

## 单频光纤激光技术的研究进展 (特邀)

李 灿, 周 朴\*, 马鹏飞, 姜 曼, 陶 悦, 刘 流

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 单频光纤激光具有单色性好、谱功率密度高等特点, 在通信传感、雷达、引力波探测、非线性频率变换等领域有广泛的应用需求。目前单频光纤激光技术正朝着更高功率、更宽波段和更高性能等方向发展, 是激光技术领域的前沿和热点。文中系统梳理了近年来单频光纤激光领域取得的重要进展, 具体从单频激光实现方式、功率增长、波长拓展以及性能提升等方面对相关标志性工作进行了总结, 讨论了单频光纤激光技术当前所面临的挑战, 并展望了其未来发展趋势。

**关键词:** 光纤激光; 单频; 窄线宽; 低噪声

中图分类号: O438 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220237

## Research progress of single-frequency fiber laser technology (*Invited*)

Li Can, Zhou Pu\*, Ma Pengfei, Jiang Man, Tao Yue, Liu Liu

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

**Abstract:** Single-frequency fiber laser has the merits of excellent monochromaticity and high spectral power density, and it has widespread application needs in, for example, coherent communication and sensing, lidar, gravitational wave detection and nonlinear frequency conversion. At present, single-frequency fiber laser technologies are moving towards the direction of higher output power, broader spectral range, and higher overall performance, and have become the research frontier and hotspot in the field of laser technology. This manuscript systematically combed through the important progress of single-frequency fiber lasers in recent years. Specifically, the landmark works with respect to the implementation mode of single-frequency lasing, power scaling, wavelength expanding and performance improvement were reviewed. In addition, the current challenges as well as future trends of single-frequency fiber laser technology were also discussed.

**Key words:** fiber laser; single-frequency; narrow linewidth; low noise

收稿日期: 2022-04-06; 修订日期: 2022-05-04

基金项目: 国家重点研发计划 (2020 YFC2200401); 国家自然科学基金 (62035015, 62005316); 湖南省自然科学基金创新研究群体项目 (2019 JJ10005)

作者简介: 李灿, 男, 副研究员, 博士, 主要从事单频与超快光纤激光方面的研究。

通讯作者: 周朴, 男, 研究员, 博士, 主要从事高功率激光技术方面的研究。

## 0 引言

单频光纤激光具有时间相干性好、谱功率密度高、时域稳定性好等特点,在通信、传感、探测、科学研究等领域具有广泛的应用潜力<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着激光合成、引力波探测、激光雷达等需求牵引,单频光纤激光已成为激光技术领域的重点研究方向之一<sup>[4-7]</sup>。2020 年度国家自然科学基金项目指南将“千瓦单频光纤激光关键技术”列入了重点项目类型,国家重点研发计划“十四五”重点专项则将研制“单模块千瓦级低噪声窄线宽单频光纤激光器”列为 2021 年度项目申报指南任务方向之一。随着单频光纤激光综合参数性能的进一步提升,其应用范围与应用深度也在不断扩展,各种创新研究成果不断涌现,并发展了诸多以高性能单频光纤激光光源为依托的大型研究计划<sup>[8-9]</sup>。文中通过梳理近年来单频光纤激光研究的最新成果、所面临的技术挑战,旨在呈现当前单频光纤激光的研究现状,并展望其未来的发展趋势。

## 1 研究进展

### 1.1 实现方式多元

由于单频光纤激光的单一谐振腔纵模运转特性,其传统实现方式主要为基于窄带光纤光栅的短线型腔和复合环形腔<sup>[1]</sup>。除了传统基于稀土掺杂光纤的有源激光谐振腔,无源光纤谐振腔也可实现有效的单频激光输出。由于光纤内的非线性受激布里渊散射(SBS)效应反射带宽较窄,一般在数十 MHz 量级,因此可基于较长的腔长实现有效的单频激光运转。近年来,北京工业大学、国防科技大学以及天津大学等单位分别在 1.0  $\mu\text{m}$ 、1.5  $\mu\text{m}$  和 2.0  $\mu\text{m}$  实现了高性能单频布里渊光纤激光输出<sup>[10-12]</sup>。另外,最新研究结果表明光纤内的受激瑞利散射(STRS)具有极窄的反射带宽( $\sim 10$  kHz),研究人员基于该效应开展了大量研究,获得了具有不同输出特性的单频激光<sup>[13-15]</sup>。

腔内窄带滤波是实现单纵模运转的关键部分,尤其是当腔长较长时,常规布拉格光纤光栅(FBG)的反射带宽不足以实现单频激光输出。为解决该问题,一个重要的方法是利用双向传输的激光信号在一段未被泵浦的增益光纤中形成瞬态干涉光场,从而对掺杂离子的上能级粒子数分布在光纤轴向进行周期性调

制,产生动态的光栅滤波效应<sup>[16-18]</sup>。该方案的一个优点是其对激光工作波长不敏感,可实现大范围的波长调谐,韩国科学技术院课题组基于该方案搭建掺铊光纤激光器,在 2  $\mu\text{m}$  波段实现了调谐范围为 120 nm 的单频激光输出<sup>[19]</sup>。基于该原理,西北大学课题组在 2021 年提出了一种双向工作的光纤激光器结构,利用腔内反向传输的光信号干涉形成动态光栅滤波,最终实现了单频激光双向同时输出<sup>[20]</sup>。

随着近年来光纤光栅制作水平的发展,其可实现的反射带宽不断变窄,这为单频光纤激光器的系统简化提供了器件支撑。2014 年,北京交通大学课题组制作出一种基于两个线性啁啾布拉格光栅叠加的啁啾莫尔光纤光栅,其反射带宽达到了 0.1 pm,并利用其实现了波长可调谐的超窄线宽单频激光输出<sup>[21]</sup>。次年,该课题组还通过对常规啁啾光纤光栅进行熔融拉锥,获得了反射带宽为 0.02 nm 的结构啁啾光纤光栅,同样实现了稳定的单频激光运转<sup>[22]</sup>。此外,还将啁啾莫尔光纤光栅引入掺铊光纤激光器中,在 2  $\mu\text{m}$  波段实现了双波长运转的单纵模激光输出<sup>[23]</sup>。最近,深圳大学课题组将组成线型谐振腔的两个光纤光栅反射谱进行设计,使得其重叠部分的有效滤波带宽仅为 0.024 nm,最终获得了线宽小于 1 kHz 的单频激光输出<sup>[24]</sup>。除此之外,新型二维材料<sup>[25-27]</sup>以及光纤非线性环形镜<sup>[28]</sup>的饱和吸收效应最近也被证实具有选频功能,这为单频光纤激光的大范围波长调谐、以及多波长运转提供了更多选择方案。

### 1.2 功率稳步增长

受到激光腔增益光纤长度以及增益系数的限制,从腔内直接输出的单频激光功率一般在毫瓦量级。近年来,随着高稀土掺杂浓度的多组分玻璃光纤日趋成熟,基于短线型腔的单频光纤激光功率持续提升。2011 年,华南理工大学课题组采用 0.8 cm 长的高掺镱磷酸盐光纤搭建分布布拉格反射式(DBR)谐振腔,在 1.0  $\mu\text{m}$  获得了输出功率为 400 mW 的稳定单频激光<sup>[29]</sup>。2013 年,美国亚利桑那大学课题组直接在钕共掺的磷酸盐光纤上刻写光栅构成 DBR 激光器,实现了 550 mW 的 1.5  $\mu\text{m}$  波段单频激光输出<sup>[30]</sup>。在 2.0  $\mu\text{m}$  波段,华南理工大学课题组于 2018 年利用 1.8 cm 长的掺铊镨酸盐光纤搭建 DBR 激光器,采用 1610 nm 同带泵浦获得了 617 mW 的低噪声单频激

光<sup>[31]</sup>。2021 年,美国亚利桑那大学课题组基于 1.8 cm 长的掺镱磷酸盐光纤搭建 DBR 激光器,采用 1.78 W 的 976 nm 半导体激光器泵浦在 1050 nm 获得了 1.15 W 的单频激光<sup>[32]</sup>。同年,天津大学课题组基于复合环形腔技术(如图 1 所示)<sup>[33]</sup>以及未泵浦增益光纤中的动态光栅滤波效应<sup>[34]</sup>,利用 1570 nm 同带泵浦 3 m 长的掺铥光纤,在 1720 nm 分别实现了输出功率为 1.11 W 和 2.56 W 的单频激光。

