

单频光纤激光器研究进展

杨昌盛^{1,3}, 岑旭¹, 徐善辉^{1,2,3}, 杨中民^{1,2,3,4*}

¹华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640;

²华南理工大学物理与光电学院, 广东 广州 510640;

³广东省特种光纤材料与器件工程技术研究开发中心, 广东 广州 510640;

⁴华南理工大学广东省光纤激光材料与应用技术重点实验室, 广东 广州 510640

摘要 单频光纤激光器在激光武器、激光雷达、空间激光通信、相干光通信、高精度光谱测量、引力波探测等领域有着广泛的应用前景, 受到了研究者的极大关注。从 1.0, 1.5, 2.0 μm 三种典型工作波段进行归类, 综述了单频光纤激光器的国内外研究现状, 内容涵盖了单频光纤激光产生、噪声抑制、线宽压窄、连续与脉冲单频激光放大等技术。此外, 结合了本课题组在单频光纤激光器方面的研究工作, 着重介绍了基于单振荡器和主振荡功率放大器结构的单频光纤激光器近年来的研究进展, 并展望了单频光纤激光器的未来发展方向。

关键词 激光器; 单频; 光纤激光器; 主振荡功率放大器; 噪声抑制

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0114002

Research Progress of Single-Frequency Fiber Laser

Yang Changsheng^{1,3}, Cen Xu¹, Xu Shanhuai^{1,2,3}, Yang Zhongmin^{1,2,3,4*}

¹State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

²School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

³Guangdong Engineering Technology Research and Development Center of Special Optical Fiber Materials and Devices, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

⁴Guangdong Provincial Key Laboratory of Fiber Laser Materials and Applied Techniques, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

Abstract Single-frequency fiber lasers (SFFLs) have been widely applied in the fields of laser weapons, laser lidar, laser space communication, coherent optical communication, high-precision spectral measurement, and gravitational wave detection. In this paper, the research progress of SFFLs at home and abroad is reviewed on the three typical working wavelength bands of 1.0, 1.5, and 2.0 μm . The content includes the SFFL generation, noise suppression, linewidth compression, continuous and pulsed single-frequency laser amplification, and other technologies. In addition, combining with our research on SFFLs, we focus on the recent progress of SFFLs based on the single oscillator and main oscillation power amplifier, and prospect the future development of SFFLs.

Key words lasers; single-frequency; fiber laser; main oscillation power amplifier; noise suppression

OCIS codes 140.3570; 140.3510; 140.3460; 140.3280

1 引言

单频光纤激光器具有线宽窄、噪声低、相干性

好、转换效率高、全光纤化结构等优点, 在激光武器、激光雷达、空间激光通信、相干光通信、高精度光谱测量、引力波探测等领域有着广泛的应用前景, 成为

收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-08-26; 录用日期: 2020-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(11674103, 61635004, 61535014)

* E-mail: yangzm@scut.edu.cn

了激光领域的一个研究热点。根据增益光纤稀土离子掺杂类型(Yb^{3+} 、 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 等)与激射波长的不同,目前主要有 $1.0\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\ \mu\text{m}$ 和 $2.0\ \mu\text{m}$ 三种典型波段的单频光纤激光器。按照单频光纤激光器中谐振腔的结构和工作原理,可将其分为分布布拉格反射(DBR)型、分布反馈(DFB)型和环形腔型单频光纤激光器,其中 DBR 型和 DFB 型单频光纤激光器的腔型为驻波腔,环形腔型为行波腔。环形腔的腔长一般较长、结构复杂、缺乏有效的鉴频机制,容易出现跳模,较难以某一特定纵模长期稳定地工作。相比而言,线形腔结构简单、效率高、不易出现跳模、工作稳定,直接在光纤纤芯写入 Bragg 光栅作为腔镜可形成单频激光输出。

一般使用稀土离子掺杂石英光纤作为短线形腔的增益介质,从而实现线宽为 $2\sim 15\ \text{kHz}$ 、功率为数毫瓦的单频激光输出。但石英光纤中稀土离子的掺杂浓度较低,限制了其输出功率。基于单振荡器结构并将稀土离子高掺杂的多组分玻璃光纤作为增益介质,单频光纤激光器已实现了数百毫瓦的输出功率,但要获得更高功率的输出通常需要借助于种子源主振荡功率放大(MOPA)方案,即使用一段增益光纤和泵浦源组成的光纤放大器对小功率单频激光种子源进行放大,以提升其功率水平。

自 1991 年美国联合技术研究中心的 Ball 等^[1]使用短线形腔在掺 Er^{3+} 石英光纤中实现单频激光输出以来,经过 30 年的发展,单频光纤激光在基础研究和应用技术方面取得了长足进步,但是目前仍存在一些亟待解决的科学与技术问题。国内有较多单位对单频光纤激光器开展了研究,且各具特色。比如:北京工业大学主要研究了 $1.0\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\ \mu\text{m}$ DBR 型单频光纤激光器^[2-3],同时也有研究涉及到将 DFB 型单频半导体激光器作为种子源进行 $2.0\ \mu\text{m}$ 单频光纤激光功率放大的研究^[4];中国科学院上海光学精密机械研究所对脉冲单频光纤激光器进行了研究^[5-7],天津大学对环形腔型单频光纤激光器进行了研究^[8-10];而本课题组主要研究了覆盖 $1.0\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\ \mu\text{m}$ 和 $2.0\ \mu\text{m}$ 三个波段的 DBR 型单频光纤激光器^[11-15]。

本文从 $1.0\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\ \mu\text{m}$ 和 $2.0\ \mu\text{m}$ 三种典型工作波段进行归类,从应用背景出发,综述了单频光纤激光器的国内外研究现状,内容涵盖了单频光纤激光产生、噪声抑制、线宽压窄、连续和脉冲单频激光放大等技术。此外,结合了本课题组在单频光纤激光器方面的研究工作,着重介绍了基于线形短腔和 MOPA 结构单频光纤激光器近年来的研究进展,并

展望了单频光纤激光器的未来发展方向。

2 $1.0\ \mu\text{m}$ 波段单频光纤激光器

基于掺 Nd^{3+} 或 Yb^{3+} 增益光纤的单频激光器主要工作于 $1.0\ \mu\text{m}$ 波段(集中于 $978\sim 1120\ \text{nm}$ 波长范围),在光晶格钟、深空探测、量子计算和基础物理研究等领域具有重要的应用前景^[16-17]。其中,波长范围为 $910\sim 940\ \text{nm}$ 的单频光纤激光器通过倍频技术可获得纯蓝光单频激光,可用于原子冷却、高分辨率 3D 光刻和水声通信等领域^[18-19];波长范围为 $960\sim 985\ \text{nm}$ 的单频光纤激光器可用作产生高性能蓝光及深紫外激光的基频光源^[20]。 $1064\ \text{nm}$ 波段($1020\sim 1080\ \text{nm}$)单频光纤激光器可用于相干或光谱合束、激光测距、引力波探测、激光雷达等领域^[21-23]。 $1120\ \text{nm}$ 单频光纤激光器可用作 $1178\ \text{nm}$ 拉曼光纤激光器的高质量泵浦源^[24-25],亦可通过倍频技术获得 $560\ \text{nm}$ 单频激光,可用于原子冷却、生物医学成像和生物检测等领域^[26]。

2.1 $1.0\ \mu\text{m}$ 波段连续单频光纤激光器

在小于 $1.0\ \mu\text{m}$ 短波长连续单频激光输出方面,2016 年天津大学的 Fang 等^[27]报道了 $930\ \text{nm}$ 线偏振单频光纤激光器,利用长度为 $2.5\ \text{cm}$ 的掺 Nd^{3+} 石英光纤制作 DBR 短腔,实现了功率为 $1.9\ \text{mW}$ 、线宽为 $44\ \text{kHz}$ 的单频激光输出。2012 年,美国亚利桑那大学的 Zhu 等^[28]首次报道了 $976\ \text{nm}$ 线偏振单频光纤激光器,利用长度为 $2\ \text{cm}$ 的掺 Yb^{3+} 磷酸盐光纤制作 DBR 短腔,获得了功率为 $100\ \text{mW}$ 、线宽小于 $3\ \text{kHz}$ 、偏振消光比大于 $20\ \text{dB}$ 的连续单频激光输出。2017 年,本课题组的 Huang 等^[29]基于半导体光放大器(SOA)的饱和放大效应对 $978\ \text{nm}$ DBR 单频光纤激光器进行了噪声抑制,获得了功率为 $230\ \text{mW}$ 、线宽小于 $10\ \text{kHz}$ 的连续单频激光输出,其相对强度噪声在 $1.8\sim 10\ \text{MHz}$ 频段范围内接近 $-150\ \text{dB/Hz}$ 。通过缩短掺 Yb^{3+} 磷酸盐光纤的长度至 $3.5\ \text{mm}$ 来制作超短腔,使其具有较大相邻纵模间隔,从而使得激光器的单纵模运转温度区间为 $9.8\sim 25.1\ ^\circ\text{C}$,相对应的波长调谐范围为 $977.856\sim 977.958\ \text{nm}$ 。其实验装置图如图 1 所示。

在常规波长($1064\ \text{nm}$ 附近)连续单频激光输出方面,早在 2004 年,美国 NP Photonics 公司的 Noginov 等^[30]利用长度为 $1.5\ \text{cm}$ 的掺 Yb^{3+} 磷酸盐光纤制作了 DBR 短腔,获得了功率大于 $200\ \text{mW}$ 、线宽小于 $3\ \text{kHz}$ 的 $1060\ \text{nm}$ 连续单频激光输出,其有效腔长达 $4\sim 5\ \text{cm}$ 。2011 年,本课题组的 Xu 等^[11]

利用更高掺杂浓度的磷酸盐光纤将谐振腔的物理腔长缩短至 0.8 cm, 其有效腔长仅为 1.4 cm, 使得相邻纵模间隔更大, 实现了功率为 400 mW、线宽小于

7 kHz 的 1064 nm 连续单频激光输出, 这是已报道的基于单振荡器结构的 1.0 μm 波段单频激光的最高功率。其实验装置如图 2 所示。

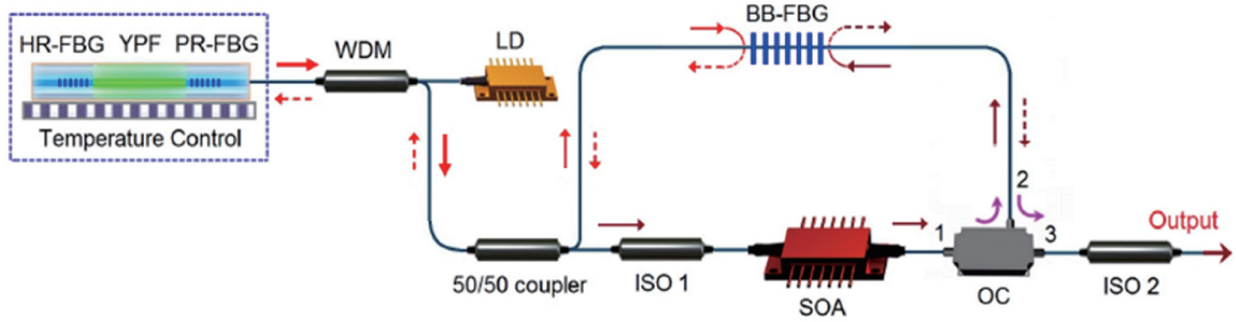


图 1 978 nm 超短腔 DBR 单频光纤激光器实验装置图^[29]

