

高性能单频光纤激光器研究进展: 2017-2021(特邀)

史 伟*, 付士杰*, 盛 泉, 史朝督, 张钧翔, 张 露, 姚建铨

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘 要: 单频光纤激光器以其独特的窄线宽、低噪声的激光特性, 结合光纤系统高光束质量、高集成性以及免维护等应用优势, 在冷原子物理、高分辨光谱分析、引力波探测以及远距离相干通信等前沿科学研究和应用领域具有广泛前景。伴随着光纤激光技术的快速发展, 单频光纤激光器的性能在过去的二十年间得到了长足进步, 单频光纤激光技术的基本体系逐渐建立。近年来, 研究人员围绕高性能单频光纤激光器开展了一系列创新工作, 在探索单频光纤激光的新机制、新结构, 提升单频激光功率、压缩线宽、抑制噪声以及拓展工作波段等方面取得了不俗的研究成果。为此, 笔者系统总结分析了近五年来高性能单频光纤激光器的研究进展, 及时捕捉当前单频光纤激光领域研究趋势及所面临的新的发展瓶颈, 并对单频光纤激光技术在新阶段的发展方向进行了展望。

关键词: 单频激光; 光纤激光器; 光纤放大器; 主振荡功率放大

中图分类号: TN248; TN242 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210905

Research progress on high-performance single-frequency fiber lasers: 2017-2021 (Invited)

Shi Wei*, Fu Shijie*, Sheng Quan, Shi Chaodu, Zhang Junxiang, Zhang Lu, Yao Jianquan

(School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Single-frequency fiber lasers have attracted extensive attention due to distinctive laser properties on narrow linewidth, low noise, as well as preferred all-fiber structure with good beam quality, high compactness and free of maintenance, which can find widespread applications from advanced scientific research to practical applications including cold atom physics, high resolution spectroscopy, gravitational wave detection, long-distance coherent communications, and so on. Along with the rapid development of fiber laser technique, the performance of single-frequency fiber laser has been improved significantly in the last two decades and the related basic techniques have been built up systematically. Recently, a series of creative research works have been demonstrated in the area of high-performance single-frequency fiber lasers, where impressive progress has been made on newly developed mechanism and structure for single-frequency laser generation, performance improvement on laser power increment, linewidth narrowing, noise suppression as well as operation wavelength extension. Therefore, the research progress on high-performance single-frequency fiber lasers in recent five years was reviewed to reveal current trend in this area as well as the new bottleneck so as to point out the prospect on possible development routine in near future.

Key words: single-frequency laser; fiber laser; fiber amplifier; master oscillator and power amplifier

收稿日期: 2021-11-26; 修订日期: 2022-01-06

基金项目: 国家自然科学基金 (62105240, 62075159, 61975146)

通讯作者: 史伟, 男, 教授, 博士, 主要从事高性能光纤激光技术和太赫兹技术方面的研究。

付士杰, 男, 副研究员, 博士, 主要从事单频光纤激光技术、新型光纤功能器件方面的研究。

0 引言

光纤激光器凭借其特殊的光波导结构,在热管理、光束质量控制以及系统集成性和稳定性等方面相对传统激光器展现出显著的应用优势,在过去的二十年间实现了跨越式发展,成为当前从基础科学研究到广泛工业应用极富竞争力的高性能激光光源^[1]。特别是伴随着高亮度半导体泵浦源和双包层光纤制备工艺的进步,光纤激光技术得到了长足的发展。其中,单频光纤激光器以其窄线宽、低噪声等优异性能,在原子物理、高分辨光谱分析、激光相干雷达以及引力波探测等领域得到了重要的应用。与此同时,为满足具体应用场景的分辨能力、探测灵敏度和精度、距离以及范围要求,相关应用对单频光纤激光器在功率、线宽、噪声以及系统集成等方面的性能指标提出了更高的要求,驱动高性能单频光纤激光器快速发展。

近年来,包括英国南安普敦大学、德国汉诺威激光中心、天津大学、国防科技大学和华南理工大学在内的国内外多个课题组先后对单频光纤激光器的研究进展作了综述性报道^[2-6]。笔者课题组也在 2017 年的综述文章中系统介绍了单频光纤振荡器及放大器的关键技术、研究历程以及标志性的研究成果^[4]。但总的来看,单频光纤激光器的发展仍存在一定的局限性。一方面,单频光纤激光的实现机制仍相对固化,主要集中于基于线形腔的分布布拉格反射式 (DBR) 和分布反馈式 (DFB) 单频激光,以及基于环形腔结合窄带滤波器件的单频激光结构。前者的短腔结构严重限制了有源光纤的长度,往往需要采用具有高稀土离子掺杂能力的多组分玻璃光纤提高增益,其机械强度和系统损耗仍需得到进一步改善;环形腔结构虽不存在对有源光纤长度的严苛限制,但相应地面临着长腔条件下的纵模稳定性问题。另一方面则体现在具体的单频激光性能指标上。目前单频光纤激光输出波长仍局限于典型稀土离子的发射峰,如掺镱光纤的 1 μm 波段,掺铒光纤的 1.5 μm 波段,以及掺铥光纤的 1.9 μm 波段,单频激光波长的拓展仍需引入新型发光材料和新实现机制。在高功率单频光纤激光方面,基于全光纤结构的瓦级单频光纤振荡器以及千瓦级单频光纤放大器仍面临着高增益下的热平衡、受激布里渊散射效应 (SBS) 以及模式不稳定 (MI) 等多种挑

战。此外,赫兹量级超窄线宽以及近背景超低噪声的单频光纤激光的实现仍需从理论机理到系统控制的全链条突破提升。

近年来,随着光纤激光技术的进一步发展完善,高性能单频光纤激光器的研究出现了一系列可喜的进展,在新型单频实现机制、光纤激光材料的引入,在高功率、窄线宽、低噪声以及波长拓展等性能指标提升方面均取得了一定的突破。为此,文中在笔者课题组 2017 年发表的单频光纤激光器综述文章^[4]的基础上,对近五年来高性能单频光纤激光器的新进展进行了总结分析,及时捕捉当前单频光纤激光领域的研究趋势及所面临的新的发展瓶颈,并对单频光纤激光技术下一步的发展方向作了展望。

1 基于新结构、新材料的单频光纤激光器

如文中所述,当前单频光纤激光器的实现机制主要分为依赖超短腔增加纵模间距的 DBR 结构,利用相移光栅超窄带滤波特性的 DFB 结构,以及结合法布里-玻罗干涉仪、未泵浦掺杂光纤或高瑞利散射系数光纤等窄带滤波器件的环形腔结构。在此基础上,研究人员提出了一系列结合新材料的改进结构设计。2017 年,加拿大蒙特利尔理工学院的 S. Loranger 等人报道了基于高非线性光纤的低阈值单频 DFB 拉曼光纤激光器,通过在 30 cm 长高非线性光纤内刻入 π 相移光栅,获得了 1 120 nm 单频拉曼激光输出,激光阈值仅为 350 mW^[7]。该工作利用特殊光纤的高非线性增益特性结合 DFB 结构的超窄滤波特性为拓展单频光纤激光输出波长提供了新的技术途径,但高功率下光纤内部的热梯度以及克尔效应导致的非线性啁啾造成 DFB 结构窄带透射特性的失效,因此该单频拉曼光纤激光器的最高输出功率仅为 50 mW。

在环形腔单频光纤激光器方面,除了前述常见窄带滤波器件作为选频工具外,具有非线性光学特性的二维材料近来被引入到光纤激光领域以实现激光器的单纵模运转。如 2019 年深圳大学的 Z. Sun 等人通过在 D 型光纤表面涂敷一层金属-有机框架材料,利用其饱和吸收特性实现超窄带选频,结合光纤光栅滤波,最终获得线宽为 3.2 kHz 的 1 550 nm 单频激光输出^[8]。二维材料普遍具有宽带透射能力,采用其构建基于光纤结构的超窄带滤波器可在多个激光波段得

到应用,相比传统光纤滤波器件具有广泛适用性的优势,但热损伤阈值低以及热稳定性差等因素仍是其实现高功率单频激光振荡器的应用壁垒。此外,基于回廊模谐振的光学微腔凭借其超高 Q 值(可达 10^{11})特性也被应用于实现窄线宽单频光纤激光器^[9]。如图 1 所示,2014 年马克斯-普朗克研究所的 M. C. Collodo 等人利用一 Q 值为 10^8 的 CaF_2 回廊模微腔作为掺铒环形腔光纤激光器的窄带选频器件,实现了线宽为 650 Hz 的单频激光输出,激光线宽相较于无源光学微腔本身的滤波带宽提高了三个数量级^[10]。高 Q 值微腔的应用能够显著压缩单频光纤激光的线宽,提升激光频率稳定性,但鉴于光学微腔对热效应较为敏感,当前基于高 Q 值微腔结构的单频激光源输出功率普遍较低,且其窄带滤波特性依赖于光学微腔与光纤的高精度耦合,使其难以适应复杂环境的应用。