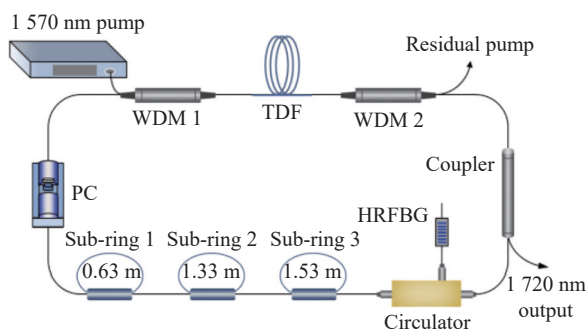


图 1 1.7 μm 单频掺铥光纤环形激光器结构示意图<sup>[33]</sup>

Fig.1 Schematic of the 1.7 μm single-frequency thulium-doped fiber ring laser<sup>[33]</sup>

尽管腔内直接输出的单频激光功率持续在提升,但对于某些重要应用,如引力波探测、激光雷达以及非线性频率变换来说,还远未达到应用需求,因此需对其进行进一步的功率放大。单频光纤激光放大一般采用主振荡功率放大(MOPA)方案,根据其种子源与泵浦光耦合进增益光纤的方式分为空间耦合结构与全光纤结构。由于全光纤结构所涉及的光纤长度更长,导致 SBS 阈值更低而使得其所实现的功率水平普遍低于空间耦合结构。此外,空间耦合结构所使用的增益光纤一般具有更大的纤芯包层尺寸,使得其单位长度增益增加而更容易实现高功率激光输出,并且已于 2014 年报导了最高功率为 811 W 的单频激光放

大的结果<sup>[35]</sup>。然而,全光纤系统具有结构紧凑、稳定性高、可柔性操作以及抗环境干扰能力强等优点,在实际应用中更具有优势。近年来,研究人员针对如何抑制全光纤单频激光放大器中的 SBS 效应,从而实现稳定高功率输出开展了大量的研究。在 2017 年,国防科技大学课题组采用纤芯包层直径为 25/250 μm 的大模场面积(LMA)光纤作为增益介质,同时在其轴向施加分布式应力降低有效 SBS 增益系数,在 1.0 μm 波段获得了 414 W 的近衍射极限单频光纤激光<sup>[36]</sup>。之后在 2020 年,该课题组将主放级的增益光纤替换为长锥型光纤(细端和粗端纤芯包层直径分别为 36.1/249.3 μm 和 57.8/397.3 μm),进一步将单频激光功率提升到 550 W,其具体结构如图 2 所示<sup>[37]</sup>。在该工作中,由于所使用的增益光纤模场面积较大,在 SBS 阈值大大提高的同时,放大器系统在高功率运转状态下发生热致模式不稳定(TMI)现象,引起基模和高阶模之间发生快速能量耦合,从而导致功率进一步提升受限。此现象进一步在 2021 年得到验证,国防科技大学课题组基于自主研制的锥形光纤(细端和粗端纤芯包层直径分别为 30.3/245 μm 和 49.3/404 μm)进行单频激光放大,在输出功率提升到 400 W 时观察到 TMI 效应<sup>[38]</sup>。在同一年,天津大学课题组提出将两段增益系数不同的 30/250 μm 掺铥光纤熔接后作为主放级增益介质进行单频激光放大,结合 915 nm 和 976 nm 的混合泵浦方案,通过优化光纤温度分布以及利用增益饱和和效应抑制 TMI,从而获得了最高 435 W 的单频激光输出<sup>[39]</sup>。

除 1.0 μm 波段以外,研究人员在 1.5 μm 和 2.0 μm 波段均开展了全光纤结构的高功率单频激光技术研究,但所实现的功率指标相对较低。其中,在 1.5 μm 波段由于钇铥共掺光纤的增益系数较小,并且当光纤在较高的泵浦程度下时容易产生 1.0 μm 的自发辐射

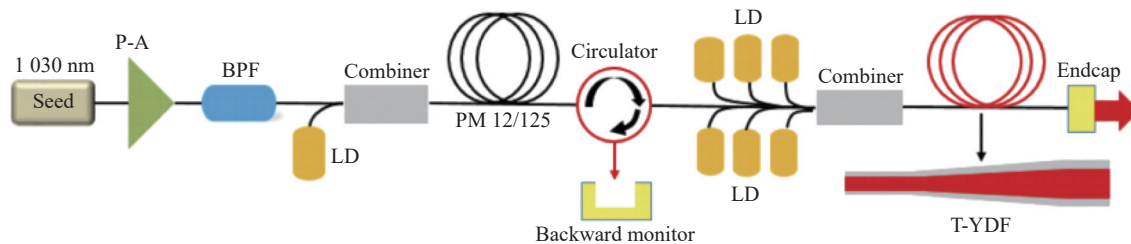


图 2 基于长锥形光纤的单频光纤激光放大实验装置图<sup>[37]</sup>

Fig.2 Experiment setup of single-frequency fiber amplifier based on tapered fiber<sup>[37]</sup>

甚至寄生振荡,使得相应的单频光纤激光功率停留在 50 W 量级<sup>[40-41]</sup>。而在 2.0 μm 处,得益于掺铥光纤的高增益系数,以及基于 793 nm 激光泵浦时交叉弛豫效应产生的较低量子亏损,所实现的全光纤结构单频激光功率相比 1.0 μm 波段差距较小。2015 年,国防科技大学课题组基于纤芯直径为 25 μm 的掺铥光纤在 1 971 nm 处实现了输出功率为 300 W 的单频激光,且进一步功率提升仅受限于泵浦功率<sup>[42]</sup>。2021 年,华南理工大学课题组采用纤芯直径为 20 μm 的保偏掺铥光纤,通过优化其缠绕方式抑制高阶模成分,在 1 950 nm 处获得了 316 W 单频激光输出,然而其进一步功率提升受到了 SBS 的限制<sup>[43]</sup>。

### 1.3 波长继续扩展

基于稀土掺杂光纤的单频激光器基本上都工作在相应掺杂离子的辐射峰附近,使得到目前为止单频光纤激光器所实现的工作波长范围相比常规光纤激光器更窄。主要原因是典型单频光纤激光腔长较短(cm 量级),因此在偏离掺杂离子辐射峰的位置增益较小,难以实现有效的单频激光运转。近几年来,研究人员通过对光纤激光器结构进行优化设计,陆续实现了在掺杂离子辐射带边缘处的单频激光输出。2016 年,华南理工大学课题组通过优化 DBR 激光腔的耦合输出系数以及腔长,基于掺镱磷酸盐光纤在 1 120 nm 实现了 62 mW 的单频激光<sup>[44]</sup>。2018 年,捷克科学院课题组采用超低损耗的环形腔结构实现了从 1 023~1 107 nm 的连续可调谐单频激光运转<sup>[45]</sup>。2021 年,国防科技大学课题组通过采用优化的光栅刻写技术,直接在掺镱光纤上刻写长相移光栅构建分布反馈(DFB)激光器,分别在 1 030 nm 和 1 150 nm 实现了稳定单模运转<sup>[46-47]</sup>。其中后者为该类激光器所实现的最长工作波长,并且其阈值泵浦功率仅为 10 mW、光谱信噪比达到了 70 dB,如图 3 所示。对于掺铒光纤,华南理工大学课题组在 2021 年采用环形腔结构结合窄带滤波器件,实现了工作波长范围在 1 535.50~1 612.19 nm 的可调谐单频激光输出<sup>[48]</sup>。对于掺铥光纤,美国 Cybel 公司利用有源相移光栅构建长度为 8 cm 的 DFB 激光器,获得了工作波长为 2 051 nm 的单频激光输出<sup>[49]</sup>。在掺铥光纤辐射的短波段,天津大学课题组基于光纤环形腔结构结合未泵浦增益光纤中的动态光栅滤波在 1 720 nm 处实现了输出功率高

达 2.56 W 的单频激光<sup>[34]</sup>。此外,华南理工大学课题组在同一年利用高掺杂浓度的铈酸盐掺铥光纤搭建短腔 DBR 激光器,在 1 727 nm 获得了 12.4 mW 的单频激光运转<sup>[50]</sup>。