Fig. 1 Experimental setup of 978-nm ultrashort cavity DBR single-frequency fiber laser^[29]

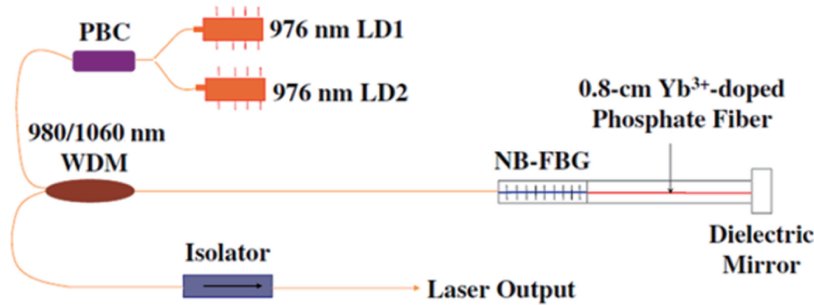


图 2 短线形腔掺 Yb³⁺ 单频磷酸盐光纤激光器实验装置图^[11]

Fig. 2 Experimental setup of short linear cavity Yb³⁺-doped single-frequency phosphate fiber laser^[11]

一般在利用高增益多组分玻璃光纤构建 DBR 短谐振腔的过程中, 亟需解决多组分玻璃光纤与石英光纤 Bragg 光栅的连接问题, 由于两种异质光纤的物化性质 (如软化温度、热膨胀系数和折射率等) 差异较大, 很难利用现有石英光纤的熔接技术进行直接熔接。因此, 本课题组开发了非对称熔接工艺, 将电极放电的加热点固定在靠近石英光纤的一端, 通过在两种异质光纤之间产生一种梯度温度场来提高两光纤端面间的热扩散, 除利用电极直接对多组分玻璃光纤端面进行加热外, 还利用石英光纤的端面对多组分玻璃光纤端面进行间接加热, 传递的热量最终将两种异质光纤端面处的玻璃软化, 使之紧密接触在一起并形成永久性的接合。

在高功率连续单频激光输出方面, 受激布里渊散射(SBS)是限制输出功率水平提升的主要因素, 通常抑制 SBS 的手段主要包括: 增大光纤纤芯模场面积、缩短光纤使用长度、使用特殊光纤降低光场/声场重叠度、通过施加温度及应力梯度降低 SBS 增益等。2014 年, 美国空军实验室的 Robin 等^[31] 基于空间光路的 MOPA 结构对 1064 nm 非平面环形激光

种子源(NPRO)进行了放大, 主放大级采用 976 nm 多模半导体激光器抽运一段保偏掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤, 获得了功率为 811 W、斜率效率达 80% 的连续单频激光输出, 这是已报道的 1.0 μm 波段单频激光的最高功率。其实验装置如图 3 所示。

2017 年, 国防科技大学的 Huang 等^[32] 利用三级光纤放大器组成的 MOPA 结构对单频光纤激光种子源进行了放大, 通过对主放大级增益光纤施加纵向应力以提升 SBS 阈值, 实现了功率为 414 W、偏振度达 98% 的 1064 nm 连续单频激光输出。2018 年, 本课题组的 Yang 等^[33] 基于 1064 nm 单频光纤激光种子源和三级光纤放大器, 主放大级采用一段长度为 2 m、纤芯直径为 30 μm 的大模场面积掺 Yb³⁺ 双包层光纤, 获得了功率为 210 W、线宽小于 9 kHz、偏振度达 96% 的线偏振连续单频激光输出。2020 年, 国防科技大学的 Lai 等^[34] 基于全光纤 MOPA 结构对单频光纤激光种子源进行了放大, 值得注意的是主放大级使用一段长度为 1.2 m 的锥形掺 Yb³⁺ 双包层光纤(T-YDF)作为增益介质, 实现了功率为 550 W、光束质量因子 M^2 为 1.47、斜率效率达 80% 的 1030 nm 连续单频激光输出, 这是已

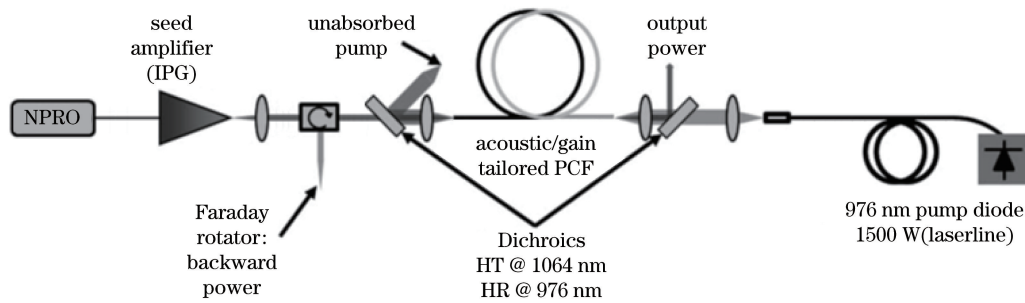


图 3 单频放大器实验装置图^[31]

Fig. 3 Experimental setup of single-frequency amplifier^[31]

报道的基于全光纤结构的单频激光器的最高功率。T-YDF 具有直径逐渐变化的特点,导致 SBS 发生频移,使得 SBS 增益谱展宽,从而提升了 SBS 阈值。其功率曲线如图 4 所示。

在大于 1.0 μm 的长波长连续单频激光输出方面,2016 年,本课题组的 Yang 等^[12]报道了 1120 nm 线偏振单频光纤激光器,通过优化 Bragg 光栅参数和增益光纤使用长度,利用长度为 3.1 cm 的掺 Yb³⁺ 磷酸盐光纤制作 DBR 短腔,获得了功率为 62 mW、线宽为 5.7 kHz、偏振消光比大于 25 dB 的单频激光输出,其相对强度噪声在频率 10 MHz 处小于 -150 dB/Hz。其实验装置图如图 5 所示。

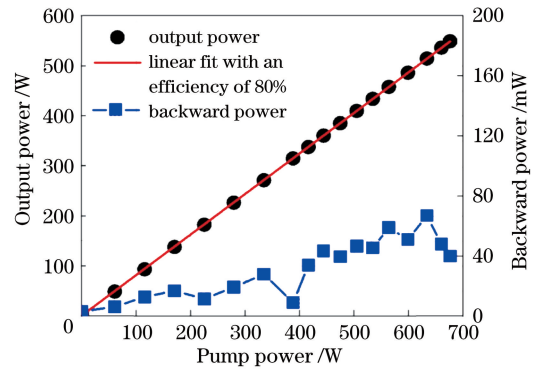


图 4 输出功率和后向功率与泵浦功率的关系图^[34]

Fig. 4 Output power and backward power versus pump power^[34]

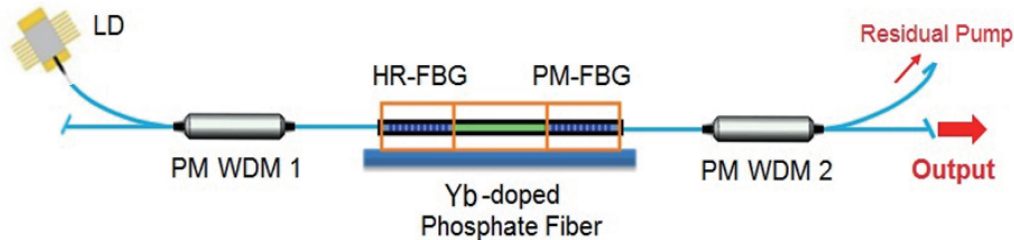


图 5 1120 nm 线偏振 DBR 单频光纤激光器实验装置^[12]

Fig. 5 Experimental setup of 1120 nm linearly-polarized DBR single-frequency fiber laser^[12]

2020 年,本课题组的 Wang 等^[35]报道了基于掺 Nd³⁺ 硅酸盐光纤的低阈值 1120 nm 单频光纤激光器,利用长度为 1.5 cm 的掺 Nd³⁺ 硅酸盐光纤制作了 DBR 短腔,获得了阈值为 10 mW、线宽为 71.5 kHz、功率为 15 mW 的连续单频激光输出。掺 Nd³⁺ 硅酸盐光纤的增益谱覆盖 1120 nm 区域,属于四能级系统 (Nd³⁺: $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$),相比于传统的三能级系统更易实现粒子数反转,其阈值更低。掺 Nd³⁺ 光纤相比于掺 Yb³⁺ 光纤在 1120 nm 处具有更大的发射截面,在激光波长大于 1100 nm 的激光输出方面更有优势。

2.2 1.0 μm 波段脉冲单频光纤激光器

脉冲单频光纤激光器在获得高峰值功率和高脉冲能量的同时保持良好的光束质量,且在时间特性

上具有多样性,更能满足实际应用需求。单频纳秒脉冲光纤激光器在具有较窄脉冲宽度的同时还拥有极窄的光谱线宽,可用于非线性频率转换、激光雷达、激光精密测距和相干合成等领域^[36-39]。

2007 年,美国 NP Photonics 公司的 Leigh 等^[38]利用压电陶瓷作为调 Q 元件,其与掺 Yb³⁺ 磷酸盐光纤组成短直腔,实现了峰值功率为 13.6 W、重复频率为 700 kHz、脉宽为 18.8 ns 的 1064 nm 脉冲单频激光输出,且峰值功率随着重复频率的增加而减小,随着泵浦功率的增加而增大。2016 年,本课题组的 Zhang 等^[39]将 1083 nm DBR 短腔单频光纤激光种子源注入到环形腔中,获得了峰值功率为 3.8 W、重复频率为 1 kHz、信噪比达 58.4 dB 的脉冲单频激光输出。其实验装置图如图 6 所示。