高性能单频光纤激光器的快速发展,一方面依赖于器件性能提升以及腔型结构优化,另一方面则取决于高质量、高增益有源光纤的发展。近年来随着石英玻璃组分的优化工艺以及基于改进的化学气相沉积法(MCVD)的高纯度光纤预制棒制备技术的逐渐成熟,商用稀土掺杂石英玻璃光纤的增益水平得到显著提升,基于此类有源光纤构建的短腔型单频光纤激光器输出功率已达百 mW 量级^[11-12]。此外,全石英玻璃基质光纤激光系统所具有的熔接损耗低、系统稳定性高等特点在实际应用中展现出明显的优势。但单频光纤激光器功率的进一步提升目前仍主要依赖于高稀土离子掺杂浓度的多组分软玻璃光纤^[13-14]。早在 2006 年,美国亚利桑那大学 A. Schülzgen 等人利用 3.8 cm 高掺铒磷酸盐光子晶体光纤,已实现 1.5 μm 波段高达 2.3 W 的单频激光功率输出^[15]。但不同种光纤间的熔接导致激光器损耗达到 7.7 dB,激光转换效率仅为 12%,且高功率下熔接点处严重的热效应制约着激光功率及单纵模运转的稳定性。近年来,研制与石英玻璃光纤相兼容的新型高增益光纤材料并实现高功率单频光纤激光成为高性能单频光纤激光领域新的研究思路。2009 年,美国克莱姆森大学的 J. Ballato 等人首次制备了以 Er:YAG 晶体为纤芯材料、石英玻璃为包层材料的光纤结构,试图利用 YAG 晶体材料较为优越的导热系数以及高稀土离子掺杂能力(50 wt.% Er^{3+}),结合石英包层结构设计获得与传统石英光纤系统高度兼容的高功率光纤激光器^[16],这类光纤之后被统称为晶体衍生石英光纤(crystal-derived silica fiber)。2018 年,华南理工大学 Y. Zhang 等人制备了 Yb^{3+} 掺杂浓度为 2.61 wt.% 的 YAG 晶体衍生光纤,测得其在 1064 nm 处的增益系数可达 3 dB/cm,并利用 1.7 cm 长增益光纤实现 1064 nm DBR 型单频光纤激光器,但该晶体衍生光纤 20 μm 的纤芯直径仍与激光系统中其他石英光纤存在较大的模场失配损耗,实验获得的激光效率仅为 3.8%^[17]。2019 年,山东大学的 Z. Liu 等人通过降低晶体衍生光纤与石英光纤纤芯尺寸的失配,利用 14 mm 长掺杂浓度为 4.8 wt.% 的 Yb:YAG 晶体衍生石英光纤首次实现了百 mW 量级单频光纤激光^[18]。但由于晶体本身的折射率与石英玻璃存在较大差异,该晶体衍生光纤的数

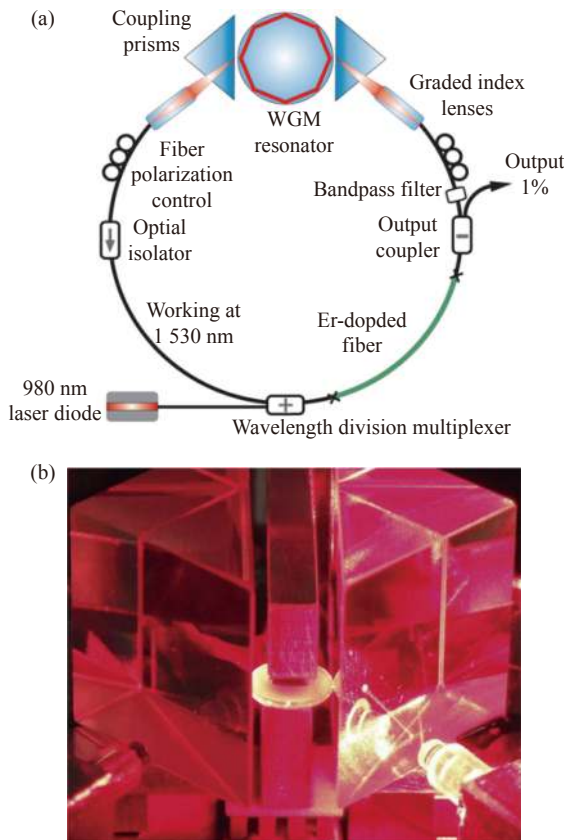


图 1 (a) 基于回廊模微腔的窄线宽单频(掺 Er^{3+}) 光纤激光器装置图;
(b) 回廊模谐振腔实物图^[10]

Fig.1 (a) Schematic of the narrow-linewidth single-frequency Er^{3+} -doped fiber laser based on a whispering gallery mode (WGM) micro-resonator; (b) Photograph of the WGM resonator^[10]

值孔径高达 0.42, 因此, 模场失配带来的损耗仅通过光纤尺寸的匹配难以消除, 18.5% 的单频激光斜率效率仍低于基于全石英光纤的单频光纤激光系统^[12]。2021 年, 上海大学 Y. Wan 等人通过进一步提高 YAG 晶体中镱离子的掺杂浓度 (达 5.66 wt.%) 获得了 1030 nm 处最高 255 mW 的单频激光输出功率, 斜率效率为 35%, 光纤结构及拉直过程如图 2 所示^[19]。此外, 在 1.5 μm 波段, 2021 年, 山东大学 Y. Xie 等人系统研究了不同铒离子掺杂浓度下 Er:YAG 晶体衍生光纤的增益特性, 在 5 at.% 的铒离子掺杂浓度下测得 1550 nm 处最高 1.46 dB/cm 的增益系数; 实验中研究人员利用 1.8 cm 长掺铒光纤获得了 25 mW 的单频激光功率, 斜率效率为 15.1%^[20]。总的来看, 晶体衍生光纤作为一种新兴的复合型光纤材料在近年来得到快速发展, 并为单频光纤激光的实现提供了新的研究思路, 国内包括山东大学、上海大学在内的多个课题组在该研究方向取得了一系列成果。但需指出的是, 基于稀土掺杂晶体衍生光纤的单频光纤激光器系统损耗仍较为严重、激光增益尚不充分, 有源光纤在组分优化、增益系数提升以及模场匹配等方面仍有较大优化提升空间。

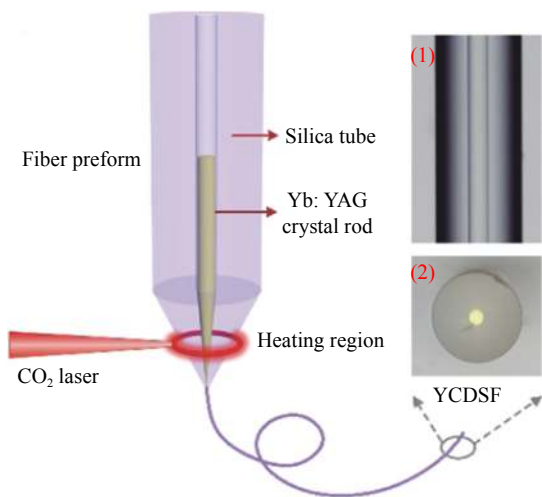


图 2 Yb:YAG 晶体衍生石英光纤拉制示意图; 预制棒纤芯材料为 YAG 晶体, 包层材料为石英玻璃; (1)、(2) 分别为晶体衍生光纤的侧面图和截面图^[19]

Fig.2 Schematic diagram of Yb³⁺-doped crystal-derived silica fiber fabrication using the preform with a YAG crystal core and a silica cladding, where the insets are the optical images of the (1) side view and (2) cross-sectional view of the crystal-derived silica fiber^[19]