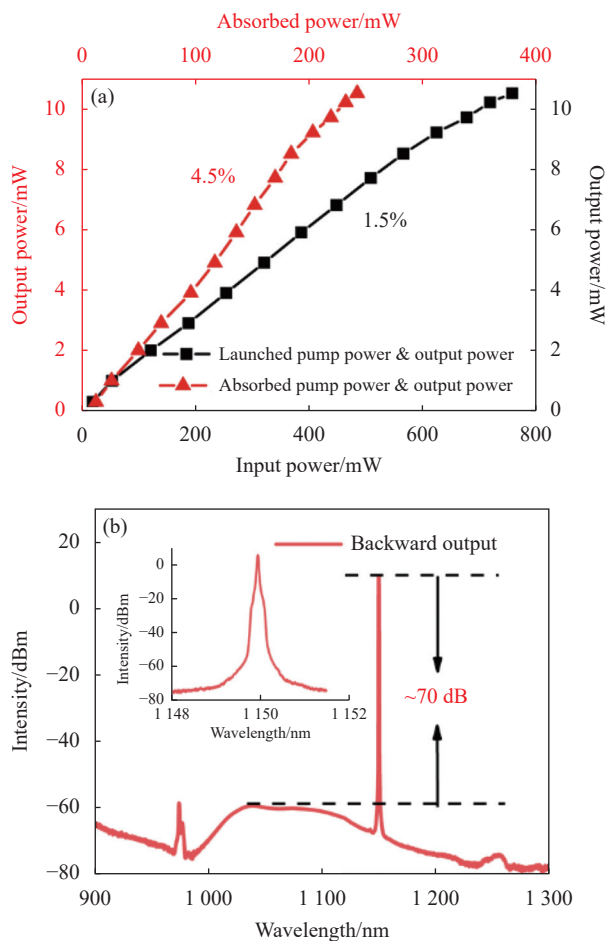


图 3 1150 nm DFB 单频光纤激光器的输出特性。(a) 输出功率; (b) 输出光谱<sup>[47]</sup>

Fig.3 Characteristics of the DFB single-frequency fiber laser at 1150 nm. (a) Output power; (b) Optical spectrum<sup>[47]</sup>

除了较为成熟的掺镱、铒以及铥光纤激光器以外,近年来研究人员开始利用新型稀土掺杂光纤和常规掺杂光纤的新辐射能带来产生不同波段的单频激光。2018 年,美国 NP 光子公司采用 1 125 nm 的激光对掺铥光纤进行泵浦,获得了工作波长为 478 nm 的蓝光单频激光输出<sup>[51]</sup>。2016 年,天津大学课题组采用掺铈石英光纤构建 DBR 激光腔,实现了工作波长为 930 nm、功率为 1.9 mW 的单频激光输出<sup>[52]</sup>。2021 年,亚利桑那大学课题组则采用高浓度掺杂的掺铈磷酸盐光纤搭建类似结构的激光器,在 915 nm 处获得了

13.5 mW 的单频激光<sup>[53]</sup>。2012 年,美国 NP 光子公司基于自研的掺铱 ZBLAN 光纤,搭建短腔 DBR 激光器,实现了 1200 nm 处的单频光纤激光运转<sup>[54]</sup>。此外,在中红外波段,拉瓦尔大学和悉尼大学课题组基于飞秒激光分别在掺铱和共掺铱/镱的氟化物光纤中刻写光栅,实现了 2.8、2.9  $\mu\text{m}$  的单频激光运转<sup>[55-56]</sup>。研究人员还利用非线性受激拉曼散射 (SRS) 效应来获得非常规波段的单频激光,蒙特利尔综合理工大学课题组通过无源光纤上刻写相移光栅构建 DFB 激光器,利用 1120 nm 激光进行泵浦实现了输出功率为 300 mW 的 1178 nm 单频激光输出<sup>[57]</sup>。

近年来,在稀土离子掺杂光纤辐射带宽边缘处的单频激光放大也受到了研究人员的关注,并且开展了相关研究工作。2018 年,亚利桑那大学课题组采用掺铱磷酸盐双包层光纤搭建 2 级光纤放大器,在 976 nm 处获得了 10 W 的单频光纤激光<sup>[58]</sup>。在同一年,波尔多大学课题组通过对 MOPA 结构的主放级光纤进行加热抑制短波段的自发辐射,在 1120 nm 处实现了高光谱信噪比的单频激光放大并获得了 25 W 的输出功率<sup>[59]</sup>。2019 年,该课题组进一步对放大器结构进行优化,实现对自发辐射的有效抑制,分别在 1007 nm 和 1013 nm 实现了输出功率为 16 W 和 50 W 的低噪声放大<sup>[60-61]</sup>。

#### 1.4 性能不断改善

单频光纤激光因其长相干长度、窄线宽以及低噪声的特性,广泛应用在高精度测量与传感等领域,并且光源的性能水平如线宽、噪声、偏振度、长时间稳定性等在一定程度上决定了其最终的应用水平。因此,如何不断提高单频光纤激光的性能指标也是研究人员的一个重要课题。在线宽压窄方面,中国科学院安徽光学精密机械研究所课题组于 2021 年采用精细度为 360000 的超稳光学腔做为频率参考,对工作波长为 1550 nm 的 DBR 单频激光器进行频率控制,实现了线宽为 280 mHz 的单频激光输出,其在 1 s 内的频率稳定度达到了  $6 \times 10^{-6}$ <sup>[62]</sup>。在低噪声运转方面,华南理工大学课题组在 2018 年采用半导体光放大器非线性放大结合自注入锁定的方式,在 1.5  $\mu\text{m}$  波段实现了对激光弛豫振荡峰高达 64 dB 的抑制,获得了近散粒噪声极限的单频光纤激光<sup>[63]</sup>。该课题组还在同一年采用带光电负反馈的半导体光放大器、以及氦-4

原子吸收谱稳频,在 1.0  $\mu\text{m}$  波段实现了对单频光纤激光强度和频率噪声的同时抑制,其中低频段相对强度噪声仅高出散粒噪声极限 5 dB、并且频率抖动的均方根值约为 17 kHz<sup>[64]</sup>。在提升输出激光偏振度方面,浙江大学课题组在 2021 年通过利用光纤中的偏振演化效应以及高性能偏振分束器,基于 DBR 结构获得了偏振消光比高达 35 dB 的单频光纤激光<sup>[65]</sup>。在同一年,南京大学课题组将一个 DBR 结构激光腔通过自注入锁定到一个品质因子为  $1.42 \times 10^8$  的光纤环,在未使用保偏器件的情况下,实现了偏振消光比为 40 dB 的单频光纤激光输出<sup>[66]</sup>。在长时间稳定工作方面,中国科学院安徽光学精密机械研究所课题组基于复合环形腔结构,通过采用全保偏光纤设计以及精密温度控制,实现了 11 h 的无跳模高稳定性运转<sup>[67]</sup>。

近年来,研究人员在追求单频光纤激光放大器功率提升的同时,开始关注其整体性能的提升。2016 年,华南理工大学课题组将工作波长为 1064 nm 的 DBR 结构单频种子源的强度噪声进行抑制后,对其进行全光纤放大获得了相对强度噪声小于  $-130 \text{ dB/Hz}$  @  $>2 \text{ MHz}$ 、输出功率  $>52 \text{ W}$  的激光输出<sup>[68]</sup>。2019 年,德国汉诺威激光中心课题组通过对单频激光种子源、预放大器和主放大器分别进行模块化设计,实现了输出功率为 200 W 的单频光纤激光放大,对激光信号的强度噪声、频率噪声和光束指向噪声的测量表明该放大器系统已达到引力波探测对光源的要求,并且在最大功率下连续稳定工作时间长达 695 h<sup>[69]</sup>。2020 年,法国波尔多大学课题组基于自研的 LMA 光纤搭建全光纤放大器,将单频激光的功率放大到 365 W,并且连续运转 1100 h 的功率抖动均方根值小于 0.7%,同时该课题组还利用光电负反馈方案对主放大器进行噪声抑制,将激光相对强度噪声在 2~10 kHz 内抑制到  $-160 \text{ dB/Hz}$ <sup>[70]</sup>。该课题组还在 2021 年开展了 1.5  $\mu\text{m}$  波段的低噪声单频光纤激光放大研究,具体通过搭建一个两级全光纤放大结构,实现了在 1533~1571 nm 范围内输出功率大于 10 W 的波长连续可调谐,并且在  $>200 \text{ kHz}$  的频段内相对强度噪声  $<-160 \text{ dB/Hz}$ <sup>[71]</sup>。在 2.0  $\mu\text{m}$  波段,北京工业大学课题组对单频种子源噪声进行反馈抑制后,将其进行两级放大到 5 W,测试表明激光强度噪声和频率噪声均达到 aLIGO 平台对探测光源的要求,其具体结构如图 4 所示<sup>[72]</sup>。