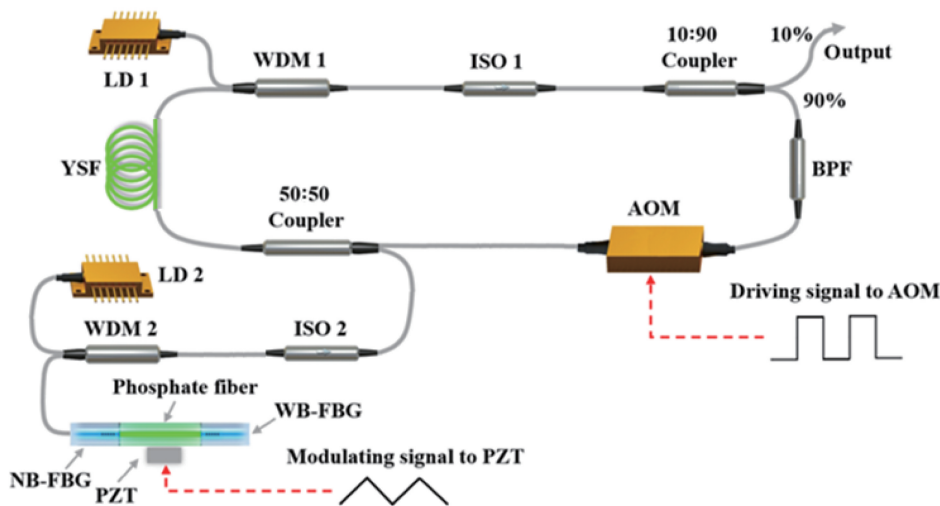


图 6 1083 nm 线性频率调制脉冲单频光纤激光器装置图^[39]

Fig. 6 Schematic diagram of linearly frequency-modulated pulsed single-frequency fiber laser at 1083 nm^[39]

2011 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的 Zhu 等^[6]利用声光调制器(AOM)对 NPRO 进行调制,随后采用 MOPA 结构对脉冲种子光进行了放大,获得了单脉冲能量为 100 μ J、脉宽为 500 ns、重复频率为 100 Hz、光束质量 M^2 为 1.1 的 1064 nm 单频脉冲激光输出。2013 年,国防科技大学的 Wang 等^[40]利用电光调制器(EOM)和模拟函数发生器将连续单频光纤激光种子源调制成脉宽为

6 ns、重复频率为 10 MHz 的脉冲激光,采用全光纤 MOPA 结构对其进行了放大,主放大级使用纤芯直径为 30 μ m 的大模场面积掺 Yb³⁺ 双包层光纤来抑制 SBS,获得了平均功率为 280 W、峰值功率为 4.6 kW、光束质量 M^2 为 1.3 的 1064 nm 单频脉冲激光输出。其实验装置图如图 7 所示。可以发现,尽管脉冲单频激光的平均功率和峰值功率都较高,但由于重复频率控制在兆赫兹量级,其单脉冲能量并不高。

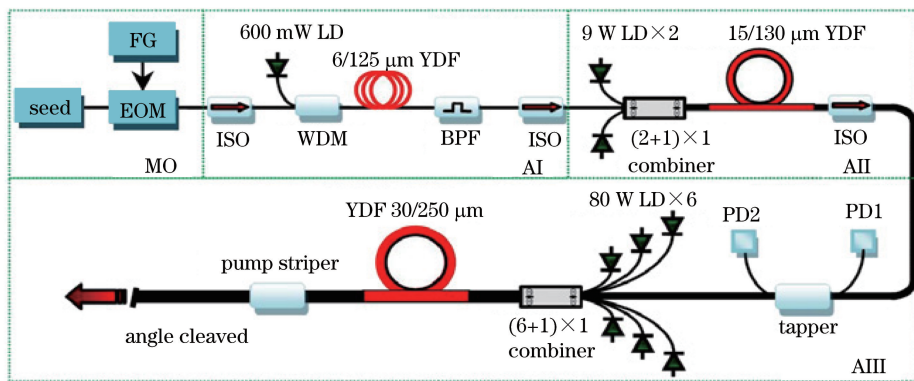


图 7 单频全光纤脉冲 MOPA 实验装置图^[40]

Fig. 7 Experimental setup of single-frequency all-fiber pulsed MOPA^[40]

3 1.5 μ m 波段单频光纤激光器

基于掺 Er³⁺ 或 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺增益光纤的单频激光器主要工作于 1.5 μ m 波段(C 波段:1530~1565 nm)以及部分 L 波段(1565~1625 nm)。其波长正处于光纤通信的 C 窗口,使得具有窄线宽、低噪声特性的 1.5 μ m 波段单频光纤激光器在相干光通信中有着很重要的价值,在高分辨率传感、光频域反射仪、激光雷达等领域也有广泛的应用。此外,处于人眼安全的 L 波段单频光纤激光器可应用于高

分辨率分子光谱学、激光雷达、掺 Tm³⁺ 激光器的高性能泵浦源和非线性频率转换等领域^[41-43]。

3.1 1.5 μ m 波段连续单频光纤激光器

1991 年,美国联合技术研究中心的 Ball 等^[1]使用光纤 Bragg 光栅作为腔镜,在掺 Er³⁺ 石英光纤中实现了功率为 5 mW、线宽小于 47 kHz 的 1548 nm 连续单频激光输出。但受石英光纤中稀土离子低掺杂浓度的制约,直接从单振荡器内获得的输出功率一直较低。直到 2003 年,美国 NP Photonics 公司的 Spiegelberg 等^[44]利用长度为 2 cm 的 Er³⁺/Yb³⁺

共掺磷酸盐光纤制作 DBR 短腔, 获得了功率为 100 mW、线宽小于 2 kHz 的 1535 nm 连续单频激光输出。2010 年, 本课题组的 Xu 等^[13]利用更高增益的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光纤制作了 DBR 短腔, 实现了功率大于 300 mW、线宽为 1.6 kHz、斜率效率达 30% 的 1535 nm 连续单频激光输出, 这是已报道的基于单振荡器结构的 1.5 μm 波段单频激光的最高功率。

在波长约为 1.6 μm 的连续单频激光输出方面, 2017 年, 本课题组的 Yang 等^[14]报道了 1.6 μm 单频光纤激光器, 利用长度为 1.6 cm 的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$

共掺磷酸盐光纤制作 DBR 短腔, 通过优化增益光纤使用长度和 Bragg 光栅参数, 获得了功率为 20 mW、线宽为 1.9 kHz 的 1603 nm 线偏振单频激光输出, 其相对强度噪声在 5 MHz 频率处低于 -140 dB/Hz。其实验装置图如图 8 所示。2018 年, 本课题组的 Yang 等^[45]利用 MOPA 结构对 1.6 μm 单频光纤激光种子源进行了放大, 主放大级采用一段长度为 4 m、纤芯直径为 25 μm 的大模场面积 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺保偏双包层光纤, 获得了功率为 15 W、线宽为 4.5 kHz、偏振消光比大于 23 dB 的 1603 nm 连续单频激光输出。

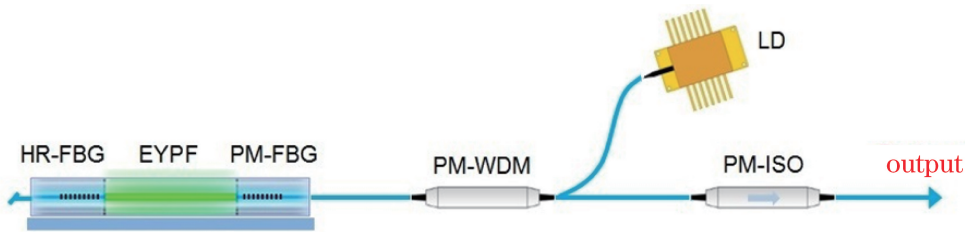


图 8 1.6 μm 线偏振 DBR 单频光纤激光器结构图^[14]

Fig. 8 Structural diagram of 1.6 μm linearly-polarized DBR single-frequency fiber laser^[14]

在高功率连续单频激光输出方面, 2013 年, 本课题组的 Yang 等^[46]利用一级 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤放大器对线偏振单频激光种子源进行了放大, 实现了功率为 10.9 W、线宽为 3.5 kHz、偏振消光比大于 24 dB 的 1560 nm 连续单频激光输出。2015 年, 天津大学的 Bai 等^[47]利用三级保偏光纤放大器组成的 MOPA 结构对线宽为 700 Hz 的单频光纤激光种子源进行了放大, 获得了功率为 56.4 W、光-光转换效率为 37.6% 的 1550 nm 连续单频激光输出。文中指出: 随着输出功率的增加, 最终激光线宽展宽至 4.21 kHz, 将其归因于泵浦功率的提升增大了激光中非相干成分[放大自发辐射(ASE)]。

2016 年, 英国 BAE 系统公司的 Creeden 等^[48]利用 MOPA 结构对单频光纤激光种子源进行了放大, 主放大级采用 940 nm 多模半导体激光器后向抽运大模场面积 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤, 获得了功率为 207 W、斜率效率达 50.5% 的 1560 nm 连续单频激光输出, 这是目前已报道的 1.5 μm 波段基于 MOPA 结构的单频激光器的最高功率。研究者采用非吸收峰值(一般使用 976 nm 泵浦波长)的泵浦方案, 有效提高了 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 离子之间的能量传递效率, 抑制了 1.0 μm 波段 ASE 的产生, 且降低了增益光纤的单位长度热负荷。其实验原理图和功率曲线图分别如图 9 和图 10 所示。

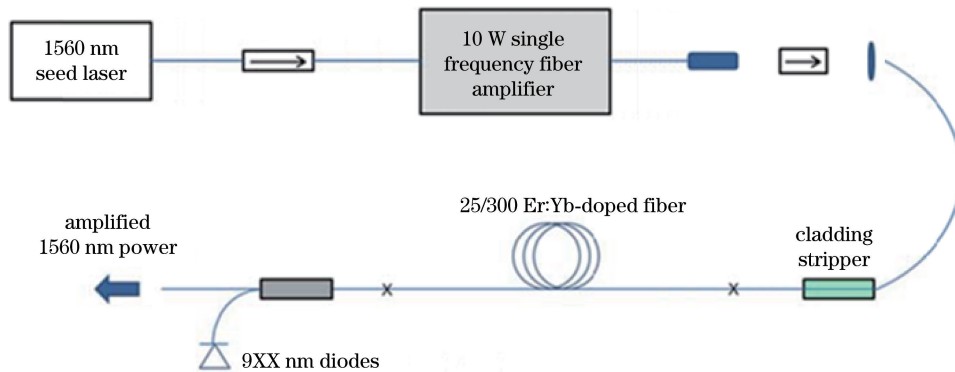


图 9 高功率单频 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤放大器原理图^[48]

Fig. 9 Schematic of high-power single-frequency $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber amplifier^[48]