2 高功率单频光纤振荡器

高功率的单频激光振荡器凭借其优异的光谱纯净度在高分辨率计量和光谱分析, 高精度探测以及高保真度星间通讯等领域具有广泛的应用需求; 此外, 较高的单频种子源功率对于实现高效单频功率放大, 有效抑制放大的自发辐射 (ASE) 也具有重要作用, 因此, 高功率单频光纤振荡器的研究一直是高性能单频光纤激光领域的研究热点。得益于光纤通信领域的快速发展, 1.5 μm 波段的掺铒光纤激光器率先实现单频激光瓦级功率输出。2005 年, 美国亚利桑那大学的 T. Qiu 等人利用包层泵浦 5.5 cm 高掺杂 Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃光纤实现了 1.6 W 的单频激光输出, 并于 2006 年将功率提升到 2.3 W, 该功率水平仍为目前 1.5 μm 波段单频光纤激光器的最高输出功率^[15, 21]。近年来, 高功率单频光纤激光器在其他应用波段也得到快速发展, 瓦级单频激光功率相继得到报道。在 2 μm 波段, 2018 年, 华南理工大学 X. Guan 等人使用 1610 nm 光纤激光同带泵浦基于 18 mm 高掺铈镱磷酸盐玻璃光纤的激光谐振腔来有效提高增益光纤吸收效率, 获得了 617 mW 的单频光纤激光, 激光效率达到 42.2%^[22]。2021 年, 美国亚利桑那大学的 S. Fu 等人利用 18 mm 长、浓度为 8 wt.% 的掺铈磷酸盐光纤搭建了 DBR 型光纤激光器, 如图 3 所示, 在 1050 nm 处获得了 1.15 W 单频线偏振激光, 激光效率达到 66%, 偏振消光比保持在 30 dB^[23]。前述高功率单频光纤激光振荡器的实现主要基于 DBR 型短腔结构, 利用高掺杂多组分玻璃光纤作为增益介质, 显著提升其功率提取能力, 但功率的进一步突破仍面临着诸多挑战, 如高功率下光纤光栅的缓慢热漂移导致激光功率出现饱和输出趋势, 谐振腔内的热效应造成单频激光噪声和线宽特性的劣化等。因此, 在优化提升光纤增益的同时, 仍需考虑高功率下激光谐振腔的散热及泵浦噪声耦合问题。

基于短腔 DBR 结构的单频光纤激光器尽管具有单纵模运转高稳定性及高系统集成性的优势, 但激光功率严重依赖于高增益有源光纤的发展。而基于环形腔结合窄带滤波器件的单频光纤激光系统则摆脱了这一限制。2021 年, 笔者课题组采用环形腔结构实现掺铒光纤在 1.7 μm 波段的增益积累, 获得了高功率、高效率 1720 nm 单频掺铒光纤激光器^[24]。如图 4(a) 所示, 实验中采用 1570 nm 光纤激光同带泵浦

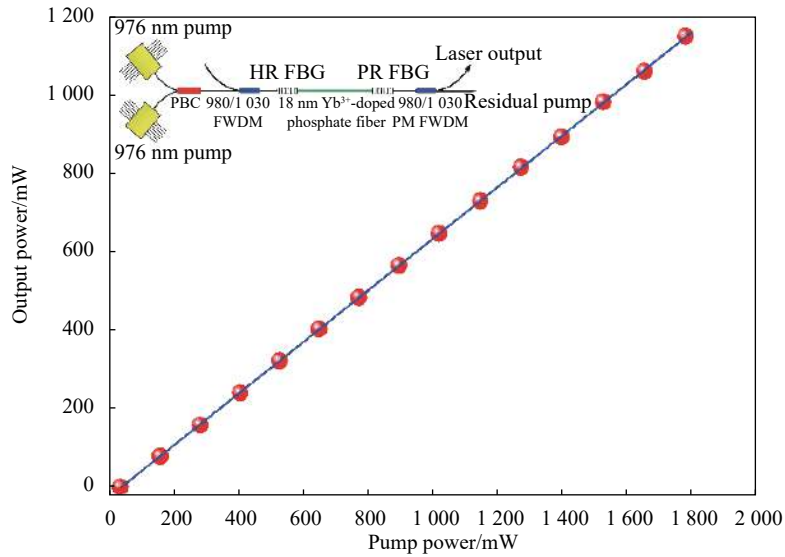


图 3 瓦级 1050 nm 单频掺铈磷酸盐光纤激光器输出功率特性曲线; 插图: 单频光纤激光实验装置图^[23]

Fig.3 Output power as a function of pump power of the Watt-level 1050 nm single-frequency Yb³⁺-doped phosphate fiber laser; Inset: Experimental setup of the single-frequency fiber laser^[23]

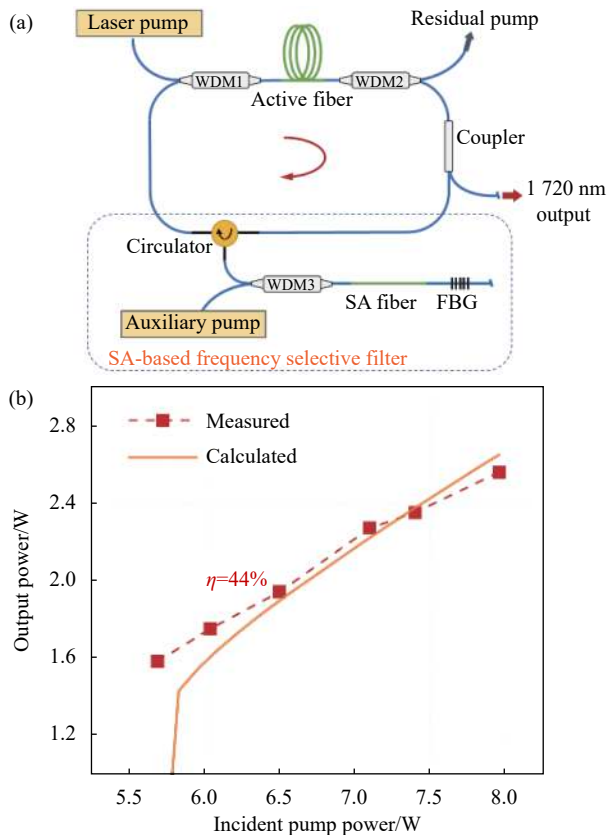


图 4 (a) 基于掺铈光纤作为饱和吸收体的 1.7 μm 单频光纤激光器实验装置图; (b) 单频激光输出功率特性^[24]

Fig.4 (a) Experimental setup of 1.7 μm single-frequency fiber laser based on Tm³⁺-doped fiber as the saturable absorber; (b) Output power of the single-frequency laser with respect to the pump power^[24]

环形腔掺铈光纤激光器, 利用掺铈光纤在 1.7 μm 波段较强的吸收特性作为饱和吸收体, 结合高反射率光栅实现超窄带滤波, 最终获得 1720 nm 处 2.56 W 单频激光输出, 激光斜率效率达到 44%。该研究工作不仅实现了单频掺铈光纤激光器输出波长向 1.7 μm 波段的有效拓展, 更是当前单频光纤激光振荡器的最高功率水平。

3 超窄线宽、超低噪声单频光纤激光器

单频窄线宽光纤激光所具有的高相干特性, 使其在远距离相干通信、激光雷达以及分布式光纤传感等相干应用领域具有独特的优势。基于短腔结构的单频光纤激光器较短的谐振腔长导致腔内光子寿命有限, 其激光线宽一般保持在 kHz 量级, 进一步的线宽压缩往往需要额外的腔反馈机制或设计虚拟折叠腔结构来增加腔内光子寿命。

相比于线形腔结构, 环形腔单频光纤激光器的长腔结构有利于提高腔内光子寿命, 为实现超窄线宽光纤激光器提供了重要前提。此外, 环形长腔结构便于引入各类可调谐窄带滤波器件, 有利于实现线宽小于 kHz 的宽调谐单频光纤激光器。2018 年, 重庆大学的 Y. Li 等人在掺铈环形腔激光器内综合运用未泵浦掺铈光纤的饱和吸收特性以及背向瑞利散射反馈技术实

现了百 Hz 量级超窄单频线宽^[25]。如图 5 所示, 实验中首先利用未泵浦掺铒光纤中的激光驻波形成周期性调制的折射率光栅构成模式选择器件, 得到环形腔

激光的单纵模运转, 同时结合 100 m 长单模光纤内的背向瑞利散射光所具有的超窄带宽特性进一步地将激光线宽由 1 kHz 压缩到~200 Hz。

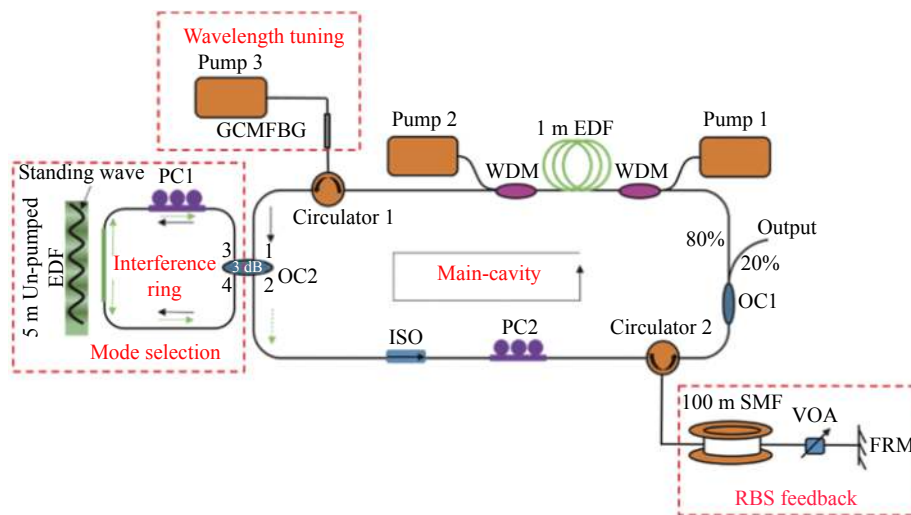


图 5 200 Hz 超窄线宽掺铒单频光纤激光实验装置图^[25]