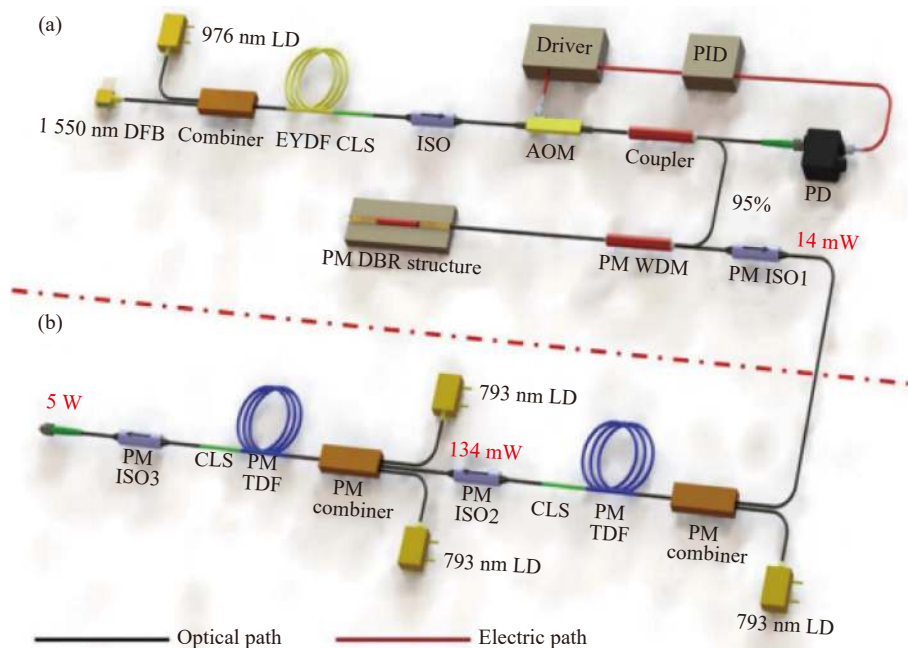


图 4 (a) 2 μm 低噪声单频光纤激光器; (b) 全光纤掺铥功率放大器的结构示意图<sup>[72]</sup>

Fig.4 Experimental setup of (a) the 2 μm low-noise single-frequency fiber laser, and (b) the thulium-doped all-fiber power amplifier<sup>[72]</sup>

此外, 研究人员还针对实际应用需求开展了具有特定性能参数的单频光纤激光研究。比如, 北京工业大学课题组在 2018 年采用具有双反射峰的低反射率 FBG 构建 DBR 激光器, 实现了频率差为 28 GHz 的双频激光输出, 该光源可用于产生高稳定性微波源<sup>[73]</sup>。俄罗斯科学院西伯利亚分院课题组分别基于掺铥和掺钕光纤搭建线型激光腔, 利用腔内空间烧孔效应引起的瞬态光栅和动态相位变化获得了大范围自扫频输出的单频激光, 其中工作在 2.0 μm 的激光源已被应用于测量空气中水分的吸收谱<sup>[74-75]</sup>。2019 年, 华南理工大学课题组针对微量气体检测应用, 采用一个半导体饱和吸收镜和一个双通道保偏光纤光栅构建 DBR 结构激光腔, 实现了 4 波长运转的调 Q 单频激光输出, 其最高单脉冲能量和最短脉宽分别为 55.4 nJ 和 104 ns<sup>[76]</sup>。该课题组还在 2021 年提出在一个自注入锁定的单频光纤激光器注入环路中插入 FBG, 通过对该 FBG 进行拉伸, 实现了在 10 nm 范围内的高精度无跳模波长调谐, 其调谐精度达到了 54 pm, 该光源可被用于高速相干通信系统中<sup>[77]</sup>。

## 2 技术挑战与发展趋势

尽管近年来单频光纤激光技术已经取得了显著进展, 但也存在很多技术挑战, 以下针对目前单频光

纤激光研究存在的典型技术挑战及其相应的发展趋势进行讨论。

### 2.1 功率提升

从单个光纤谐振腔中输出的单频激光功率目前最高为瓦量级, 而基于固态晶体的单频激光器输出功率可达数十瓦甚至百瓦级<sup>[78-80]</sup>, 两者差距较大。当前基于高掺杂多组分玻璃光纤的单频激光器腔长主要在厘米量级, 其功率的进一步提升受限于有限的光学增益以及极短光纤长度上的热量累积。增加激光腔长可以有效解决以上问题, 同时也要求引入更窄带宽的滤波单元以实现稳定单纵模运转。此外, 高功率的单频光纤激光运转还受到 SBS 的限制, 因此须对激光腔的结构参数进行综合权衡和设计。

针对以上问题, 采用 LMA 有源光纤构建谐振腔可以有效提高单位长度上的增益, 并且 SBS 阈值也会得到提高, 有利于提升单频光纤激光器的输出功率。早在 2005 年, 美国亚利桑那大学课题组利用高掺杂的 LMA 磷酸盐光子晶体光纤, 构建单频激光器在 1.5 μm 实现了 2.3 W 的输出功率<sup>[81]</sup>。然而, 增大高掺杂光纤的模场面积并不能有效解决短腔激光器的热效应问题, 导致该功率指标直到 2021 年才被超越<sup>[34]</sup>。在参考文献 [34] 中, 增益介质为数米长的稀土掺杂石英光纤, 窄带滤波功能则由环形腔结合未泵浦光纤中

的瞬态光栅实现,由于瞬态光栅的形成受到腔内激光功率起伏的影响,导致光源系统的稳定性和可靠性较差。而要基于较长的环形腔结构获得稳定的窄带滤波,光纤内的 SBS 效应因其具有极窄的增益带宽(数十 MHz 量级)、且不易受到外界干扰变化而成为实现腔内单纵模运转的重要手段之一<sup>[10-12]</sup>。对于布里渊光纤激光器在高功率运转时的高阶 SBS 问题,则可通过采用 LMA 光纤降低光纤横向功率密度对其进行缓解。2022 年,国防科技大学课题组采用纤芯/包层直径为 20/400  $\mu\text{m}$  的 LMA 光纤构建环形腔,实现了输出功率为 4.9 W、偏振消光比为 18.7 dB 的单频激光,并且激光信号的低频强度/频率噪声相比泵浦激光被压缩了 10~15 dB,其实验装置和输出功率特性曲线如图 5 所示<sup>[82]</sup>。可以看出,由于该激光器结构不存在明显的热效应,更进一步的功率提升可以通过采用更大模场面积的光纤实现。另外,在基于 LMA 光纤的布里渊激光器中引入稀土掺杂光纤构建混合增益的激光器结构,有望在确保腔内斯托克斯光足够增益的同时,通过缩短腔长提升高阶 SBS 效应的阈值,获得更高功率的低噪声单频激光输出。

对于单频光纤激光放大器,其输出功率在 1.0  $\mu\text{m}$  和 2.0  $\mu\text{m}$  分别达到了 800 W<sup>[35]</sup> 和 600 W<sup>[83]</sup>,然而受限于 SBS、TMI 和光纤内的热效应等因素,以上功率记录在近 10 年内都未被打破。值得注意的是,近年来全光纤结构的单频激光放大器功率在这两个波段均有所提升<sup>[35-37,42-43]</sup>,但离最高记录尚有一定的差距,进一步的功率提升须对增益光纤以及放大器结构进行优化设计,在对 SBS 和 TMI 效应的抑制中取得平衡。事实上,随着近年来 LMA 光纤激光技术的发展,限制单频激光功率提升的主要限制因素已经由 SBS 转变为 TMI。比如,基于 LMA 锥形光纤在 1.0  $\mu\text{m}$  实现最高 550 W 输出功率的全光纤结构单频放大器系统,其功率进一步提升受限于 TMI 效应,而理论计算表明其 SBS 阈值在 2000 W 以上<sup>[84]</sup>。因此,该光纤结构还存在极大的优化空间,在适当降低 SBS 阈值的同时,提升 TMI 阈值,从而获得更大功率的单频激光输出。图 6 所示为保偏 LMA 锥形光纤在放大波长为 1064 nm 的激光信号时,其理论计算的 TMI 阈值随纤芯结构参数的变化趋势,可以看出通过选取合适的光纤结构参数可实现千瓦以上的全光纤单频激光放大。