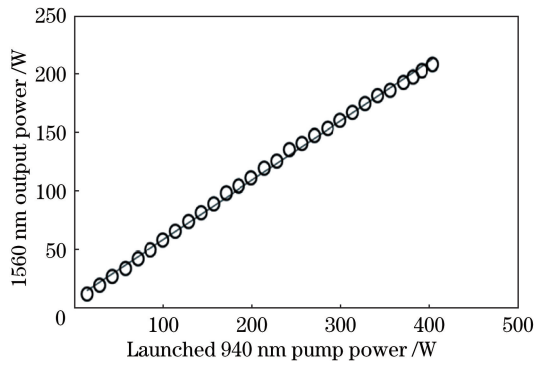


图 10 940 nm 泵浦的高功率 EYDFA 输出功率曲线^[48]
Fig. 10 Output power of high-power EYDFA pumped by 940 nm laser^[48]

值得一提的是,2020 年,本课题组的 Guan 等^[49]利用级联能量传输泵浦技术和 MOPA 结构对单频光纤激光种子源进行了放大。功率为 14 mW 的 1.6 μm 单频光纤激光种子源经两个光纤预放大器被放大至 2.5 W 功率,将其与功率为 500 mW 的 1550 nm 辅助光同时注入主放大级,最终获得了功率为 52.6 W、线宽为 5.2 kHz、斜率效率达 30.4% 的 1603 nm 连续单频激光输出。其功率曲线如图 11 所示。

在单频激光噪声抑制方面,1996 年,意大利米兰工业大学的 Taccheo 等^[50]对光电探测器(PD)采集的噪声信号进行处理后,将其与半导体激光器(LD)的直流驱动信号相叠加并加载在 LD 上,将单频光纤激光器在 160 kHz 附近的弛豫振荡峰处的强度噪声从 -84 dB/Hz 降低至 -114 dB/Hz。2014 年,法国雷恩大学的 Danion 等^[51]将掺 Er³⁺ 光

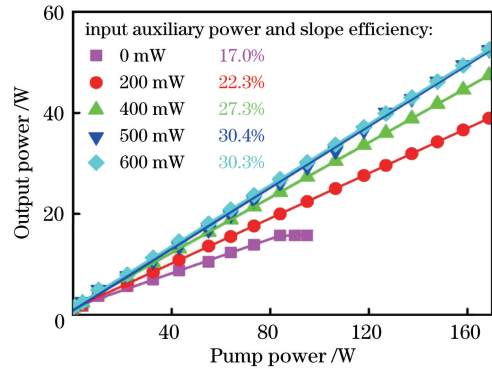


图 11 注入辅助光功率为 0,200,400,500,600 mW 时的输出功率曲线^[49]

Fig. 11 Output power versus pump power with input auxiliary power of 0, 200, 400, 500, and 600 mW^[49]

纤放大器和 SOA 相结合,实现了具有强度噪声抑制功能的混合光放大器,获得的最大抑制幅度达 20 dB,抑制带宽超过 3 GHz。2016 年,本课题组的 Zhao 等^[52]提出了 SOA 结合光电反馈的强度噪声抑制方案,使用可调衰减器和偏振控制器来控制输入光的功率和偏振,使 SOA 工作于增益饱和状态,并将相对强度噪声在 0.8 kHz~50 MHz 频段内抑制至 -150 dB/Hz@0.5 mW,其距离量子噪声极限仅为 2.9 dB。其实验装置结构如图 12 所示。2017 年,本课题组的 Yang 等^[53]利用两级光纤放大器组成的 MOPA 结构对经强度噪声抑制的单频光纤激光种子源进行了放大,实现了功率为 23 W、线宽小于 1.7 kHz 的低噪声 1550 nm 连续单频激光输出,其在 0.1~50 MHz 频段内的相对强度噪声低至 -150 dB/Hz@0.5 mW,接近量子噪声极限。

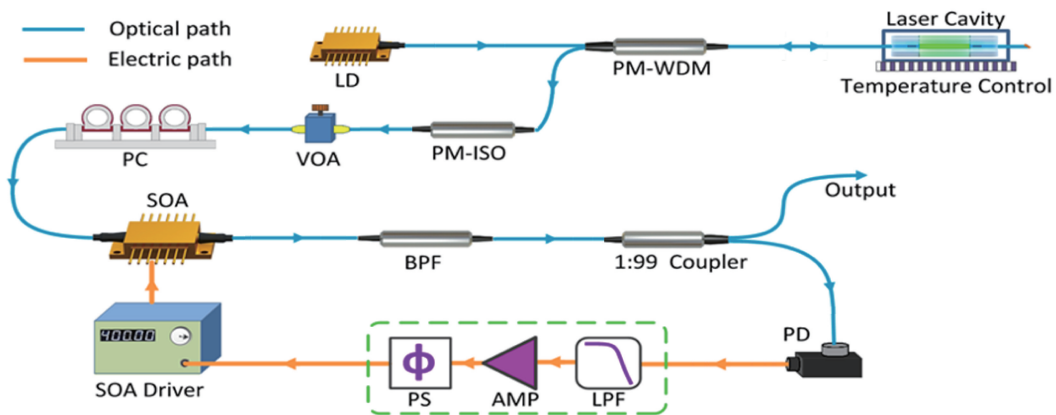


图 12 基于 SOA 和光电负反馈的单频光纤激光器强度噪声抑制实验装置示意图^[52]

Fig. 12 Experimental setup diagram of intensity noise suppression of single-frequency fiber laser based on SOA and optoelectronic negative feedback^[52]

单频激光的频率噪声抑制技术主要有基于光纤干涉仪、光学反馈、光学微腔等技术。2009 年,法国

巴黎第十三大学的 Kéfélian 等^[54]使用 1 km 臂差的迈克耳孙干涉仪,并在干涉仪中插入 AOM 进行信

号外差检测,将 1.5 μm DFB 光纤激光器在 1 Hz~10 kHz 频段内的频率噪声抑制了 40 dB,其中 1 kHz 处的频率噪声低至 10^{-2} Hz/Hz^{1/2}。2015 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的 Dong 等^[55]使用两个 500 m 臂差的迈克耳孙干涉仪,分别锁定两台光纤激光器,其短期(0.1~1 s)分频稳定度达到 7×10^{-15} ,该研究实现了 0.67 Hz 的拍频线宽。基于非平衡干涉仪的技术方案可获得很好的频率噪声抑制效果,但容易受外界环境的扰动。2015 年,

本课题组的 Li 等^[56]采用将 SOA 与光学反馈系统相结合的方案,对单频激光的频率噪声实现了 25 dB 的抑制,频率噪声谱在 20 kHz 以上开始逐渐接近 $10^{-0.7}$ Hz/Hz^{1/2} 的噪声基底,即整个激光器系统的极限噪声。其实验装置如图 13 所示。基于光学反馈的技术方案简单易行,可实现对中高频段的频率噪声的有效抑制,然而受环境扰动以及光学反馈机制的影响,该技术难以对低频段的频率噪声产生抑制作用。

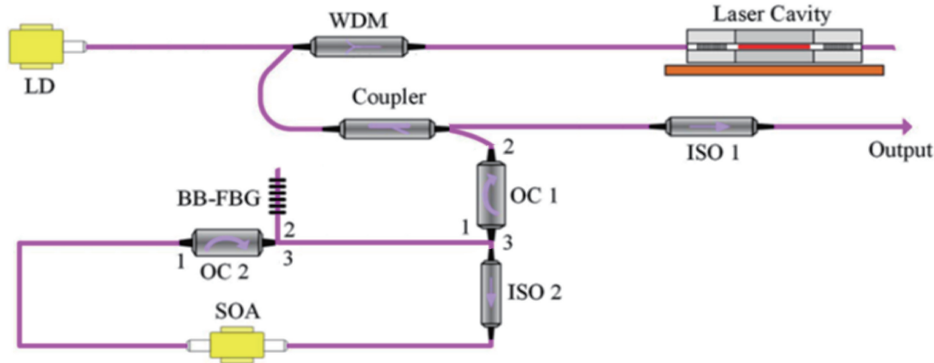


图 13 光学反馈与 SOA 相结合的单频光纤激光频率噪声抑制实验装置图^[56]

Fig. 13 Experimental setup diagram of frequency noise suppression of single-frequency fiber laser based on SOA and optical feedback^[56]

在单频激光线宽压窄方面,2014 年,本课题组的 Mo 等^[57]基于长度为 1.5 cm 的 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐光纤制作慢光虚拟折叠腔,通过滤波器的时延来延长腔内光子寿命,实现了激光线宽为 600 Hz 的 1550 nm 超窄线宽单频激光输出。其实验原理

示意图如图 14 所示,一对保偏光纤 Bragg 光栅和全波片在腔内起到偏振扭转的作用,用于实现光场强度分布均匀化,从而消除空间烧孔。文中亦指出折叠腔技术结合光栅 F-P 滤波器慢光效应可将谐振腔的有效腔长扩展为其物理长度的数倍。

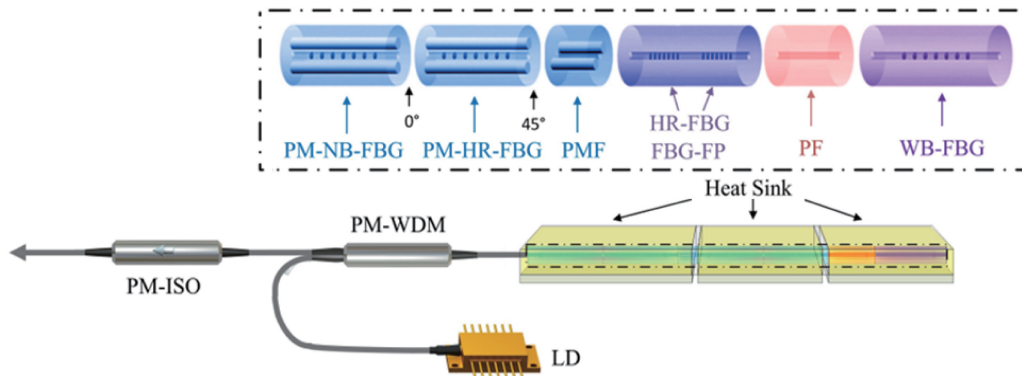


图 14 百赫兹量级线宽单频光纤激光器原理示意图^[57]

Fig. 14 Schematic diagram of 100-Hz-level-linewidth single-frequency fiber laser^[57]

2019 年,本课题组的吴梓胜^[58]采用自注入锁定结合优化了泵浦噪声的泵浦源对 1550 nm DBR 短腔单频光纤激光器进行了噪声抑制,实现了洛伦兹线宽约为 88.7 Hz、相对强度噪声在 1~10 kHz 频段范围为 -146.5 dB/Hz@0.5 mW 的单频激光输