Fig.5 Experimental setup of 200 Hz ultra-narrow linewidth Er³⁺-doped single-frequency fiber laser^[25]

2020 年, 笔者课题组利用受激布里渊散射-掺铒光纤混合增益结构实现低 SBS 阈值的 2 μm 波段超窄线宽单频光纤激光器^[26], 结构如图 6(a) 所示。光谱线宽为 40 kHz 的单频掺铒光纤激光器经功率放大后注入由掺铒保偏光纤和无源保偏光纤构成的全保偏环形腔, 光纤中生成的反向斯托克斯光

(Stokes) 经无源保偏光纤和有源掺铒光纤混合增益得到高效放大, 利用 SBS 效应的窄带增益特性实现由布里渊泵浦光到 Stokes 光约 43 倍的线宽压缩, 首次实现 2 μm 波段单频光纤激光百 Hz 量级线宽, 同时激光转换效率达到 50%。

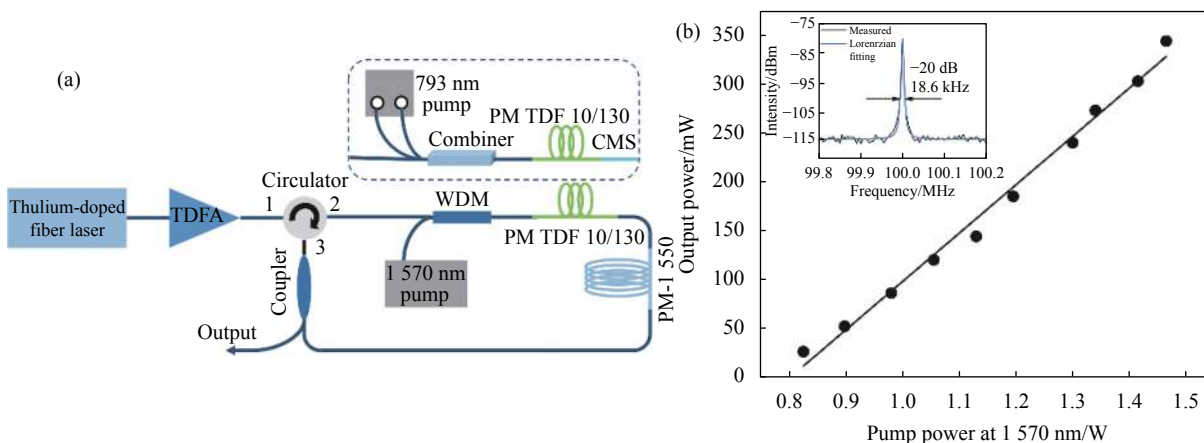


图 6 (a) 基于掺铒-布里渊复合增益的 2 μm 窄线宽单频光纤激光器实验装置图; (b) 单频激光功率输出曲线, 插图: 基于延迟自外差法测得的斯托克斯光线宽^[26]

Fig.6 (a) Experimental setup of the 2 μm narrow-linewidth single-frequency Brillouin-Thulium-based fiber laser; (b) Curves of single-frequency laser output power; Inset: Measured Stokes linewidth based on delayed self-heterodyne method^[26]

除此之外,高 Q 值微腔^[27]、高精度光纤环^[28]以及多环复合腔^[29]等结构也相继被应用于环形腔光纤激光系统实现 Hz 量级超窄线宽单频激光,丰富了窄线宽单频光纤激光器的技术路径。

低强度噪声和频率噪声是衡量单频光纤激光器性能的另一重要指标,除了针对单频谐振腔进行温度控制和震动噪声隔离等一般物理措施来抑制环境噪声,早期激光噪声的抑制技术通常采用光电反馈手段对泵浦源或谐振腔控制系统进行反馈调节,以提升激光功率和频率稳定性。高效反馈的实现往往需要考虑光电转换及伺服反馈系统的带宽限制,此外,光电反馈系统引入的额外电学噪声则在一定程度上降低了低频噪声的抑制效果。具有低热膨胀系数的超稳腔以及超窄带吸收峰的特定气体作为高精度频率参考源,也被用来降低频率噪声、实现 Hz 量级激光线宽,但其复杂的结构设计以及参考源较弱的抗环境干扰能力限制了相关技术手段在复杂现实环境中的应用。近年来,基于全光反馈技术实现单频光纤激光的噪声抑制得到广泛的关注和快速发展^[30],这一技术途径实现了单频激光与反馈系统的光纤兼容性,便于获得实时高效反馈。2018 年,华南理工大学 Q. Zhao 等人利用如图 7(a) 所示的自注入反馈技术将一部分激光功率反馈注入激光谐振腔对单频激光输出特性进行锁定,降低模式跳变及频率漂移程度;另一方面,结合半导体光放大器的非线性放大特性降低信号光的全频带噪声,实验中获得强度噪声峰值处 60 dB 的噪声抑制,在 75 kHz~50 MHz 的宽频带范围内实现近散粒噪声激光特性^[31]。2021 年,北京工业大学 Q. Zhang 等人研究了 2 μm 单频光纤激光系统中泵浦强度噪声向激光频率噪声的耦合特性,通过分析具有不同强度噪声特性的泵浦源对单频掺铥光纤激光频率噪声的影响,得到具有较低噪声特性的 1550 nm 单频光纤激光器能够有效避免泵浦强度噪声导致的激光谐振腔热抖动,基于此实现了低频率噪声的 2 μm 单频光纤激光器^[32]。

当前单频光纤激光器利用虚拟折叠腔等腔型结构设计获得了亚 kHz 窄线宽激光输出,通过引入微腔等高精度结构进一步压缩激光线宽至 Hz 量级,超窄线宽单频光纤激光的发展得到长足进步;值得注意的是,超窄线宽单频光纤激光功率水平仍普遍较低,

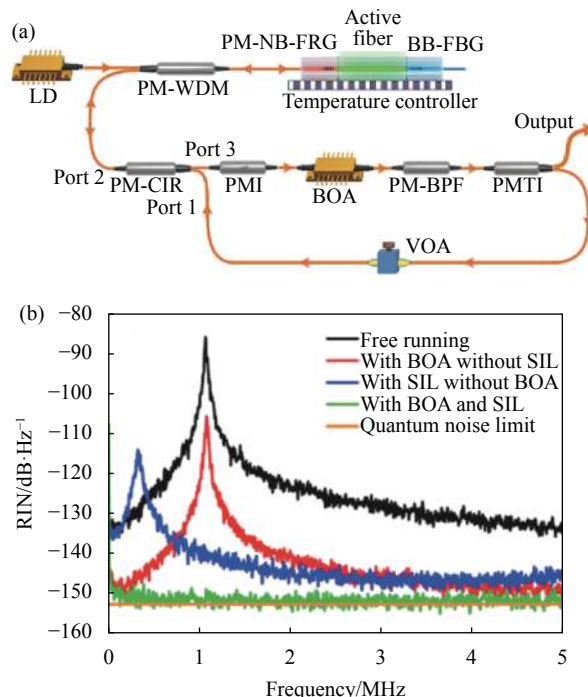


图 7 (a) 基于半导体光放大器与自注入锁定技术的单频光纤激光器全光噪声抑制实验装置图; (b) 单频激光在自由运转以及半导体光放大器和自注入锁定技术应用下噪声特性对比图^[31]

Fig.7 (a) Experimental setup of the low-noise single-frequency fiber laser based on booster optical amplifier (BOA) and self-injection locking (SIL) techniques; (b) Comparison on laser noise of the single-frequency laser under free-running status, and noise control status with BOA and SIL techniques^[31]