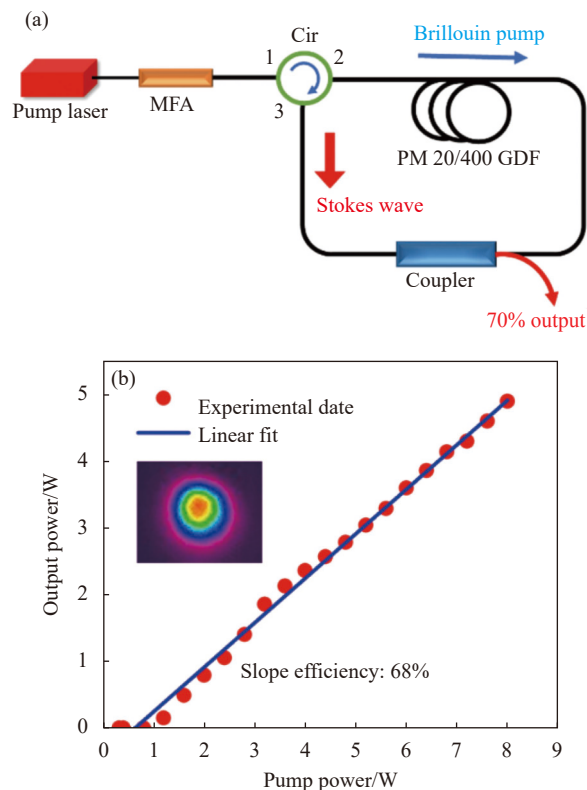


图 5 (a) 全光纤单频布里渊激光的实验装置图; (b) 输出功率随泵浦功率变换曲线,插图: 最大输出功率下的光斑图<sup>[82]</sup>

Fig.5 (a) Experimental setup of the all-fiber single-frequency Brillouin fiber laser; (b) Output power varying with pump power, inset: the beam profile of the output under highest output power<sup>[82]</sup>

对于光纤中 TMI 效应的抑制,研究人员还提出了主动控制技术。2013 年,德国耶拿大学课题组通过对光纤放大器的输出光斑进行诊断,并将诊断信息反馈到一个空间声光偏转器,用以动态切换种子光耦合进放大器光纤端面的位置,从而实现对有源 LMA 光纤中模场的控制并将 TMI 阈值提高了三倍<sup>[85]</sup>。之后在 2018 年,该课题组进一步提出对泵浦功率进行特定频率与幅度调制的方法,并在实验上将光纤放大器的 TMI 阈值提升了两倍<sup>[86]</sup>。可以看出,以上两种方法都可应用在基于 LMA 光纤的高功率单频激光放大器上,实现对系统 TMI 效应的抑制并成倍地提高输出功率。2020 年,该课题组提出激光低频强度噪声是诱导产生 TMI 的主要驱动因素之一,并在实验上进行了验证,因人为的劣化泵浦或种子源的强度噪声,放大器系统的 TMI 阈值则显著降低<sup>[87]</sup>。可以推断,通过对高功率单频光纤激光放大器的低频强度噪声进行压缩,可以实现对 TMI 效应的有效抑制,并获得更高

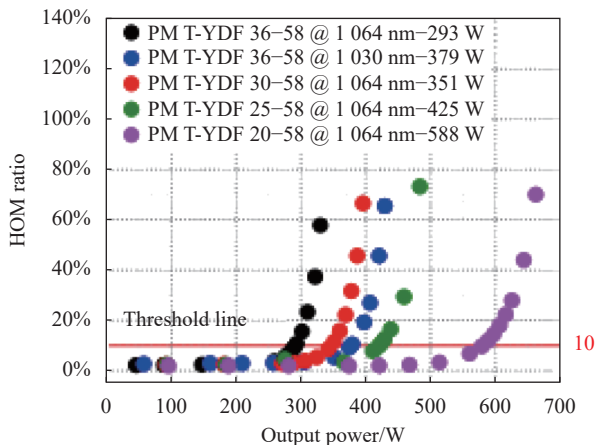


图 6 保偏 LMA 锥形光纤在不同纤芯结构参数下的理论 TMI 阈值<sup>[84]</sup>  
Fig.6 Theoretical TMI threshold of polarization maintaining LMA tapered fiber with different parameters of the core structure<sup>[84]</sup>

功率的低噪声单频激光输出。

在 2.0 μm 波段, 目前基于空间耦合和全光纤结构的放大器系统功率进一步提升主要受限于泵浦功率<sup>[42-43,83]</sup>。因此, 通过采用更高功率与亮度的 793 nm 泵浦源, 可基于两种光纤放大器结构突破现有的功率记录。另一个限制掺铥光纤放大器功率提升的因素为量子亏损引起的热效应<sup>[88]</sup>。尽管在采用 793 nm 激光泵浦时, 掺铥光纤中的交叉弛豫特性可有效提高系统的光光转换效率, 但是相比 976 nm 激光泵浦掺铥光纤来说, 通过量子亏损效应产生的热量提高了一倍以上。针对该问题, 研究人员提出了基于掺铥光纤激光的同带泵浦方案, 可有效缓解高功率掺铥光纤放大器的热效应<sup>[89-90]</sup>。因此, 随着高功率掺铥光纤激光技术的成熟, 利用同带泵浦方案可有效提高 2.0 μm 波段单频光纤放大器的输出功率, 而对于后续必然面临的 SBS 和 TMI 效应, 则可借鉴 1.0 μm 波段已有的技术对其进行抑制。

## 2.2 波长拓展

在波长拓展方面, 目前大部分稀土掺杂光纤的主要辐射能带均已实现了单频激光输出, 然而从整个光谱范围来看, 还有很大的区域未实现单频光纤激光运转。在近红外波段, 近年来获得快速发展的掺铥光纤展示出了其宽带辐射特性, 有望填补掺铥、铒和铒光纤辐射带宽之间的空白区域, 然而该类光纤目前所实现的增益系数极低 (不足 1 dB/m), 因此很难被用来构建激光腔结构实现单频激光输出<sup>[91-92]</sup>。利用光纤

SRS 效应理论上可以获得任意波长的单频激光, 前提是有合适波长的泵浦源、拉曼增益光纤以及相应的单频激光腔结构。然而, 稳定的单纵模运转要求激光腔长不能过长, 导致可利用的拉曼增益有限、输出激光功率较低。同时, 利用拉曼增益构建单频光纤激光放大器时, 受到 SBS 效应的限制, 增益光纤长度同样不能过长, 使得该类放大器的最大输出功率停留在数十瓦量级<sup>[2, 93-94]</sup>。此外, 受到高功率泵浦源以及拉曼增益光纤的限制, 目前拉曼单频光纤激光器与放大器的工作波长主要集中在 1.1 ~ 1.2 μm 范围内。除 SRS 以外, 基于光纤三阶非线性效应的光参量振荡器也可实现在较大光谱范围内的波长调谐。在参考文献 [95] 中, 通过对高非线性光纤的正常色散区进行高功率泵浦, 基于环形腔结构对输出信号实现了在泵浦波长两侧各 25 THz 范围的波长调谐 (如图 7 所示), 且输出功率大于 1.9 W, 而对应的泵浦中心波长则只变化了不到 16 nm。在此基础上, 可以通过在腔内引入窄带滤波单元, 实现宽波长调谐范围的单频激光运转。目前, 研究人员已经基于复合环形腔结构和未泵浦光纤中的瞬态光栅滤波效应, 基于全光纤结构的光参量振荡器实现了波长可调谐的单频激光输出<sup>[96-97]</sup>。除近红外波段以外, 得益于新型稀土掺杂氟化物光纤技术的发展, 研究人员已经在可见光波段 (如 575 nm<sup>[98]</sup>、635.5 nm<sup>[99]</sup>) 和中红外波段 (如 3.24 μm<sup>[100]</sup>、3.55 μm<sup>[101]</sup>) 均实现了瓦级以上的连续激光输出, 因此, 随着相应

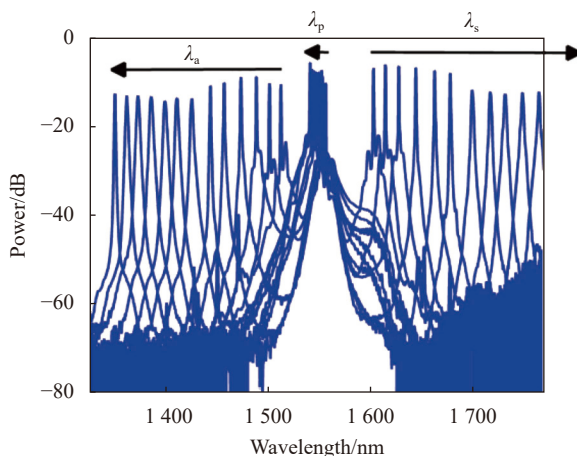


图 7 光纤参量振荡器在 1540.7~1556 nm 范围内 13 个不同波长激光泵浦下的输出光谱图<sup>[95]</sup>

Fig.7 Combined spectra of the output of the fiber optical parametric oscillator at 13 pump wavelengths between 1540.7 and 1556 nm<sup>[95]</sup>