出。研究表明,通过自注入锁定和优化泵浦噪声可将激光器的洛伦兹线宽压窄至百赫兹以下。其线宽测试结果如图 15 所示。

在单频激光波长调谐方面,2001 年,美国南加利福尼亚大学的 Song 等^[59]在环形腔中使用一段未

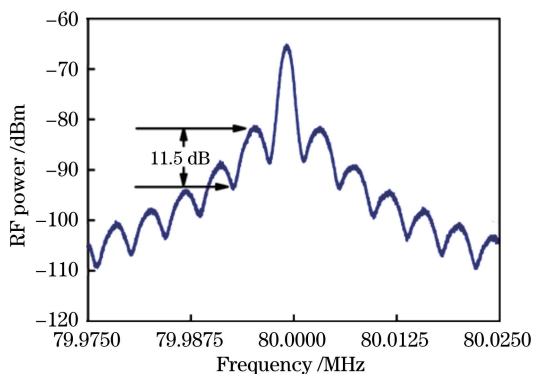


图 15 自注入锁定下单频光纤激光器的线宽^[58]

Fig. 15 Laser linewidth of self-injection locked single-frequency fiber laser^[58]

泵浦的增益光纤作为饱和吸收体,将其与可高度拉伸的光纤光栅相结合进行配合选频,实现了波长调谐范围为 1522~1562 nm、线宽为 750 Hz 的连续单频激光输出。2014 年,华中科技大学的 Yang 等^[60]基于双环复合腔结构,利用 F-P 滤波器、带通滤波器和一段未泵浦的增益光纤作为饱和吸收体,实现了波长调谐范围为 1535~1565 nm、边模抑制比达 65 dB 的连续单频激光输出。2016 年,本课题组的 Zhang 等^[61]利用短直腔结合自注入锁定并引入可调谐器件,通过将滤波后的可调谐光自注入到由 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐光纤组成的 DBR 短腔内,获得了波长调谐范围为 1527~1563 nm、线宽小于 700 Hz 的连续单频激光输出。其实验装置图如图 16 所示。

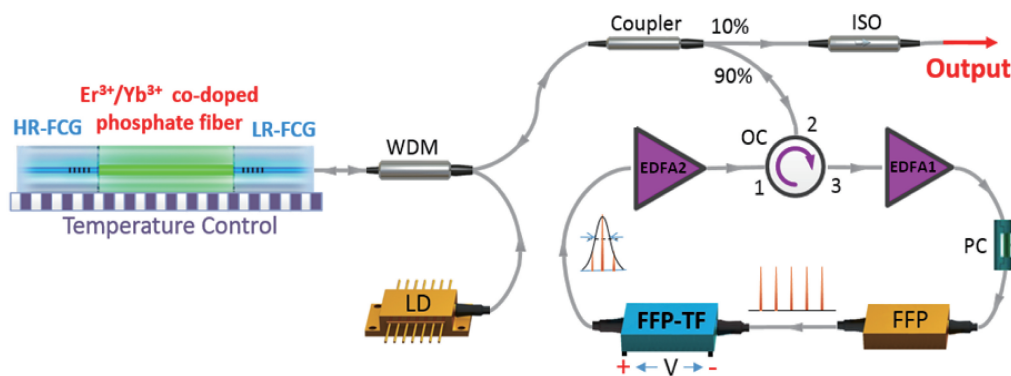


图 16 自注入锁定可调谐单频光纤激光器实验装置图^[61]

Fig. 16 Experimental setup of self-injection locked tunable single-frequency fiber laser^[61]

3.2 1.5 μm 波段脉冲单频光纤激光器

1.5 μm 波段脉冲单频光纤激光器以其时域和频域上的特性,在激光测风雷达、激光水听器、光纤陀螺仪、光学传感与测量等领域具有广阔的应用前景^[62-63]。2004 年,美国 NP Photonics 公司的 Kaneda 等^[64]通过在 DBR 短直腔内加入压电陶瓷来产生压致双折射,通过腔内调制产生调 Q 激光,实现了峰值功率为 25 W、脉宽为 12 ns 的 1550 nm 脉冲单

频激光输出。2019 年,本课题组的 Li 等^[65]利用具有可饱和吸收特性的半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 在短线性腔内进行调 Q,采用长度为 1.3 cm 的 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐光纤作为增益介质,获得了峰值功率为 533 mW、脉冲能量为 55.4 nJ、重复频率为 350.9 kHz、脉宽为 104 ns 的四波长脉冲单频激光输出,其中心波长分别为 1548.89, 1549.30, 1549.71, 1550.10 nm。实验装置如图 17 所示。

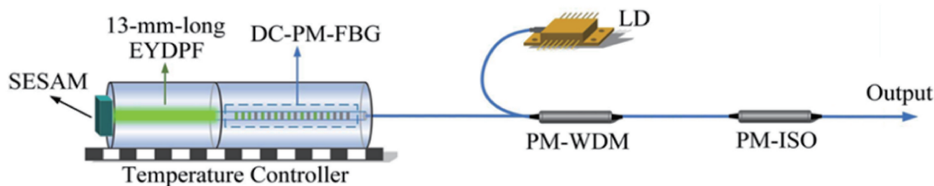


图 17 多波长被动调 Q 单频光纤激光器结构装置图^[65]

Fig. 17 Structural diagram of multi-wavelength passively Q-switched single-frequency fiber laser^[65]

在高功率脉冲单频激光输出方面,2011 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的 Liu 等^[7]利用 AOM 将连续单频光纤激光种子源调制成脉宽为 500 ns、重复频率为 10 kHz 的脉冲激光,采用三

级光纤放大器组成的 MOPA 结构对脉冲种子光进行放大,在泵浦功率为 8.4 W 和重复频率为 10 kHz 的条件下,获得了平均功率为 1.16 W、单脉冲能量为 116 μJ 的 1533 nm 脉冲单频激光输出。通常,在

脉冲单频激光放大过程中, SBS 亦是限制输出功率提升的主要因素。多组分玻璃光纤具有较大的单位长度增益系数, 可通过极大地缩短主放大级的增益光纤使用长度来提升 SBS 阈值。2009 年, 天津大学的 Shi 等^[66]采用 MOPA 结构对波长为 1538 nm、脉宽为 160 ns、重复频率为 20 kHz 的脉冲单频光纤

激光种子光进行放大, 主放大级使用纤芯直径为 15 μm 的短长度 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光纤作为增益介质, 实现了峰值功率为 332 W、脉宽为 153 ns、重复频率为 20 kHz、单脉冲能量为 54 μJ 的保偏单频脉冲激光输出。其实验装置结构如图 18 所示。

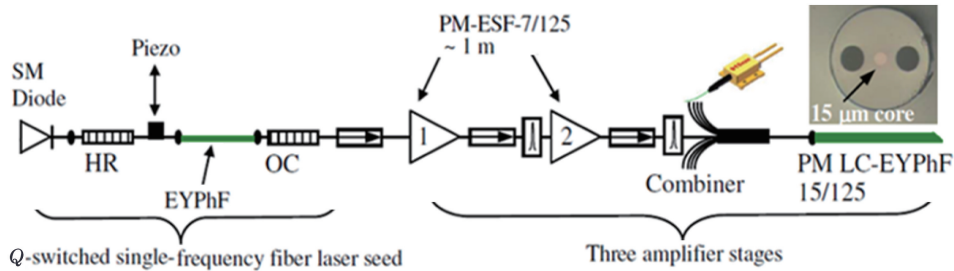


图 18 单模脉冲单频 MOPA 激光器实验装置结构图^[66]

Fig. 18 Structural diagram of single-frequency MOPA laser based on single-mode pulse^[66]

2012 年, 美国亚利桑那大学的 Petersen 等^[67]利用任意波形发生器(AWG)和 EOM 将 1550 nm 连续单频光纤激光调制成重复频率为 10 kHz、脉宽为 12 ns 的脉冲激光, 采用四级光纤放大器组成的 MOPA 结构对脉冲种子光进行放大, 获得了峰值功率为 128 kW、脉宽为 3 ns、重复频率为 10 kHz、单脉冲能量为 0.38 mJ 的窄线宽脉冲激光输出。

DBR 短腔, 获得了功率为 50 mW、斜率效率为 35% 的 1893 nm 连续单频激光输出。2018 年, 本课题组的 Guan 等^[15]利用长度为 1.8 cm 的掺 Tm^{3+} 锗酸盐光纤同样制作了 DBR 短腔, 以 1610 nm 光纤激光器作为同带泵浦源, 获得了功率为 617 mW、线宽为 12.55 kHz、斜率效率为 42.2% 的 1950 nm 连续单频激光输出, 这是已报道的基于单振荡器结构的 2.0 μm 波段单频激光的最高功率。其功率曲线如图 19 所示。

4 2.0 μm 波段单频光纤激光器

基于掺 Tm^{3+} 增益光纤的单频激光器主要工作于 2.0 μm 波段(涵盖 1.7~2.1 μm 波长范围), 在精密测量、高分辨率光谱学、相干雷达、激光遥感、非线性转换和无创医学等领域有着广泛的应用^[68-70]。2.0 μm 波段为人眼安全波段, 用其作为激光光源可避免激光在大气中传输时可能带来的危害。此外, 2.0 μm 波段单频光纤激光器的非线性效应阈值相比于 1.0 μm 波段的要高, 在窄线宽高功率或高能量输出方面具有一定的优势^[4,71]。

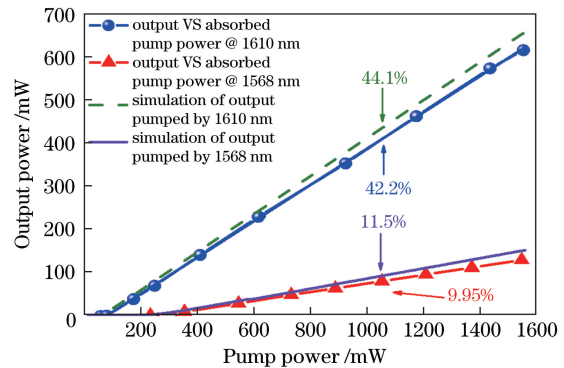


图 19 输出功率在不同泵浦波长下的模拟和实验结果^[15]

Fig. 19 Simulated and experimental results of output powers versus pump power for different pump wavelengths^[15]

4.1 2.0 μm 波段连续单频光纤激光器

在波长约为 1.7 μm 的短波长连续单频激光输出方面, 2004 年, 丹麦技术大学的 Agger 等^[72]报道了波长为 1.7 μm 的单频光纤激光器, 利用长度为 4.7 cm 的掺 Tm^{3+} 硅酸盐光纤制作 DFB 谐振腔, 使用 790 nm 半导体激光器作为泵浦源, 实现了功率为 1 mW、斜率效率仅为 0.2% 的 1735 nm 连续单频激光输出。

在大于 2.0 μm 的长波长连续单频激光输出方面, 2019 年, 天津大学的 Shi 等^[10]采用具有选频作用的级联单模-多模-单模(SMS)光纤装置和长度为 7 m 的掺 Tm^{3+} 石英光纤制作了环形腔, 并利用 Sagnac 环中未泵浦的一段有源光纤作为可饱和吸收体来实现单纵模运转, 获得了功率为 20.9 mW、信噪比大于 60 dB 的 2004.9 nm 连续单频激光输出。