复杂腔型结构设计以及超窄带滤波器件的引入增加了系统的损耗,导致单频激光效率严重下降,且器件的窄带滤波特性易受腔内光功率影响,均阻碍了当前超窄线宽单频光纤激光的功率提升。此外,单频激光线宽和噪声特性具有相互耦合的特点——泵浦源的强度噪声在激光产生过程中向信号光的强度噪声转化,同时强度噪声导致的谐振腔热抖动引起单频激光频率噪声特性的劣化,造成激光线宽展宽。因此,单频光纤激光超窄线宽和超低噪声特性的实现仍需协同考虑,开展由泵浦源到激光谐振腔以及全光反馈系统的全链条噪声控制。

4 单频光纤激光器波长拓展

基于稀土掺杂的多组分玻璃光纤和石英光纤分别实现了 W 量级和百 mW 量级结构紧凑的短腔型单频光纤激光器,但其输出波长仍主要集中于稀土离子

典型发射峰附近,如掺镱光纤的 980 nm 和 1064 nm,掺铒光纤的 1550 nm 波段以及掺铊光纤的 1900 nm 波段。然而,随着高性能单频光纤激光器得到越来越广泛的应用,进一步拓展单频光纤激光器的输出波长以满足不同的应用需求则受到更多的关注。如远距离相干通信领域,大容量的数据传输亟需单频激光器的输出波长由传统的 C 波段向覆盖 1.6 μm 的 L 波段拓展。但传统石英光纤在长波方向发射截面快速下降,特别是 1.6 μm 波段,很难实现有效激光输出。而在高分辨光谱分析、多普勒测风雷达等领域,2 μm 单频光纤激光器具有重要应用,但掺铊光纤增益峰主要在 1.8~1.9 μm ,难以满足前述应用领域中特定原子光谱谱线分析、远距离目标探测等需求。为此,在广泛应用需求的牵引下,激光工作波段的有效拓展成为高性能单频光纤激光器的一个重要研究方向。

单频光纤激光波长拓展的研究工作,一方面是针对前述稀土离子的低发射截面波长,提升有源光纤本身的增益水平。如改变光纤玻璃基质组分,优化稀土离子的发光特性,在传统低发射截面波长处获得充分的激光增益,以实现单频激光在典型输出波长基础上的进一步拓展。2017 年,华南理工大学 C. Yang 等人利用磷酸盐玻璃中铟离子在 1.6 μm 波段的发射截面远高于石英玻璃的特点,结合磷酸盐玻璃高稀土离子掺杂能力的优势,实现了 DBR 型单频光纤激光器 1.6 μm 处的有效发射^[33]。实验中利用 16 mm 长、掺杂浓度为 1 mol%/2 mol% 的铟/镱共掺磷酸盐光纤获得了 21 mW 的 1603 nm 单频激光,斜率效率为 11.6%。2021 年,美国亚利桑那大学 X. Zhu 课题组利用铷离子在磷酸盐玻璃中发射光谱蓝移特性,搭建了基于 2.5 cm 长高掺铷磷酸盐光纤的 915 nm 单频 DBR 光纤激光器^[34],并获得 13.5 mW 的单频激光输出,这是当前单频光纤振荡器输出的最短波长。

另一方面针对稀土离子的低发射截面波长,可通过腔型结构、泵浦方式等激光器参数设计,实现激光增益特性的优化。2019 年,笔者课题组利用掺铊光纤在环形长腔内 >2 μm 处的增益优势,结合级联多模干涉光纤滤波器件有效抑制激光在 1.9 μm 波段增益,实现了基于掺铊光纤激光器的 2004.9 nm 单纵模激光输出,激光功率达到 20.9 mW^[35]。2021 年,国防科技大学 Y. Tao 等人在 5 cm 长掺铊石英光纤中写入相移光

栅实现了 1150 nm 单频光纤激光,其中有源光纤既作为 DFB 激光增益又为后续功率放大提供增益,使得激光阈值仅为 10 mW^[36]。同年,笔者课题组采用环形长腔结构实现掺铊光纤在 1.7 μm 波段增益的有效积累,通过构建多个具有不同自由光谱范围的腔内光纤环增大纵模间距,实现了输出功率达 1.1 W,斜率效率达 46.4% 的 1720 nm 单频光纤激光,并在后续研究工作中将该波段单频激光功率提升到 2.56 W^[37, 24]。

此外,利用高非线性光纤作为拉曼增益介质构成的单频拉曼光纤激光器,能够有效突破传统有源光纤对稀土离子发射谱特性的高度依赖性,开辟了单频光纤激光波长拓展的有效技术途径。如前述参考文献 [7] 中, S. Loranger 等人通过在高非线性光纤中写入中心波长为 1178 nm 的 π 相移光栅,利用 1120 nm 泵浦光,实现一阶拉曼波长 1178 nm 处单频 DFB 光纤激光器,最高输出功率达 300 mW。基于当前发展较为成熟的高功率光纤激光器作为泵浦源,利用光纤中 THz 量级的拉曼频移特性,设计由高非线性光纤构成的单频拉曼激光器,可实现单频光纤激光输出波长的大幅度拓展。

基于稀土掺杂光纤及无源光纤器件成熟的制备工艺,单频光纤激光器在近红外波段得到了最为广泛的研究和发展。而针对激光波长进一步向长波方向拓展,位于“分子指纹区域”的中红外波段近年来逐渐成为光纤激光领域的研究热点,单频光纤激光在中红外波段的实现也取得了初步的研究进展。如 2013 年,澳大利亚悉尼大学的 D. D. Hudson 等人利用飞秒激光在 20 cm 长铋/镱共掺的氟化物玻璃光纤内写入光纤光栅,结合二向色镜构成激光谐振腔,实现了 2914 nm 单频光纤激光,激光最高输出功率为 11 mW^[38]。2015 年,加拿大拉瓦尔大学的 M. Bernier 等人在 20 cm 高掺铟 (7 mol%) 氟化物玻璃光纤内写入 3 cm 长 π 相移光栅构成 DFB 激光器,并利用特种玻璃光纤与石英光纤的非对称熔接技术,实现了 2.8 μm 单频全光纤激光器,激光功率为 12 mW^[39]。可以发现,已报道的中红外单频光纤激光器功率水平仍然较低,系统集成性和稳定性仍需得到进一步的提升,但此后关于中红外单频光纤激光器的研究报道较少。这主要受限于中红外波段光纤器件的可及性较差、有源光纤的增益水平较低。此外,高功率下中红

外光纤的热效应对单频激光稳定性的影响也是制约中红外单频光纤激光器发展的重要因素。

5 高功率单频光纤放大器

虽然当前单频光纤振荡器的输出功率已达瓦量级,但仍远不能满足引力波探测、相干雷达以及相干合成等高功率应用场景的需求。因此,往往需要采取主振荡功率放大(MOPA)技术实现单频光纤激光的高功率输出。MOPA技术采用单频振荡器作为高性能种子源,通过搭建多级放大结构,在保持单频激光波长稳定性、窄线宽以及低噪声等优异性能的同时,实现激光功率的逐级放大。但也正是单频激光的窄线宽特性,导致其功率放大过程面临着严重的SBS效应,成为高功率单频光纤放大器的主要制约因素。对此,研究人员发展了一系列技术手段实现对单频光纤激光SBS效应的抑制,如对有源光纤施加应力和温度梯度减弱SBS效应的有效积累^[40-41];针对斯托克斯光反向传输特性,利用反向泵浦方式降低斯托克斯光增益^[42];设计特殊结构的“声学剪裁光纤(Acoustically tailored fiber)”获得激光模场内不同声子能量分布,抑制斯托克斯光叠加累积^[43];以及采用大模场、短长度有源光纤降低SBS增益^[44]等技术。

基于此,连续光单频光纤放大器在1 μm、1.5 μm和2 μm这三个光纤激光主要工作波段的输出功率分

别达到了811 W、207 W和608 W的水平^[45-47]。但受限于光纤特殊结构、高功率光纤器件的可及性等因素,相应的研究工作均采用了空间光路结构,牺牲了光纤激光系统的高集成性和鲁棒性等应用优势。而随着高增益有源光纤和高功率光纤器件制备技术的快速发展,高功率全光纤单频光纤放大器的研究得到持续推进。图8总结了近年来连续光全光纤单频放大器的功率发展进程^[4,48-50]。其中,2020年国防科技大学的W. Lai等人采用如图9(a)所示的保偏锥形增益光纤率先将1 μm单频全光纤放大器的输出功率提升到500 W量级^[48]。实验中功率放大级使用1.27 m锥形掺镱光纤(输入端纤芯/包层直径36.1/249.3 μm,输出端纤芯/包层直径57.8/397.3 μm),利用逐渐增加的光纤模场面积提升SBS阈值,并选取具有较高发射截面的1030 nm激光波长应对大模场光纤高功率下的MI问题,最终获得379 W线偏振单频激光以及550 W非偏振单频激光,两种情况下激光功率的进一步提升均受限于超大模场面积导致的MI效应。这也是当前高功率单频全光纤放大器发展所面临的主要问题,即利用大模场面积少模光纤提高SBS阈值的同时,引入了MI效应导致单频激光横模特性的劣化,因此,单频激光功率的进一步提升则需要综合考虑SBS和MI效应。2021年,笔者课题组提出通过级联低掺杂浓度和高掺杂浓度增益光纤的方式,减轻激光