光纤器件的成熟,未来单频光纤激光器的工作波长有望持续向可见光和中红外波段延伸。

### 2.3 性能提升

在性能提升方面,单频光纤激光的线宽压窄和噪声抑制是研究人员的永恒追求,同时也是应用领域对该类光源提出的普遍要求,目前从单个光纤谐振腔中输出的单频激光线宽已被压缩到了亚赫兹量级、频率噪声和强度噪声在中高频段也已被抑制到了散粒噪声极限附近<sup>[62-64]</sup>。更进一步的线宽压缩则要求更高精度的频率参考,而低频段以及极低频段的噪声抑制受复杂环境干扰以及热效应的影响更严重,也对相应的电子反馈系统和激光器结构设计提出了更高的要求<sup>[102-103]</sup>。近年来,研究人员采用量子压缩光技术将激光强度噪声压缩到了散粒噪声极限以下,这为未来利用传统降噪技术结合量子降噪技术持续提升单频光纤激光的噪声性能提供了更多可能性<sup>[104-105]</sup>。

对于单频光纤激光放大器,受到泵浦源功率起伏以及光纤内热效应、光子暗化等因素的影响,种子激光的线宽、噪声以及偏振度等性能会被显著劣化,并且劣化程度一般随放大倍数不断增大。2020年,德国马普所课题组采用平衡探测技术发现高稳定性种子源在经光纤放大后,其低频强度噪声高出探测极限近 60 dB,表明系统性能还存在极大的提升空间<sup>[106]</sup>。目前,研究人员已针对单频光纤激光放大过程中导致激光性能劣化的原因、以及具体劣化机制开展了大量研究,但对系统性能提升方面的研究则相对较少<sup>[107-110]</sup>。未来在单频光纤激光放大过程中的种子源性能保持方面,主要依赖于光纤以及放大器结构参数的综合优化。比如,研究人员近年来在 LMA 有源光纤光子暗化的抑制方面取得了显著进展,将有利于缓解放大过程中的热效应、效率下降以及偏振劣化等问题<sup>[111-112]</sup>。对光纤中的热效应,则可通过对放大器的泵浦/信号波长以及泵浦方式等进行优化设计,比如采用 1018 nm 激光进行同带泵浦可有效缓解由量子亏损引起的热量累积<sup>[113]</sup>。另外,针对泵浦激光低频功率起伏的光电反馈技术在近年来也在高功率单频光纤放大器上得到了成功实施,这在大幅度提升输出激光噪声性能的同时,还将有助于对 TMI 效应进行抑制,获得更高功率的高性能单频激光<sup>[109, 114-115]</sup>。为避免高功率运转下激光性能劣化更严重的问题,研究人员还提出将多

路中等功率的光纤放大器进行相干合成获得更高功率的高性能单频激光<sup>[115-116]</sup>。图 8 所示为德国汉诺威激光中心课题组将两路输出功率约 200 W 的光纤放大器合成后,获得的单频激光低频强度噪声与合成前激光信号的对比图,可以看出激光功率在翻倍以后其噪声性能并未发生劣化<sup>[116]</sup>。

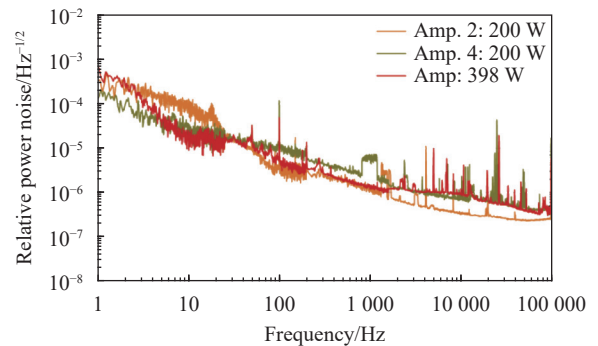


图 8 合成光束与单路光纤放大器的相对功率噪声对比图<sup>[116]</sup>

Fig.8 Relative power noise of the combined beam in comparison with the single amplifier performance<sup>[116]</sup>

### 3 结束语

自 1991 年 Ball 等人在掺铒石英光纤中刻入 FBG 实现 1550 nm 单纵模激光输出以来<sup>[117]</sup>,单频光纤激光技术已经经历了 30 年的发展,在单频光纤激光产生(连续和脉冲)、放大、波长拓展、性能提升等方面都获得了显著的进步。目前,单频光纤激光器已在相干光通信、高精度传感以及原子和分子光谱学等领域得到了成功应用,极大地推进了相关领域的技术进步。从发展趋势来看,未来将涌现出更加多元化的单频光纤激光实现形式,以及单纵模运转机制,如扫频、双向运转、多波长以及脉冲输出等;单频光纤激光谐振腔以及放大器的输出功率将继续提升,并且不同运转功率水平下的线宽压缩、噪声抑制、长时间可靠性等方面的激光性能提升也将是研究人员的重要课题;随着相关光纤以及器件技术的发展,单频光纤激光输出波长将继续向可见光以及中红外波段拓展;基于单频光纤激光的相干合成将突破单路激光的功率提升限制,同时通过对多路中等功率的高性能单频激光进行合成,也为获得更高功率的高性能单频光纤激光提供了一种重要手段;最后,随着单频光纤激光应用的广度和深度持续加强,同时也将对光源提出个性化的

并且更高的要求,从而促进单频光纤激光技术的不断发展。

#### 参考文献:

- [1] Yang Z, Li C, Xu S, et al. Single-Frequency Fiber Lasers [M]//Optical and Fiber Communications Reports (OFCR, volume 8). Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019.
- [2] Fu S, Shi W, Feng Y, et al. Review of recent progress on single-frequency fiber lasers [J]. *Journal of Optical Society of America B*, 2017, 34: A49-A62.
- [3] Yang C, Cen X, Xu S, et al. Research progress of single-frequency fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0114002. (in Chinese)
- [4] Ma P, Chang H, Ma Y, et al. 7.1 kW coherent beam combining system based on a seven-channel fiber amplifier array [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 140: 107016.
- [5] Bode N, Meylahn F, Willke B. Sequential high power laser amplifiers for gravitational wave detection [J]. *Optics Express*, 2020, 28: 29469-29478.
- [6] Vercesi V, Onori D, Laghezza F, et al. Frequency-agile dual-frequency lidar for integrated coherent radar-lidar architectures [J]. *Optics Letters*, 2015, 40: 1358-1361.
- [7] Ma Y, Wang X, Leng J, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique [J]. *Optics Letters*, 2011, 36: 951-953.
- [8] Castelveccchi Davide. Gravitational-wave observatory LIGO set to double its detecting power [J]. *Nature*, 2019, 566: 305.
- [9] Li Z, Duan H, Huang X, et al. Design and performance test of the spaceborne laser in the TianQin-1 mission [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 141: 107155.
- [10] Wang J, Hou Y, Zhang Q, et al. High-power, high signal-to-noise ratio single-frequency 1  $\mu\text{m}$  Brillouin all-fiber laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23: 28978-28984.
- [11] Chen M, Meng Z, Wang J, et al. Strong linewidth reduction by compact Brillouin/erbium fiber laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6: 1-8.
- [12] Shi C, Sheng Q, Fu S, et al. Power scaling and spectral linewidth suppression of hybrid Brillouin/thulium fiber laser [J]. *Optics Express*, 2020, 28: 2948-2955.
- [13] Gu J, Yang Y, Liu M, et al. A switchable and stable single-longitudinal-mode, dual-wavelength erbium-doped fiber laser assisted by Rayleigh backscattering in tapered fiber [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118: 103107.
- [14] Zhu T, Zhang B, Shi L, et al. Tunable dual-wavelength fiber laser with ultra-narrow linewidth based on Rayleigh backscattering [J]. *Optics Express*, 2016, 24: 1324.
- [15] Shawki H, Kotb H, Khalil A. Single-longitudinal-mode broadband tunable random laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42: 3247.
- [16] Wang Q, Song H, Wang X, et al. Experiments and analysis of tunable monolithic 1-m single-frequency fiber lasers with loop mirror filters [J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 884.
- [17] Wang K, Lu B, Qi X, et al. Wavelength-tunable single-frequency ytterbium-doped fiber laser based on a double-circulator interferometer [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16: 015104.
- [18] 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]. *Optics Express*, 2019, 27: 15794.
- [19] Lim S, Yoo J, Kim S. Widely tunable watt-level single-frequency Tm-doped fiber ring laser as pump for Mid-IR frequency generation [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8: 1502006.
- [20] Wang K, Wen Z, Chen H, et al. Single-frequency all-polarization-maintaining ytterbium-doped bidirectional fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2021, 46: 404.
- [21] Yin B, Feng S, Liu Z, et al. Tunable and switchable dual-wavelength single polarization narrow linewidth SLM erbium-doped fiber laser based on a PM-CMFBG filter [J]. *Optics Express*, 2014, 22: 22528.
- [22] Yin B, Liu Z, Feng S, et al. Stable single-polarization single-longitudinal-mode linear cavity erbium-doped fiber laser based on structured chirped fiber Bragg grating [J]. *Applied Optics*, 2015, 54: 6.
- [23] Yan F, Peng W, Liu S, et al. Dual-wavelength single-longitudinal-mode Tm-doped fiber laser using PM-CMFBG [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27: 951.
- [24] Wen Q, Sun Z, Gan Y, et al. Sub-kilohertz linewidth fiber laser by using Bragg grating filters [J]. *Applied Optics*, 2021, 60: 4299.
- [25] Lu B, Yuan L, Qi X, et al. MoS<sub>2</sub> saturable absorber for single frequency oscillation of highly Yb-doped fiber laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14: 071404.
- [26] Liu X, Ji L, Zhu F, et al. Linear-cavity-based single frequency fiber laser with a loop mirror and Ti<sub>2</sub>C<sub>2</sub>x quantum dots [J].