在常规波长(1.9 μm 附近)连续单频激光输出方面, 2007 年, 美国 NP Photonics 公司的 Geng 等^[73]利用长度为 2 cm 的掺 Tm^{3+} 锗酸盐光纤制作

其装置示意图如图 20 所示。

在高功率连续单频激光输出方面,2007 年,美国 IPG 公司的 Gapontsev 等^[74]采用两级光纤放大器组成的 MOPA 结构对 DFB 单频光纤激光种子源进行了放大,实现了功率为 20 W 的 1932 nm 连续单频激光输出,文中指出输出功率的提升仅受限于泵浦功率。2009 年,美国诺格公司的 Goodno 等^[71]将功率为 3 mW 的 DFB 单频半导体激光器作为种子源,使用三个光纤预放大器将信号光功率提升至

16 W,主放大级使用长度为 3.1 m 的非保偏双包层掺 Tm³⁺ 石英光纤,获得了功率为 608 W、光束质量因子为 1.05±0.03 的 2040 nm 连续单频激光输出,其实验装置图如图 21 所示。2014 年,北京工业大学的 Liu 等^[4]采用四级掺铥保偏光纤放大器组成 MOPA 结构,对功率为 3.5 mW 的 DFB 单频半导体激光种子源进行了放大,获得了功率为 210 W、偏振消光比大于 17 dB 的 2000.9 nm 线偏振连续单频激光输出。

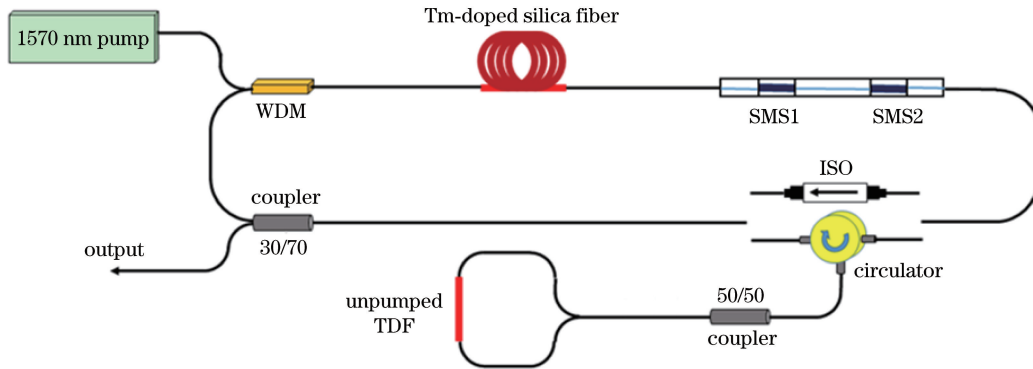


图 20 基于级联 SMS 光纤器件的单频掺铥石英光纤激光器装置示意图^[10]

Fig. 20 Diagram of single-frequency Tm³⁺-doped silica fiber laser based on cascaded SMS fiber devices^[10]

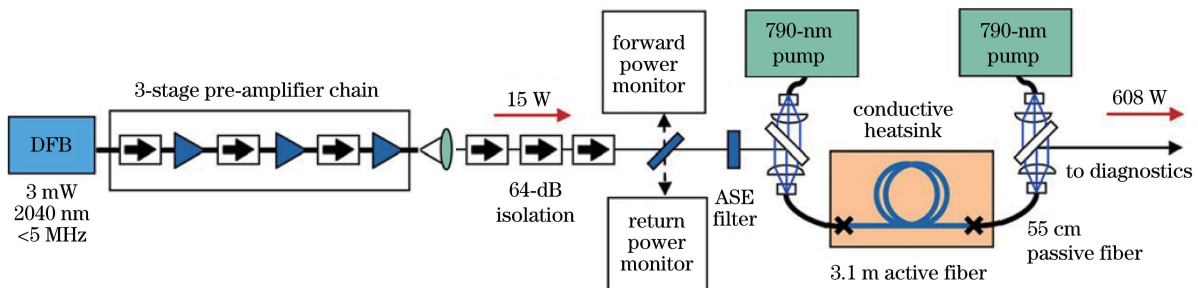


图 21 四级单频掺 Tm³⁺ 光纤放大器实验装置图^[71]

Fig. 21 Experimental setup diagram of four-stage single-frequency Tm³⁺-doped fiber amplifier^[71]

2020 年,本课题组的 Guan 等^[75]采用纤芯同带泵浦方式对单频光纤激光种子源进行了放大,以高功率 1610 nm 光纤激光器作为同带泵浦源,主放大级使用长度为 3 m 的保偏掺 Tm³⁺ 单包层石英光纤,获得了功率为 55.3 W、线宽为 6.95 kHz、偏振消光比 (PER) 为 19 dB、斜率效率为 71.0% 的 1950 nm 连续单频激光输出,光束质量因子 M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.01 和 1.03。其功率曲线如图 22 所示。

相比于 MOPA 结构中掺 Tm³⁺ 石英光纤几米甚至十几米的使用长度,具有高增益的短长度掺 Tm³⁺ 磷酸盐光纤可明显减弱非线性效应^[76-77]。2016 年,本课题组的 Yang 等^[76]采用两级掺 Tm³⁺ 磷酸盐光纤放大器组成的 MOPA 结构对 DBR 短腔

单频光纤激光种子源进行了放大,主放大级使用长度为 31 cm 的掺 Tm³⁺ 双包层磷酸盐光纤作为增益介质,获得了功率为 11.7 W、光-光转换效率为 20.4% 的 1950 nm 连续单频激光输出。研究者估算的激光系统的 SBS 阈值约为 980 W,远高于目前的输出功率值,这表明其输出功率水平还有进一步提高的可能性。

4.2 2.0 μm 波段脉冲单频光纤激光器

2.0 μm 人眼安全波段的脉冲单频光纤激光器能够应用于激光雷达、激光医疗、污染控制、中红外超连续谱等领域^[78-79]。利用 2.0 μm 单频脉冲激光器作为泵浦源,通过非线性频率转换[如光学参量振荡器(OPO)或差频产生(DFG)等]来产生波长更长的中红外激光^[80]。

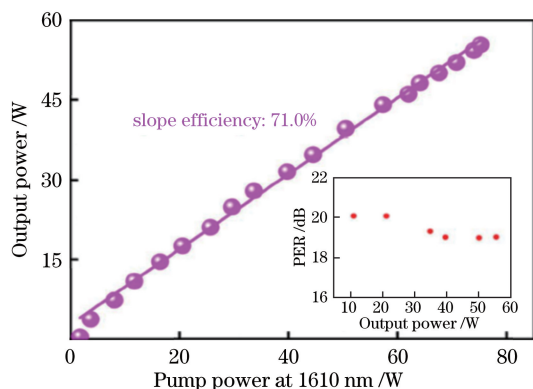


图 22 1610 nm 激光泵浦的 1950 nm 线偏振单频光纤激光器的功率曲线^[75]。插图为不同输出功率下的偏振消光比

Fig. 22 Power of 1950 nm linear polarization single-frequency fiber laser versus pump power at 1610 nm^[75]. Inset: PERs at different output powers

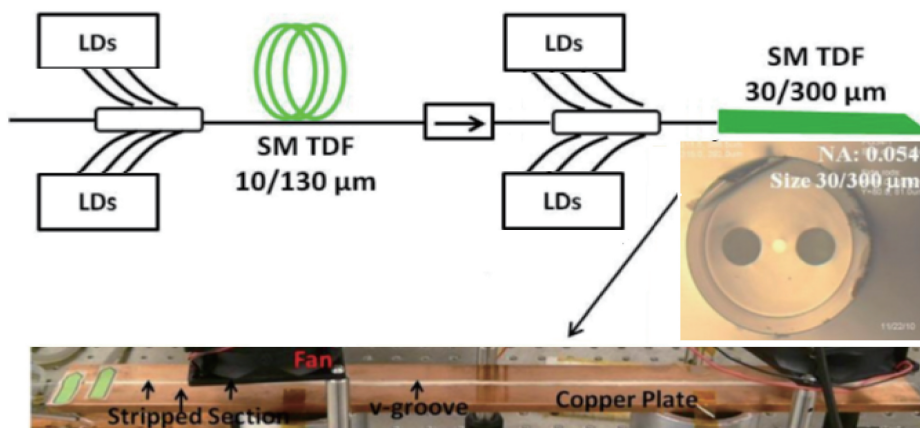


图 23 两级功率放大器结构示意图^[82]。插图为增益光纤横截面和实验装置图片

Fig. 23 Diagram of two-stage power amplifier^[82]. Inset: cross-section of gain fiber and picture of experimental device

2015 年,国防科技大学的 Wang 等^[83]利用强度调制器(IM)对连续单频光纤激光进行强度调制,实现了重复频率为 1 MHz 和脉宽为 156 ns 的单频脉冲种子光,然后采用 MOPA 结构对其进行了放大。主放大级采用一段长度为 2.9 m、纤芯直径为 25 μm 的掺 Tm³⁺ 双包层光纤作为增益介质,获得了平均功率为 105 W、重复频率为 1 MHz、脉宽为 66 ns 的 1971 nm 脉冲单频激光输出。文中指出输出功率水平的提升受限于 SBS,分析认为通过进一步展宽种子源的激光线宽或者窄化种子源的脉宽,有望实现更高的输出功率。

5 其他波段单频光纤激光器

除了 1.0 μm、1.5 μm、2.0 μm 三种典型波段单

2011 年,美国 AdValue Photonics 公司的 Geng 等^[81]采用 MOPA 结构对脉冲单频光纤激光种子源进行了放大,采用掺 Er³⁺ 光纤激光器作为泵浦源,光纤放大器使用长度约为 20 cm 的 Tm³⁺ 高掺杂单模非保偏石英光纤作为增益介质。在重复频率为 50 kHz 的条件下,获得了平均功率约为 240 mW、脉宽为 7 ns 的 1950 nm 脉冲单频激光输出。2012 年,美国 NP Photonics 公司的 Fang 等^[82]通过 AWG 和 EOM 将连续单频光纤激光直接调制成单频纳秒脉冲种子源,然后采用 MOPA 结构对其进行了放大,主放大级使用长度为 41 cm 的单模大芯径(30 μm)保偏高掺 Tm³⁺ 锆酸盐光纤作为增益介质,在重复频率为 500 kHz 时获得了平均功率为 16.01 W、脉宽约为 2 ns 的 1918.4 nm 单频脉冲激光输出;在重复频率为 1 kHz 和脉宽约为 15 ns 时,获得了脉冲能量为近 mJ 量级的单频激光输出。其实验装置结构图如图 23 所示。