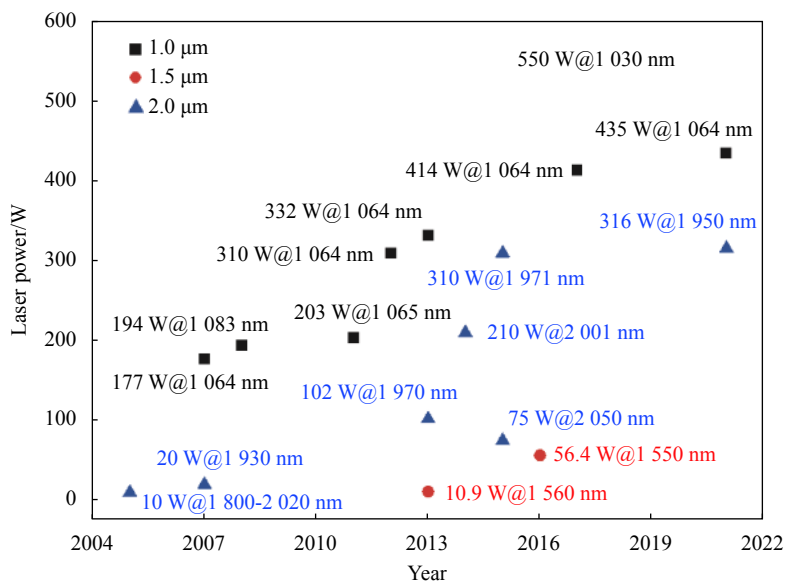


图 8 高功率单频全光纤放大器的功率发展进程

Fig.8 Power evolution of single-frequency fiber amplifiers in all-fiber configurations

功率放大级输入端热负载, 并利用 976 nm 和 915 nm 复合泵浦的方式增强激光增益饱和特性, 有效提高 MI 阈值^[49]。如图 10(a) 所示, 实验装置中选取 976 nm 吸收系数为 6.3 dB/m 和 14.2 dB/m 的两款掺镱光纤分别实现低功率下降低热效应和高功率下高效放大。

相比单纯使用 976 nm 泵浦源获得的 380 W 输出功率, 采用 976 nm 和 915 nm 复合泵浦的方式将 1064 nm 单频激光放大功率提高到 435 W, 实验验证了复合泵浦方式对于加强增益饱和效应、提高 MI 阈值的有益作用, 通过级联光纤长度及复合泵浦功率分配的优化

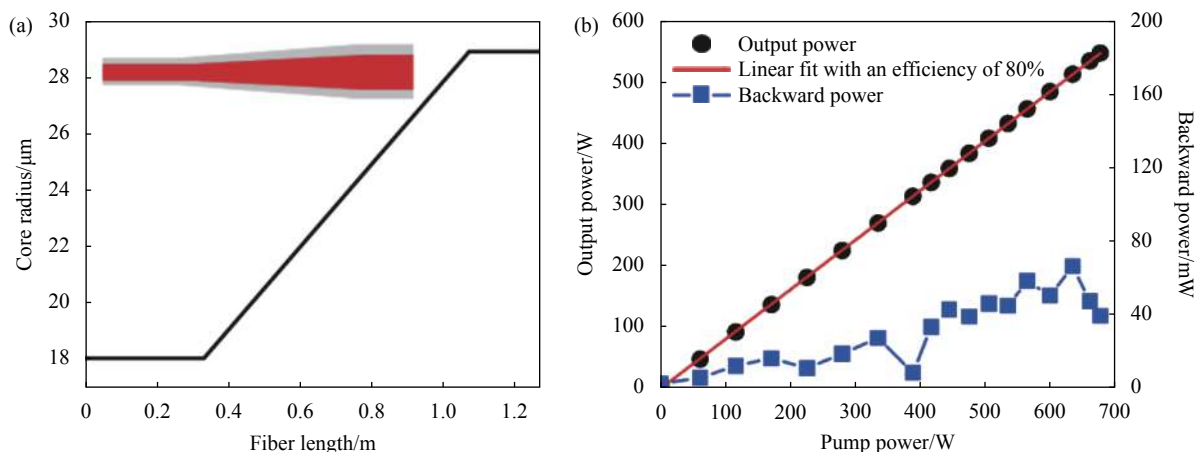


图 9 (a) 锥形光纤纤芯半径随光纤长度变化趋势; (b) 基于锥形光纤的主放大级信号功率及反向功率演化特性^[48]

Fig.9 (a) The core radius of the tapered fiber along with the fiber length; (b) Laser output power and backward power of the main amplifier stage with tapered gain fiber^[48]

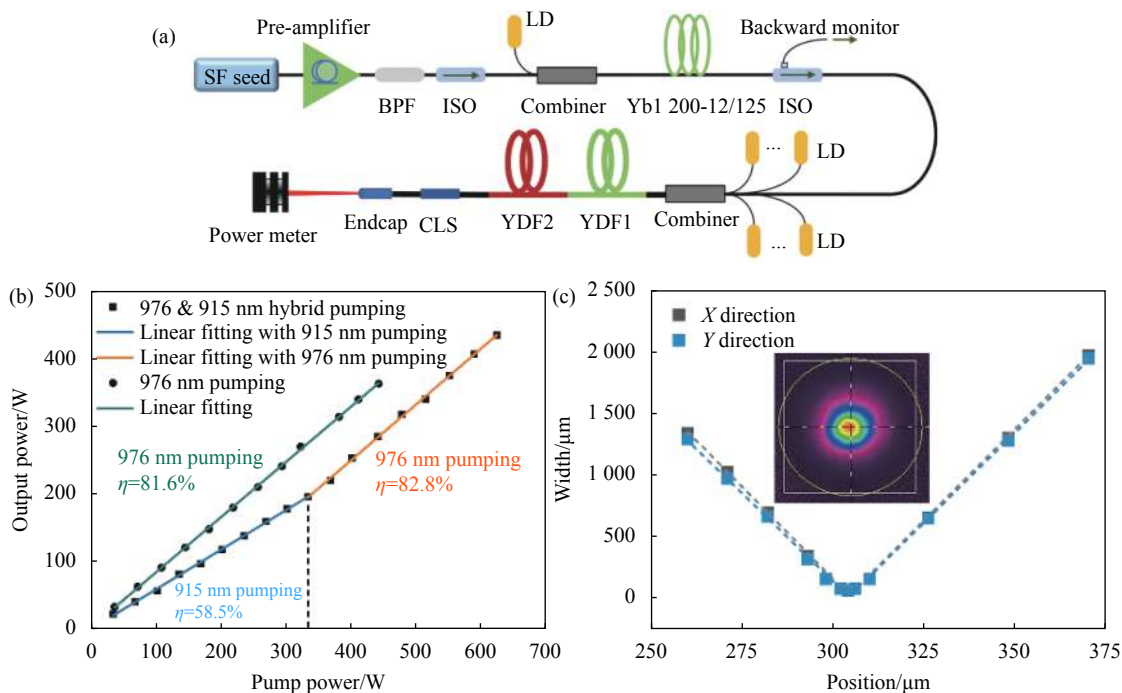


图 10 (a) 基于复合泵浦和级联光纤技术的单频掺镱光纤放大系统装置图; (b) 976 nm 单独泵浦以及 976 nm 和 915 nm 复合泵浦下单频放大输出功率; (c) 单频激光功率为 435 W 时的光束质量^[49]

Fig.10 (a) Experimental setup of the single-frequency all-fiber amplifier based on hybrid pump of the cascaded Yb³⁺-doped fibers; (b) Laser output power of the main amplifier stage under singular 976 nm pump, and 976 nm and 915 nm hybrid pump; (c) Measured beam quality of the single-frequency amplifier at the output power of 435 W^[49]