- Optical Materials*, 2021, 122: 111686.
- [27] Wei Z, Chen S, Ding J, et al. Recent advance in tunable single-frequency fiber laser based on two-dimensional materials [J]. *Frontiers of Physics*, 2021, 8: 580602.
- [28] Fu P, Feng X, Lu B, et al. Switchable dual-wavelength SLM narrow linewidth fiber laser based on nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 98: 56.
- [29] Xu S, Yang Z, Zhang W, et al. 400 mW ultrashort cavity low-noise single-frequency Yb<sup>3+</sup>-doped phosphate fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2011, 36: 3708.
- [30] Hofmann P, Voigtlander C, Nolte S, et al. 550-mW output power from a narrow linewidth all-phosphate fiber laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31: 756.
- [31] 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]. *Optics Express*, 2018, 26: 6817.
- [32] Fu S, Zhu X, Zong J, et al. Diode-pumped 1.15 W linearly polarized single-frequency Yb<sup>3+</sup>-doped phosphate fiber laser [J]. *Optics Express*, 2021, 29: 30637.
- [33] Zhang L, Zhang J, Sheng Q, et al. Watt-level 1.7- $\mu$ m single-frequency thulium-doped fiber oscillator [J]. *Optics Express*, 2021, 29: 27048.
- [34] Zhang J, Sheng Q, Zhang L, et al. 2.56 W single-frequency all-fiber oscillator at 1720 nm [J]. *Advanced Photonics Research*, 2022, 3(2): 2100256.
- [35] Robin C, Dajani I, Pulford B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811 W output power [J]. *Optics Letters*, 2014, 39: 666.
- [36] Huang L, Wu H, Li R, et al. 414 W near-diffraction-limited all-fiberized single-frequency polarization-maintained fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2017, 41: 1.
- [37] Lai W, Ma P, Liu W, et al. 550 W single frequency fiber amplifiers emitting at 1030 nm based on a tapered Yb-doped fiber [J]. *Optics Express*, 2020, 28: 20908.
- [38] An Y, Pan Z, Yang H, et al. 400-W single-mode single-frequency laser output from homemade tapered fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(20): 204024. (in Chinese)
- [39] Shi C, Fu S, Deng X, et al. 435 W single-frequency all-fiber amplifier at 1064 nm based on cascaded hybrid active fibers [J]. *Optics Communications*, 2022, 502: 127428.
- [40] Xue M, Gao C, Niu L, et al. A 51.3 W, sub-kHz-linewidth linearly polarized all-fiber laser at 1560 nm [J]. *Laser Physics*, 2020, 30: 035104.
- [41] Guan X, Zhao Q, Lin W, et al. High-efficiency and high-power single-frequency fiber laser at 1.6  $\mu$ m based on cascaded energy-transfer pumping [J]. *Photonics Research*, 2020, 8: 414.
- [42] Wang X, Jin X, Wu W, et al. 310-W single frequency Tm-doped all-Fiber MOPA [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27: 677.
- [43] Guan X, Yang C, Gu Q, et al. 316 W high-brightness narrow-linewidth linearly-polarized all-fiber single frequency-laser at 1950 nm [J]. *Applied Physics Express*, 2021, 14: 112004.
- [44] Yang C, Zhao Q, Feng Z, et al. 1120 nm kHz-linewidth single-polarization single-frequency Yb-doped phosphate fiber laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24: 29794.
- [45] Honzatko P, Baravets Y, Myakalwar A. Single-frequency fiber laser based on a fiber ring resonator filter tunable in a broad range from 1023 nm to 1107 nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43: 1339.
- [46] Tao Y, Zhang S, Jiang M, et al. High power and high efficiency single-frequency 1030 nm DFB fiber laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 145: 107519.
- [47] Tao Y, Jiang M, Li C, et al. Low threshold 1150 nm single-polarization single-frequency Yb-doped DFB fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2021, 46: 3705.
- [48] Huang L, Yang C, Tan T, et al. Sub-kHz-linewidth wavelength-tunable single-frequency ring-cavity fiber laser for C- and L-band operation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39: 4794.
- [49] Walasik W, Traoré D, Amavigan A, et al. 2- $\mu$ m narrow linewidth all-fiber DFB fiber Bragg grating lasers for Ho- and Tm-doped fiber-amplifier applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39: 5096.
- [50] Cen X, Guan X, Yang C, et al. Short-wavelength, in-band-pumped single-frequency DBR Tm<sup>3+</sup>-doped germanate fiber laser at 1.7  $\mu$ m [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33: 350.
- [51] Mollae M, Zhu X, Zong J, et al. Single-frequency blue laser fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2018, 43: 423.
- [52] Fang Q, Xu Y, Fu S, et al. Single-frequency distributed Bragg reflector Nd doped silica fiber laser at 930 nm [J]. *Optics Letters*, 2016, 41: 1829.
- [53] Fu S, Zhu X, Zong J, et al. Single-frequency Nd<sup>3+</sup>-doped phosphate fiber laser at 915 nm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39: 1808.

- [54] Zhu X, Zong J, Miller A, et al. Single-frequency Ho<sup>3+</sup>-doped ZBLAN fiber laser at 1200 nm [J]. *Optics Letters*, 2012, 37: 4185.
- [55] Bernier M, Michaud-Belleau V, Levasseur S, et al. All-fiber DFB laser operating at 2.8 μm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40: 81.
- [56] Hudson D, Williams J, Withford J, et al. Single-frequency fiber laser operating at 2.9 μm [J]. *Optics Letters*, 2013, 38: 2388.
- [57] Loranger S, Karpov V, Schinn G, et al. Single-frequency low-threshold linearly polarized DFB Raman fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2017, 42: 3864.
- [58] Wu J, Zhu X, Wei H, et al. Power scalable 10 W 976 nm single-frequency linearly polarized laser source [J]. *Optics Letters*, 2018, 43: 951.
- [59] Gouhier B, Guiraud G, Rota-Rodrigo S, et al. 25 W single-frequency, low noise fiber MOPA at 1120 nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43: 308.
- [60] Gouhier B, Dixneuf C, Hilico A, et al. Low Intensity noise high-power tunable fiber-based laser around 1007 nm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37: 3539.
- [61] Gouhier B, Rota-Rodrigo S, Guiraud G, et al. Low-noise single-frequency 50 W fiber laser operating at 1013 nm [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16: 045103.
- [62] Yao B, Chen Q, Chen Y, et al. 280 mHz linewidth DBR fiber laser based on PDH frequency stabilization with ultrastable cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(5): 0501014.
- [63] Zhao Q, Zhang Z, Wu B, et al. Noise-sidebands-free and ultra-low-RIN 1.5 μm single-frequency fiber laser towards coherent optical detection [J]. *Photonics Research*, 2018, 6: 326.
- [64] Zhao Q, Zhou K, Wu Z, et al. Near quantum-noise limited and absolute frequency stabilized 1083 nm single-frequency fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43: 42.
- [65] Qi Z, Yin T, Jiang X, et al. Narrow-linewidth high-efficiency single-frequency ytterbium-doped fiber laser with highly linear polarization at 1064 nm [J]. *Applied Optics*, 2021, 60: 2833.
- [66] Hao L, Wang X, Jia K, et al. Narrow-linewidth single-polarization fiber laser using non-polarization optics [J]. *Optics Letters*, 2021, 46: 3769.
- [67] Liu H, Lu Q, Wei S, et al. Long-term stable 850-Hz linewidth single-longitudinal-mode ring cavity fiber laser using polarization-maintaining fiber [J]. *Applied Physics B*, 2020, 126: 106.
- [68] Yang C, Xu S, Chen D, et al. 52 W kHz-linewidth low-noise linearly-polarized all-fiber single-frequency MOPA laser [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18: 055801.
- [69] Wellmann F, Steinke M, Meylahn F, et al. High power, single-frequency, monolithic fiber amplifier for the next generation of gravitational wave detectors [J]. *Optics Express*, 2019, 27: 28523.
- [70] 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]. *Optics Express*, 2020, 28: 10960.
- [71] Darwich D, Bardin Y, Goepfner M, et al. Ultralow-intensity noise, 10 W all-fiber single-frequency tunable laser system around 1550 nm [J]. *Applied Optics*, 2021, 60: 8550.
- [72] Zhang Q, Hou Y, Wang X, et al. 5 W ultra-low-noise 2 μm single-frequency fiber laser for next-generation gravitational wave detectors [J]. *Optics Letters*, 2020, 45: 4911.
- [73] Hou Y, Zhang Q, Qi S, et al. 1.5 μm polarization-maintaining dual-wavelength single-frequency distributed Bragg reflection fiber laser with 28 GHz stable frequency difference [J]. *Optics Letters*, 2018, 43: 1383.
- [74] Budamykh A, Vladimirskaia A, Lobach I, et al. Broad-range self-sweeping single-frequency linearly polarized Tm-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43: 5307.
- [75] Kashirina E, Lobach I, and Kablukov S. Single-frequency self-sweeping Nd-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2019, 44: 2252.
- [76] Li K, Deng H, Yang C, et al. Multi-wavelength, passively Q-switched, single-frequency fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31: 1479.
- [77] Huang L, Guan Z, Yang C, et al. High-precision tunable single-frequency fiber laser at 1.5 μm based on self-injection locking [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 34(12): 633-636.
- [78] Bai Z, Jin D, Ding J, et al. Brillouin laser power exceeds 20 W [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2116003. (in Chinese)
- [79] Guo Y, Xu M, Peng W, et al. Realization of a 101 W single-frequency continuous wave all-solid-state 1064 nm laser by means of mode self-reproduction [J]. *Optics Letters*, 2018, 43: 6017.
- [80] Peng W, Jin P, Li F, et al. A review of the high-power all-solid-state single-frequency continuous-wave laser [J]. *Micro-machines*, 2021, 12: 1426.
- [81] Schülzgen A, Li L, Temyanko V, et al. Single-frequency fiber oscillator with watt-level output power using photonic crystal

