kW fiber laser[J]. Infrared and laser Engineering, 2020, 49(5): 246)
- [205] Su R, Zhou P, Wang X, et al. Active coherent beam combining of a five-element, 800 W nanosecond fiber amplifier array[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(19): 3978-3980.
- [206] 马毅, 颜宏, 田飞, 等. 光纤激光共孔径光谱合成实现5kW高效优质输出[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 041001. (Ma Yi, Yan Hong, Tian Fei, et al. Common aperture spectral beam combination of fiber lasers with 5 kW power high-efficiency and high-quality output[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 041001)
- [207] Piracha M U, Nguyen D, Mandridis D, et al. Range resolved lidar for long distance ranging with sub-millimeter resolution[J]. *Opt Express*, 2010, 18(7): 7184.
- [208] Vercesi V, Onori D, Laghezza F, et al. Frequency-agile dual-frequency lidar for integrated coherent radar-lidar architectures[J]. *Opt Lett*, 2015, 40(7): 1358.
- [209] Yang F, Ye Q, Pan Z, et al. 100-mW linear polarization single-frequency all-fiber seed laser for coherent Doppler lidar application[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(2): 149-152.