有望将 1064 nm 单频激光功率提升到 500 W 量级。

当然,可以发现当前连续波单频光纤放大器的功率水平距离千瓦级仍有一定的差距,特别是全光纤结构的千瓦级单频放大器还面临着 SBS、MI、热效应处理、高功率光纤器件获取以及高功率下单频特性表征等理论和技术难题。千瓦级单频光纤激光器的实现,一方面可从光纤材料、结构设计出发,通过光纤玻璃基质组分调控,获得超低数值孔径、超大模场光纤,有效降低光纤模式容量,或利用实芯光子带隙、反谐振等结构获得大模场单模光纤,为高功率单横模运转提供空间,提升 SBS 和 MI 阈值^[51-52];此外,针对单频激光高功率下的 SBS 效应,开展光纤横向和纵向的分布式结构设计,以降低 Stokes 光的增益积累,也是推进千瓦级单频光纤激光实现的有益路径^[53]。另一方面,从创新理论机制出发,摆脱高功率单频激光的传统放大路径,探索窄线宽激光光谱演化机制,利用光纤中丰富的非线性效应,实现高功率下激光线宽窄化,为发展千瓦级单频激光提供新的思路^[54-55]。

除了激光功率外,特定的应用场景对单频光纤激光的其他性能参数也提出了具体的要求。近年来随着引力波探测领域的快速发展,研制满足新一代引力波探测需求的高功率、低噪声单频光纤激光器成为高功率单频激光一大研究热点。2017 年,德国汉诺威激光研究中心的 O. D. Varona 等人在百瓦级单频铒镱共掺光纤放大系统中采用 940 nm 泵浦源代替传统的 976 nm 泵浦源来降低铒离子的反转粒子数,有效抑制其在 1 μm 波段 ASE 噪声,最高输出功率条件下高达 58 dB 的光学信噪比仅受限于铒离子的带内 ASE,而铒离子 ASE 远低于光谱分析仪器的灵敏度,且在 1 Hz~100 kHz 引力波探测频段内激光的相对功率噪声和频率噪声相较于单频种子源均未出现明显退化^[56]。2019 年, F. Wellmann 等人针对一 200 W 单频掺镱光纤放大器工程化样机,系统分析了其功率、模式以及噪声特性在引力波探测领域的适用性^[57]。该单频光纤激光放大系统采取模块化设计以提升可靠性、降低维护成本;近 700 h 的长时运转验证了其面对实际应用的高稳定性。此外,针对钠导星、测风雷达以及大气遥感等应用,特定波长的高功率单频光纤放大器也得到了相应的研究^[58-60]。

在脉冲型单频光纤放大器方面,高能量和高峰值

功率单频激光的获取仍然面临着严重的 SBS 效应的制约。尽管 mJ 级单脉冲能量和百 kW 级峰值功率这两大单频脉冲光纤放大系统里程碑的实现距今已经有近十年的时间^[61-62],研究人员仍在为获取更高性能的单频脉冲光纤激光作出新的尝试。2018 年, W. Lee 等人采用大模场高铒镱共掺 (1 wt.%Er³⁺/5 wt.%Yb³⁺) 硅酸盐光纤作为多级全光纤放大系统的增益介质,将 1572 nm 处 500 ns 长脉冲单频激光的能量提升至 1.8 mJ 的高纪录水平^[63]。其中功率放大级使用 55 cm 长、纤芯直径达 45 μm 的铒镱共掺硅酸盐光纤实现了大于 10 dB 的脉冲激光增益。2019 年,芬兰坦佩雷大学 K. Patokoski 等人在百 ns 单频脉冲放大系统的功率放大级,采用输出端直径达 49 μm 的掺镱锥形光纤来有效提升 SBS 阈值,获得了峰值功率达 4 kW,脉冲能量为 0.52 mJ 的 1053 nm 百 ns 单频脉冲激光^[64]。而针对单频脉冲放大峰值功率与光转换效率的严重制约关系,2020 年,俄罗斯科学院的 M. M. Khudyakov 等人提出了单掺铒光纤与铒镱共掺光纤级联的放大结构,有效避免因输入光功率水平较低导致的低信号增益和严重的 ASE 效应,从而获得 1554 nm 处 160 ns 单频脉冲激光 3.7 kW 的峰值功率,泵浦-信号光转换效率达到 23.6%^[65]。在 ns 级短脉冲单频光纤放大方面,国防科技大学和笔者课题组分别选取方形和三角形脉冲波形来解决高峰值功率下自相位调制效应引起的频谱展宽问题,结合掺镱锥形光纤在提升 SBS 阈值方面的优势,实现了小于 10 ns 近变换极限的单频短脉冲激光功率放大,脉冲激光峰值功率均达到 30 kW 水平^[66-67]。总的来看,单频脉冲光纤放大器在脉冲能量、峰值功率水平的稳步提升,得益于对全光纤系统下单频激光时域、光谱特性以及有源光纤结构设计的综合考量。

6 结 论

随着光纤激光技术的快速发展以及光纤器件制备技术的逐渐成熟,高性能单频光纤激光器得以进一步发展。文中对近五年来单频光纤激光振荡器和放大器的新进展进行了回顾和总结,及时捕捉单频光纤激光领域出现的新技术、新结构;对单频光纤激光在高功率/能量、窄线宽、低噪声以及波长拓展等方面性能提升的重要研究成果和技术突破进行了分析。当

前,单频光纤振荡器已实现 W 级功率输出,Hz 量级线宽以及近背景散粒强度噪声等单频激光特性得到积极探索;全光纤单频连续激光放大器的输出功率水平已突破 500 W,单频脉冲激光放大器的脉冲能量接近 2 mJ,峰值功率超过 100 kW。单频激光功率/能量水平的进一步提升则需要综合考虑模式不稳定效应,以及受激布里渊散射、自相位调制和四波混频等多种非线性效应。针对此,开展新型光纤材料、光纤结构及激光系统设计,突破高功率下热效应及非线性效应对单频激光性能的制约,全面提升单频激光性能参数;探索单频光纤激光新型实现机制等将成为未来一段时间高性能单频光纤激光器的主要研究方向。可以预见,随着单频光纤激光技术的快速发展,单频光纤激光器的应用领域将更加广泛、应用手段也将更加丰富。这对单频光纤激光器的多参数可调及快速响应,多通道、全波段覆盖以及系统的集成能力、环境适应性和稳定性等提出了更高的要求,推动着高性能单频光纤激光器逐渐走向成熟。

参考文献:

- [1] Shi W, Fang Q, Zhu X S, et al. Fiber lasers and their applications [Invited] [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6554-6568.
- [2] 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]. *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 546-551.
- [3] Steinke M, Tünnermann H, Kuhn V, et al. Single-frequency fiber amplifiers for next-generation gravitational wave detectors [J]. *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1-13.
- [4] Fu S J, Shi W, Feng Y, et al. Review of recent progress on single-frequency fiber lasers [Invited] [J]. *Journal of Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A49-A62.
- [5] Yang Changsheng, Cen Xu, Xu Shanhu, et al. Research progress of single-frequency fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0114002. (in Chinese)
- [6] Lai Wenchang, Ma Pengfei, Xiao Hu, et al. High-power narrow-linewidth fiber laser technology [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(12): 7-28. (in Chinese)
- [7] Loranger S, Karpov V, Schinn G W, et al. Single-frequency low-threshold linearly polarized DFB Raman fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 3864-3867.
- [8] Sun Z H, Jiang X T, Wen Q, et al. Single frequency fiber laser based on an ultrathin metal-organic framework [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(16): 4662-4666.
- [9] Ward J, Benson O. WGM microresonators: sensing, lasing and fundamental optics with microspheres [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(4): 553-570.
- [10] Collodo M C, Sedlmeir F, Sprenger B, et al. Sub-kHz lasing of a CaF₂ whispering gallery mode resonator stabilized fiber ring laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19277-19283.
- [11] Shi Wei, Fu Shijie, Fang Qiang, et al. Single-frequency fiber laser based on rare-earth-doped silica fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1003001. (in Chinese)
- [12] Sun B, Jia J, Huang J, et al. A 1030 nm single-frequency distributed Bragg reflector Yb-doped silica fiber laser [J]. *Laser Physics*, 2017, 27(10): 105105.
- [13] Boetti N G, Pugliese D, Ceci-Ginistrielli E. Highly doped phosphate glass fibers for compact lasers and amplifiers: A review [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(12): 1295.
- [14] Zhu X S, Chavez-Pirson A, Milanese D, et al. Non-Silica Oxide Glass Fiber Laser Sources: Part II [M]//Advances in Glass Science and Technology. New York: IntechOpen, 2018.
- [15] 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]. *Optics Express*, 2006, 14(16): 7087-7092.
- [16] Ballato J, Hawkins T, Foy P, et al. On the fabrication of all-glass optical fibers from crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(5): 053110.
- [17] Zhang Y M, Wang W W, Li J, et al. Multi - component yttrium aluminosilicate (YAS) fiber prepared by melt - in - tube method for stable single - frequency laser [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2018, 102(5): 2551-2557.
- [18] Liu Z J, Xie Y Y, Cong Z H, et al. 110 mW single-frequency Yb: YAG crystal-derived silica fiber laser at 1064 nm [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4307-4310.
- [19] Wan Y, Wen J X, Jiang C, et al. Over 255 mW single-frequency fiber laser with high slope efficiency and power stability based on an ultrashort Yb-doped crystal-derived silica fiber [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 649-656.
- [20] Xie Y Y, Cong Z H, Zhao Z G, et al. Preparation of Er: YAG crystal-derived all-glass silica fibers for a 1550-nm single-frequency laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(14): 4769-4775.
- [21] Qiu T, Schülzgen A, Li L, et al. Generation of watt-level single longitudinal mode output from cladding pumped short fiber