- phosphate glass fiber [J]. *Optics Express*, 2006, 14: 7087.
- [82] Tao Y, Jiang M, Liu L, et al. Single-polarization single-frequency Brillouin fiber laser emits near 5-W power at 1  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2022, 47: 1742.
- [83] Goodno G, Book L, Rothenberg J. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2009, 34: 1204.
- [84] Huang L, Lai W, Ma P, et al. Tapered Yb-doped fiber enabled monolithic high-power linearly polarized single-frequency laser [J]. *Optics Letters*, 2020, 45: 4001.
- [85] Otto H, Jauregui C, Stutzki F, et al. Controlling mode instabilities by dynamic mode excitation with an acousto-optic deflector [J]. *Optics Express*, 2013, 21: 17285.
- [86] Jauregui C, Stihler C, Tünnermann A, et al. Pump-modulation-induced beam stabilization in high-power fiber laser systems above the mode instability threshold [J]. *Optics Express*, 2018, 26: 10691.
- [87] Stihler C, Jauregui C, Kholaf S, et al. Intensity noise as a driver for transverse mode instability in fiber amplifiers [J]. *PhotonIX*, 2020, 1: 8.
- [88] Sincore A, Bradford J, Cook J, et al. High average power thulium-doped silica fiber lasers: Review of systems and concepts [J]. *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 24: 0901808.
- [89] Creedon D, Johnson B, Setzler S, et al. Resonantly pumped Tm-doped fiber laser with >90% slope efficiency [J]. *Optics Letters*, 2014, 39: 470.
- [90] Wang Y, Yang J, Huang C, et al. High power tandem-pumped thulium-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23: 2991.
- [91] Dianov E. Bismuth-doped optical fibers: A challenging active medium for near-IR lasers and optical amplifiers [J]. *Light-Science & Applications*, 2012, 1: e12.
- [92] Thipparapu N, Wang Y, Umnikov A, et al. Bi-doped fiber amplifiers and lasers [Invited] [J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9: 2446.
- [93] Zhang L, Jiang H, Cui S, et al. Versatile Raman fiber laser for sodium laser guide star [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8: 889.
- [94] Miao Y, Ma P, Liu W, et al. First demonstration of co-pumped single-frequency Raman fiber amplifier with spectral-broadening-free property enabled by ultra-low noise pumping [J]. *IEEE Access*, 2019, 6: 71988.
- [95] Xu Y, Mak K, and Murdoch S. Multiwatt level output powers from a tunable fiber optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2011, 36: 1966.
- [96] Yang S, Cheung K, Zhou Y, et al. Tunable single-longitudinal-mode fiber optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2010, 35: 481.
- [97] Lim L, Abu Bakar M, and Mahdi M. Wavelength-tunable single longitudinal mode fiber optical parametric oscillator [J]. *Optics Express*, 2017, 25: 5501.
- [98] Zou J, Li T, Dou Y, et al. Direct generation of watt-level yellow  $\text{Dy}^{3+}$ -doped fiber laser [J]. *Photonics Research*, 2021, 9: 446.
- [99] Lord M, Fortin V, Maes F, et al. 2.3 W monolithic fiber laser operating in the visible [J]. *Optics Letters*, 2021, 46: 2392.
- [100] Fortin V, Jobin F, Larose M, et al. 10-W-level monolithic dysprosium-doped fiber laser at 3.24  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2019, 44: 491.
- [101] Lemieux-Tanguay M, Fortin V, Boilard T, et al. 15 W monolithic fiber laser at 3.55  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2022, 47: 289.
- [102] Häfner S, Falke S, Grebing C, et al.  $8 \times 10^{-17}$  fractional laser frequency instability with a long room-temperature cavity [J]. *Optics Letters*, 2015, 40: 2112.
- [103] Dahl K, Cebeci P, Fitzau O, et al. A new laser technology for LISA [C]//International Conference on Space Optics, 2018: 111800 C.
- [104] Vahlbruch H, Wilken D, Mehmet M, et al. Laser power stabilization beyond the shot noise limit using squeezed light [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121: 173601.
- [105] Wang Y, Gao L, Zhang X, et al. Recent development of low noise laser for precision measurement (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201073. (in Chinese)
- [106] Popp A, Distler V, Jaksch K, et al. Quantum-limited measurements of intensity noise levels in Yb doped fiber amplifiers [J]. *Applied Physics B*, 2020, 126: 130.
- [107] Tünnermann H, Neumann J, Kracht D, et al. Gain dynamics and refractive index changes in fiber amplifiers: a frequency domain approach [J]. *Optics Express*, 2012, 20: 13539.
- [108] Tünnermann H, Neumann J, Kracht D, et al. Frequency resolved analysis of thermally induced refractive index changes in fiber amplifiers [J]. *Optics Letters*, 2012, 37: 3597.
- [109] Zhao J, Guiraud G, Floissat F, et al. Gain dynamics of clad-pumped Yb-fiber amplifier and intensity noise control [J]. *Optics Express*, 2017, 25: 357.

- [110] Gierschke P, Jauregui C, Gottschall T, et al. Relative amplitude noise transfer function of an Yb<sup>3+</sup>-doped fiber amplifier chain [J]. *Optics Express*, 2019, 27: 17041.
- [111] Zhao N, Li W, Li J, et al. Elimination of the photodarkening effect in an Yb-doped fiber laser with deuterium [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37: 3021.
- [112] Zhao N, Peng K, Li J, et al. Photodarkening effect suppression in Yb-doped fiber through the nanoporous glass phase-separation fabrication method [J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9: 1085.
- [113] Theeg T, Ottenhues C, Sayinc H, et al. Core-pumped single-frequency fiber amplifier with an output power of 158 W [J]. *Optics Letters*, 2016, 41: 9.
- [114] Zhao J, Guiraud G, Pierre C, et al. High-power all-fiber ultra-low noise laser [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124: 114.
- [115] Wei L, Cleva F, Nary Man C. Coherently combined master oscillator fiber power amplifiers for Advanced Virgo [J]. *Optics Letters*, 2016, 41: 5817.
- [116] Wellmann F, Bode N, Wessels P, et al. Low noise 400 W coherently combined single frequency laser beam for next generation gravitational wave detectors [J]. *Optics Letters*, 2021, 29: 10140.
- [117] Ball G, Morey W, Glenn W. Standing-wave monomode erbium fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, 3: 613.