- lasers [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(20): 2748-2750.
- [22] Guan X C, Yang C S, Qiao T, et al. High-efficiency sub-watt in-band-pumped single-frequency DBR Tm³⁺-doped germanate fiber laser at 1950 nm [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 6817-6825.
- [23] Fu S J, Zhu X S, Zong J, et al. Diode-pumped 1.15 W linearly polarized single-frequency Yb³⁺-doped phosphate fiber laser [J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 30637-30643.
- [24] Zhang J, Sheng Q, Zhang L, et al. 2.56 W single-frequency all-fiber oscillator at 1720 nm [J]. *Advanced Photonics Research*, 2021: 2100256.
- [25] Li Y J, Huang L G, Gao L, et al. Optically controlled tunable ultra-narrow linewidth fiber laser with Rayleigh backscattering and saturable absorption ring [J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 26896-26906.
- [26] Shi C D, Sheng Q, Fu S J, et al. Power scaling and spectral linewidth suppression of hybrid Brillouin/thulium fiber laser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 2948-2955.
- [27] Ma R L, Yuan S X, Zhu S, et al. Tunable sub-kHz single-mode fiber laser based on a hybrid microbottle resonator [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5315-5318.
- [28] Hao L Y, Wang X H, Jia K P, et al. Narrow-linewidth single-polarization fiber laser using non-polarization optics [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(15): 3769-3772.
- [29] Feng T, Wei D, Bi W W, et al. Wavelength-switchable ultra-narrow linewidth fiber laser enabled by a figure-8 compound-ring-cavity filter and a polarization-managed four-channel filter [J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 31179-31200.
- [30] 杨中民, 徐善辉. 单频光纤激光器[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [31] Zhao Q L, Zhang Z T, 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(4): 326-331.
- [32] Zhang Q, Hou Y B, Song W H, et al. Pump RIN coupling to frequency noise of a polarization-maintaining 2 μm single frequency fiber laser [J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3221-3229.
- [33] Yang C S, Guan X C, Lin W, et al. Efficient 1.6 μm linearly-polarized single-frequency phosphate glass fiber laser [J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 29078-29085.
- [34] Fu S J, Zhu X S, Zong J, et al. Single-frequency Nd³⁺-doped phosphate fiber laser at 915 nm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(6): 1808-1813.
- [35] Shi C D, Fu S J, Shi G N, et al. All-fiberized single-frequency silica fiber laser operating above 2 μm based on SMS fiber devices [J]. *Optik*, 2019, 187: 291-296.
- [36] 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(15): 3705-3708.
- [37] Zhang L, Zhang J X, Sheng Q, et al. Watt-level 1.7 μm single-frequency thulium-doped fiber oscillator [J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27048-27056.
- [38] Hudson D D, Williams R J, Withford M J, et al. Single-frequency fiber laser operating at 2.9 μm [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2388-2390.
- [39] Bernier M, Michaud-Belleau V, Levasseur S, et al. All-fiber DFB laser operating at 2.8 μm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(1): 81-84.
- [40] Zhang L, Cui S Z, Liu C, et al. 170 W, single-frequency, single-mode, linearly-polarized, Yb-doped all-fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5456-5462.
- [41] Kovalev V I, Harrison R G. Suppression of stimulated Brillouin scattering in high-power single-frequency fiber amplifiers [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(2): 161-163.
- [42] Theeg T, Sayinc H, Neumann J, et al. All-fiber counter-propagation pumped single frequency amplifier stage with 300-W output power [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(20): 1864-1867.
- [43] Robin C, Dajani I. Acoustically segmented photonic crystal fiber for single-frequency high-power laser applications [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2641-2643.
- [44] Leigh M, Shi W, Zong J, et al. High peak power single frequency pulses using a short polarization-maintaining phosphate glass fiber with a large core [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(18): 181108.
- [45] Robin C, Dajani I, Pulford B, et al. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811 W output power [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 666-669.
- [46] Creeden D, Pretorius H, Limongelli J, et al. Single frequency 1560 nm Er: Yb fiber amplifier with 207 W output power and 50.5% slope efficiency[C]//Proc of SPIE, 2016, 9728: 97282L.
- [47] Goodno G D, Book L D, Rothenberg J E. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1204-1206.
- [48] Lai W C, Ma P F, Liu W, et al. 550 W single frequency fiber amplifiers emitting at 1030 nm based on a tapered Yb-doped fiber [J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20908-20919.
- [49] Shi C D, Fu S J, Xun D, et al. 435 W single-frequency all-fiber

- amplifier at 1064 nm based on cascaded hybrid active fibers [J]. *Optics Communications*, 2021, 502: 127428.
- [50] Guan X C, Yang C S, 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(11): 1112004.
- [51] Pulford B, Holten R, Matniyaz T, et al. kW-level monolithic single-mode narrow-linewidth all-solid photonic bandgap fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(18): 4458-4461.
- [52] Xing Z, Wang X, Lou S, et al. Large-mode-area all-solid anti-resonant fiber with single-mode operation for high-power fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(8): 1908-1911.
- [53] Zeng L, Pan Z, Xi X, et al. 5 kW monolithic fiber amplifier employing homemade spindle-shaped ytterbium-doped fiber [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(6): 1393-1396.
- [54] Ye J, Ma X, Zhang Y, et al. From spectral broadening to recompression: Dynamics of incoherent optical waves propagating in the fiber [J]. *Photonix*, 2021, 2: 15.
- [55] Zeng X, Cui S, Cheng X, et al. Spectral compression by phase doubling in second harmonic generation [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(2): 222-225.
- [56] Varona O D, Fittkau W, Booker P, et al. Single-frequency fiber amplifier at 1.5 μm with 100 W in the linearly-polarized TEM₀₀ mode for next-generation gravitational wave detectors [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 24880-24892.
- [57] 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(20): 28523-28533.
- [58] Yang X, Lei Z, Cui S, et al. Sodium guide star laser pulsed at Larmor frequency [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4351-4354.
- [59] Guan X, Zhao Q, Lin W, et al. High-efficiency and high-power single-frequency fiber laser at 1.6 μm based on cascaded energy-transfer pumping [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(3): 414-420.
- [60] Benoit P, Méhauté S L, Gout J L, et al. All-fiber laser source at 1645 nm for lidar measurement of methane concentration and wind velocity [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(1): 126-129.
- [61] Petersen E, Shi W, Chavez-Pirson A, et al. High peak-power single-frequency pulses using multiple stage, large core phosphate fibers and preshaped pulses [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(5): 531-534.
- [62] Fang Q, Shi W, Kieu K, et al. High power and high energy monolithic single frequency 2 μm nanosecond pulsed fiber laser by using large core Tm-doped germanate fibers: experiment and modeling [J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16410-16420.
- [63] Lee W, Geng J, Jiang S, et al. 1.8 mJ, 3.5 kW single-frequency optical pulses at 1572 nm generated from an all-fiber MOPA system [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(10): 2264-2267.
- [64] Kim P, Joona R, Teppo N, et al. Single-frequency 100 ns/0.5 mJ laser pulses from all-fiber double clad ytterbium doped tapered fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 31532-31541.
- [65] Khudyakov M, Lipatov D, Guryanov A, et al. Highly efficient 37-kW-peak-power single-frequency combined Er/Er-Yb fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1782-1785.
- [66] Huang L, Ma P F, Su R T, et al. Comprehensive investigation on the power scaling of a tapered Yb-doped fiber-based monolithic linearly polarized high-peak-power near-transform-limited nanosecond fiber laser [J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 761-782.
- [67] Shi C D, Tian H, Sheng Q, et al. High-power single-frequency pulsed fiber MOPA via SPM suppression based on a triangular pulse [J]. *Results in Physics*, 2021, 28(12): 104594.