频光纤激光器之外,其他波段的单频光纤激光器也受到了研究者的关注。例如:1.2 μm 波段单频光纤激光器在氧气大气遥感、光动力治疗、微创医学中具有重要的应用价值^[84-85]。此外,它还可以用作掺 Tm³⁺ 激光器的高质量泵浦源以及非线性频率转换的基频光源,进而产生高性能的橙黄色激光、蓝光激光、紫外激光等。此外,2.0~3.0 μm 波段单频光纤激光在材料加工与处理、药品、防御和安全等领域亦有着广阔的应用前景^[86-88]。

2012 年,美国 NP Photonics 公司的 Zhu 等^[89]报道了 1.2 μm DBR 短腔单频光纤激光器,采用长度为 2.2 cm 的掺 Ho³⁺ ZBLAN(ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF)光纤作为增益光纤,以 1150 nm 光纤激光器作为泵浦源,实现了功率为 10 mW、线宽小于

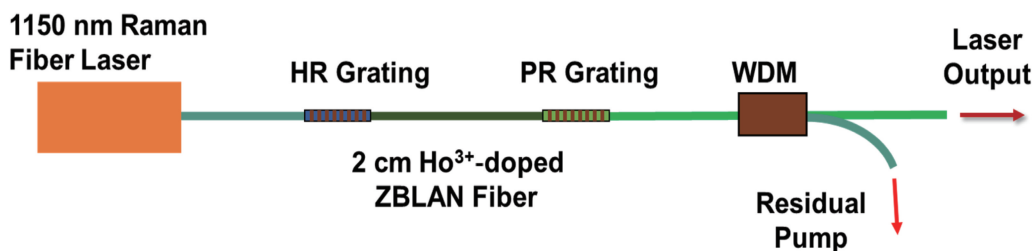


图 24 1200 nm 掺 Ho³⁺ ZBLAN 单频光纤激光器^[89]

Fig. 24 Diagram of 1200 nm Ho³⁺-doped single-frequency ZBLAN fiber laser^[89]

100 kHz、偏振消光比大于 19 dB 的 1200 nm 连续单频激光输出。其实验装置图如图 24 所示。

2012 年,美国 AdValue Photonics 公司的 Geng 等^[90]使用 1.95 μm 调 Q 脉冲光纤激光器作为同带泵浦源,利用高掺杂 Ho³⁺ 硅酸盐光纤作为增益介质,实现了峰值功率为 3 kW 的 2052 nm 脉冲单频激光输出。2013 年,悉尼大学的 Hudson 等^[87]利用长度为 4.9 cm 的 Ho³⁺/Pr³⁺ 共掺 ZBLAN 光纤,使用 1150 nm 光纤激光器作为泵浦源,实现了功率为

11 mW、线宽小于 0.4 nm 的 2914 nm 连续单频激光输出。

2015 年,加拿大拉瓦尔大学的 Bernier 等^[88]采用 DFB 结构,在高掺 Er³⁺ 氟化物光纤上直接刻写一段长度为 3 cm 的 π 相移 Bragg 光栅作为反射腔镜,使用 975 nm 半导体激光器作为泵浦源,获得了功率为 12 mW、线宽小于 20 kHz 的 2794.4 nm 连续单频激光输出,这是目前报道的波长最长的全光纤结构单频激光器。其实验装置图如图 25 所示。

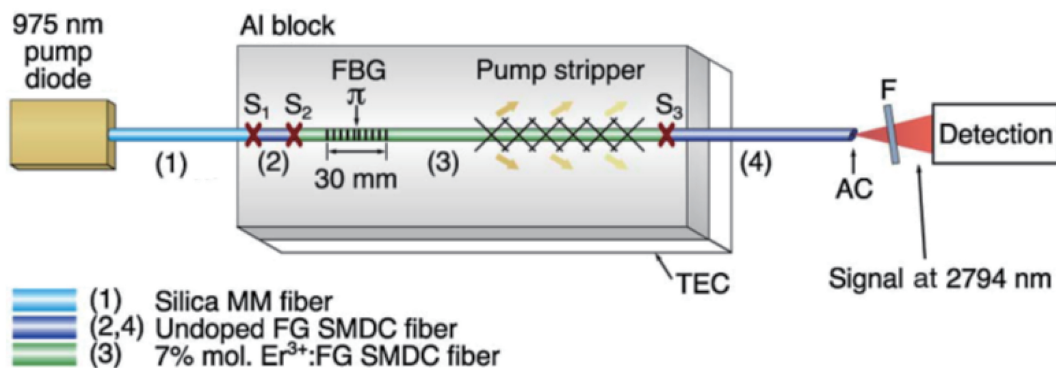


图 25 DFB 单频激光器原理图^[88]

Fig. 25 Schematic diagram of DFB single-frequency laser^[88]

从以上研究可以看出,氟化物增益光纤具有在近紫外至中红外的高度透明性以及较小的光损耗,是产生中红外光纤激光的强有力手段。相信随着稀土离子(Ho³⁺、Dy³⁺、Er³⁺等)掺杂氟化物光纤制作和泵浦源工艺技术的日益成熟,发展中红外 2.0~4.0 μm 波段以及可见光波段(黄光、绿光、蓝光等)的单频光纤激光器将是未来的研究热点和必然趋势。

6 结 论

单频光纤激光器经过 30 年的迅猛发展,已实现了平均功率为数百瓦、峰值功率为数千瓦、激光线宽为百赫兹、强度噪声接近量子噪声极限、波长调谐范围为数十纳米等的输出性能。从 1.0 μm、1.5 μm 和 2.0 μm 三种典型工作波段进行归类,从应用背

景出发,综述了单频光纤激光器的国内外研究现状,内容涵盖了单频光纤激光产生、噪声抑制、线宽压窄、连续和脉冲单频激光放大等技术;结合了本课题组在单频光纤激光器方面的研究工作,着重介绍了基于单振荡器和 MOPA 结构的单频光纤激光器的研究进展。近年来,已有报道利用氟化物增益光纤直接获得 2.0~4.0 μm 以及蓝绿光波段多纵模激光发射^[91-92],相信通过进一步优化谐振腔结构与增益光纤性能,有望基于高性能增益光纤实现可见光和中红外波段的单频激光输出。

单频光纤激光器当前正朝着高功率/高能量、超窄线宽、超低噪声、特殊波段、波长可调谐等方向深入发展,尽管取得了长足的进步,但在基础研究和应用技术方面仍然存在一些不足:1)在线宽、噪声、波长等输出性能方面有待进一步提升和完善,如激光

线宽压窄至赫兹量级、突破量子噪声极限的噪声抑制、波长超宽范围与超高精度可调谐等;2)输出功率有待进一步提高,探索新型的非线性效应抑制机制与技术,进而提升单频激光功率水平;3)关于高功率/高脉冲能量的脉冲单频激光报道相对较少,需要进一步推动其技术研究;4)有待进一步探究新型稀土离子掺杂光纤材料,同时需要持续提升和完善增益光纤、高质量光纤 Bragg 光栅刻写、高性能泵浦源等研制技术,以支撑与满足特殊波段单频光纤激光技术的发展需求。

总之,实现更高功率/能量、超低噪声、超窄线宽和更丰富波长的单频光纤激光技术仍然是未来的主要研究方向,相信单频光纤激光器的进一步发展将会持续推动前沿科学研究、国民经济发展和国家战略需求,同时大幅提升其应用价值和科学意义。

参 考 文 献

- [1] Ball G A, Morey W W, Glenn W H. Standing-wave monomode erbium fiber laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1991, 3(7): 613-615.
- [2] Hou Y B, Zhang Q, Wang P. Frequency- and intensity-noise suppression in Yb^{3+} -doped single-frequency fiber laser by a passive optical-feedback loop [J]. Optics Express, 2016, 24(12): 12993-12999.
- [3] Hou Y B, Zhang Q, Qi S X, et al. 15 μm polarization-maintaining dual-wavelength single-frequency distributed Bragg reflection fiber laser with 28 GHz stable frequency difference [J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1383-1386.
- [4] Liu J, Shi H X, Liu K, et al. 210 W single-frequency, single-polarization, thulium-doped all-fiber MOPA [J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13572-13578.
- [5] Zhang X, Diao W F, Liu Y, et al. Eye-safe single-frequency single-mode polarized all-fiber pulsed laser with peak power of 361 W [J]. Applied Optics, 2014, 53(11): 2465-2469.
- [6] Zhu R, Zhou J, Liu J Q, et al. High energy narrow-linewidth ytterbium-doped pulsed fiber amplifier [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8192: 81922S.
- [7] Liu Y, Liu J Q, Chen W B. Eye-safe, single-frequency pulsed all-fiber laser for Doppler wind lidar [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(9): 090604.
- [8] Xie Z X, Shi C D, Sheng Q, et al. A single-frequency 1064-nm Yb^{3+} -doped fiber laser tandem-pumped at 1018 nm [J]. Optics Communications, 2020, 461: 125262.
- [9] Fu S J, Shi W, Zhang H W, et al. Linewidth-narrowed, linear-polarized single-frequency thulium-doped fiber laser based on stimulated Brillouin scattering effect [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 1-7.
- [10] 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.
- [11] Xu S H, Yang Z M, Zhang W N, et al. 400 mW ultrashort cavity low-noise single-frequency Yb^{3+} -doped phosphate fiber laser [J]. Optics Letters, 2011, 32(18): 3708-3710.
- [12] Yang C S, Zhao Q L, Feng Z M, et al. 1120 nm kHz-linewidth single-polarization single-frequency Yb -doped phosphate fiber laser [J]. Optics Express, 2016, 24(26): 29794-29799.
- [13] Xu S H, Yang Z M, Liu T, et al. An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at 15 μm [J]. Optics Express, 2010, 18(2): 1249-1254.
- [14] Yang C S, Guan X C, Lin W, et al. Efficient 16 μm linearly-polarized single-frequency phosphate glass fiber laser [J]. Optics Express, 2017, 25(23): 29078-29085.
- [15] Guan X C, Yang C S, Qiao T, et al. High-efficiency sub-watt in-band-pumped single-frequency DBR Tm^{3+} -doped germanate fiber laser at 1950 nm [J]. Optics Express, 2018, 26(6): 6817-6835.
- [16] Yamaguchi A, Uetake S, Takahashi Y. A diode laser system for spectroscopy of the ultranarrow transition in ytterbium atoms [J]. Applied Physics B, 2008, 91(1): 57-60.
- [17] Paul J, Kaneda Y, Wang T L, et al. Doppler-free spectroscopy of mercury at 2537 nm using a high-power, frequency-quadrupled, optically pumped external-cavity semiconductor laser [J]. Optics Letters, 2011, 36(1): 61-63.
- [18] Sheth R, Balesh E R, Zhang Y S, et al. Three-dimensional printing: an enabling technology for IR [J]. Journal of Vascular and Interventional Radiology, 2016, 27(6): 859-865.
- [19] Fletcher A S, Hamilton S A, Moores J D. Undersea laser communication with narrow beams [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(11): 49-55.
- [20] Yang C S, Huang Z P, Deng H Q, et al. Ultra-compact all-fiber narrow-linewidth single-frequency blue laser at 489 nm [J]. Journal of Optics, 2018, 20(2): 025803.
- [21] Gray S, Liu A P, Walton D T, et al. 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb -doped fiber amplifier [J]. Optics Express, 2007, 15(25): 17044-17050.
- [22] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, et al. Coherent beam

- combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2939-2941.
- [23] Yang C S, Xu S H, Chen D, et al. 52 W kHz-line-width low-noise linearly-polarized all-fiber single-frequency MOPA laser[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(5): 055801.
- [24] Zhang L, Jiang H W, Cui S Z, et al. Versatile Raman fiber laser for sodium laser guide star[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): 889-895.
- [25] 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(2): 308-311.
- [26] Hansen A K, Christensen M, Noordegraaf D, et al. Efficient generation of 19 W yellow light by cascaded frequency doubling of a distributed Bragg reflector tapered diode [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(32): 9270-9274.
- [27] Fang Q, Xu Y, Fu S J, et al. Single-frequency distributed Bragg reflector Nd doped silica fiber laser at 930 nm [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1829-1832.
- [28] Zhu X S, Shi W, Zong J, et al. 976 nm single-frequency distributed Bragg reflector fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(20): 4167-4169.
- [29] Huang Z P, Deng H Q, Yang C S, et al. Self-injection locked and semiconductor amplified ultrashort cavity single-frequency Yb³⁺-doped phosphate fiber laser at 978 nm[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1535-1541.
- [30] Noginov M A, Zhu G H, Fowlkes I. Fiber-coupled random laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference and Photonic Applications Systems Technologies, San Francisco, California. Washington, D.C.: OSA, 2004: CThO3.
- [31] Robin C, Dajani I, Pulford B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811 W output power[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 666-669.
- [32] Huang L, Wu H S, Li R X, et al. 414 W near-diffraction-limited all-fiberized single-frequency polarization-maintained fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 1-4.
- [33] Yang C S, Guan X C, Xu S H, et al. 210 W kHz-line-width linearly-polarized all-fiber single-frequency MOPA laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2018: JTu2A.164.
- [34] 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.
- [35] Wang Y F, Wu J M, Zhao Q L, et al. Single-frequency DBR Nd-doped fiber laser at 1120 nm with a narrow linewidth and low threshold[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2263-2266.
- [36] Su R T, Zhou P, Xiao H, et al. 96.2 W all-fiberized nanosecond single-frequency fiber MOPA [J]. *Laser Physics*, 2012, 22(1): 248-251.
- [37] Zhang Y F, Feng Z M, Xu S H, et al. Compact frequency-modulation Q-switched single-frequency fiber laser at 1083 nm[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(12): 125705.
- [38] Leigh M, Shi W, Zong J, et al. Compact, single-frequency all-fiber Q-switched laser at 1 μm [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 897-899.
- [39] Zhang Y F, Yang C S, Li C, et al. Linearly frequency-modulated pulsed single-frequency fiber laser at 1083 nm [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3162-3167.
- [40] Wang X L, Zhou P, Su R T, et al. A 280 W high average power, single-frequency all-fiber nanosecond pulsed laser [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(1): 015101.
- [41] Deng Y, Yao B Q, Ju Y L, et al. A diode-pumped 1617 nm single longitudinal mode Er:YAG laser with intra-cavity etalons [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(7): 074202.
- [42] Fujita E, Mashiko Y, Asaya S, et al. High power narrow-linewidth linearly-polarized 1610 nm Er:Yb all-fiber MOPA [J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26255-26260.
- [43] Khamis M A, Ennsner K. Theoretical model of a thulium-doped fiber amplifier pumped at 1570 nm and 793 nm in the presence of cross relaxation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(24): 5675-5681.
- [44] Spiegelberg C, Geng J, Hu Y, et al. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm (June 2003) [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 57-62.
- [45] Yang C S, Guan X C, Zhao Q L, et al. 15 W high OSNR kHz-line-width linearly-polarized all-fiber single-frequency MOPA at 1.6 μm [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12863-12869.
- [46] Yang C S, Xu S H, Mo S P, et al. 109 W kHz-line-width one-stage all-fiber linearly-polarized MOPA laser at 1560 nm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12546-12551.
- [47] Bai X L, Sheng Q, Zhang H W, et al. High-power all-fiber single-frequency erbium-ytterbium co-doped fiber master oscillator power amplifier [J]. *IEEE*

- Photonics Journal, 2015, 7(6): 7103106.
- [48] 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[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9728: 97282L.
- [49] Guan X C, Zhao Q L, Lin W, et al. High-efficiency and high-power single-frequency fiber laser at 16 μm based on cascaded energy-transfer pumping[J]. Photonics Research, 2020, 8(3): 414-419.
- [50] Taccheo S, de Geronimo G, Laporta P, et al. Intensity noise reduction in a single-frequency ytterbium-codoped erbium laser[J]. Optics Letters, 1996, 21(21): 1747-1749.
- [51] Danion G, Bondu F, Loas G, et al. GHz bandwidth noise eater hybrid optical amplifier: design guidelines[J]. Optics Letters, 2014, 39(14): 4239-4242.
- [52] Zhao Q L, Xu S H, Zhou K J, et al. Broad-bandwidth near-shot-noise-limited intensity noise suppression of a single-frequency fiber laser[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1333-1335.
- [53] Yang C S, Guan X C, Zhao Q L, et al. High-power and near-shot-noise-limited intensity noise all-fiber single-frequency 15 μm MOPA laser[J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13324-13331.
- [54] Kéfélian F, Jiang H F, Lemonde P, et al. Ultralow-frequency-noise stabilization of a laser by locking to an optical fiber-delay line[J]. Optics Letters, 2009, 34(7): 914-916.
- [55] Dong J, Hu Y Q, Huang J C, et al. Subhertz linewidth laser by locking to a fiber delay line[J]. Applied Optics, 2015, 54(5): 1152-1156.
- [56] Li C, Xu S H, Huang X, et al. All-optical frequency and intensity noise suppression of single-frequency fiber laser[J]. Optics Letters, 2015, 40(9): 1964-1967.
- [57] Mo S P, Huang X, Xu S H, et al. 600-Hz linewidth short-linear-cavity fiber laser[J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5818-5820.
- [58] Wu Z S. Research on the noise suppression of 1.5 μm single-frequency fiber laser[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 28-36.
吴梓胜. 1.5 μm 单频光纤激光器噪声抑制技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 28-36.
- [59] Song Y W, Havstad S A, Starodubov D, et al. 40-nm-wide tunable fiber ring laser with single-mode operation using a highly stretchable FBG[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(11): 1167-1169.
- [60] Yang C L, Xia L, Wang Y W, et al. Wavelength tunable single longitudinal mode fiber laser pinned to 25 GHz spacing[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2014, 56(10): 2404-2406.
- [61] Zhang Y N, Zhang Y F, Zhao Q L, et al. Ultra-narrow linewidth full C-band tunable single-frequency linear-polarization fiber laser[J]. Optics Express, 2016, 24(23): 26209-26214.
- [62] 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.
- [63] Petersen E B, Shi W, Nguyen D T, et al. Enhanced terahertz source based on external cavity difference-frequency generation using monolithic single-frequency pulsed fiber lasers[J]. Optics Letters, 2010, 35(13): 2170-2172.
- [64] Kaneda Y, Hu Y D, Spiegelberg C, et al. Single-frequency, all-fiber Q-switched laser at 1550-nm[C]//Advanced Solid-State Photonics, Santa Fe, New Mexico. Washington, D.C.: OSA, 2004: PDP6.
- [65] Li K Y, Xu S H, Deng H Q, et al. Multi-wavelength, passively Q-switched, single-frequency fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(18): 1479-1482.
- [66] Shi W, Petersen E B, Leigh M, et al. High SBS-threshold single-mode single-frequency monolithic pulsed fiber laser in the C-band[J]. Optics Express, 2009, 17(10): 8237-8245.
- [67] 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.
- [68] Lippert E, Rustad G, Nicolas S, et al. Fibre-laser-pumped mid-infrared source[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5620: 56-62.
- [69] Clément Q, Melkonian J M, Barria J B, et al. Tunable optical parametric amplification of a single frequency quantum cascade laser around 8 μm in ZnGeP₂[C]//Advanced Solid-State Lasers Congress, Paris. Washington, D.C.: OSA, 2013: 4046-4054.
- [70] Stutzki F, Gaida C, Gebhardt M, et al. 152 W average power Tm-doped fiber CPA system[J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4671-4674.
- [71] 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.
- [72] Agger S, Povlsen J H, Varming P. Single-frequency thulium-doped distributed-feedback fiber laser[J]. Optics Letters, 2004, 29(13): 1503-1505.
- [73] Geng J H, Wu J F, Jiang S B, et al. Efficient operation of diode-pumped single-frequency thulium-doped fiber lasers near 2 μm [J]. Optics Letters, 2007, 32

- (4): 355-357.
- [74] Gapontsev D, Platonov N, Meleshkevich M, et al. 20 W single-frequency fiber laser operating at 1.93 μm [C]//2007 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 6-11, 2007, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2007: 1-2.
- [75] Guan X C, Yang C S, Gu Q, et al. 55 W kilohertz-linewidth core- and in-band-pumped linearly polarized single-frequency fiber laser at 1950 nm[J]. Optics Letters, 2020, 45(8): 2343-2346.
- [76] Yang C S, Chen D, Xu S H, et al. Short all Tm-doped germanate glass fiber MOPA single-frequency laser at 1.95 μm [J]. Optics Express, 2016, 24(10): 10956-10961.
- [77] Wu J F, Yao Z D, Zong J, et al. Highly efficient high-power thulium-doped germanate glass fiber laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(6): 638-640.
- [78] Henderson S W, Suni P J M, Hale C P, et al. Coherent laser radar at 2 μm using solid-state lasers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 4-15.
- [79] Yu J R, Trieu B C, Modlin E A, et al. 1 J/pulse Q-switched 2 μm solid-state laser[J]. Optics Letters, 2006, 31(4): 462-464.
- [80] Chandra S, Wager M E, Clayton B L, et al. 2- μm -pumped 8-12- μm OPO source for remote chemical sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4036: 200-208.
- [81] Geng J H, Wang Q, Jiang Z, et al. Kilowatt-peak-power, single-frequency, pulsed fiber laser near 2 μm [J]. Optics Letters, 2011, 36(12): 2293-2295.
- [82] 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.
- [83] Wang X, Jin X X, Zhou P, et al. 105 W ultra-narrowband nanosecond pulsed laser at 2 μm based on monolithic Tm-doped fiber MOPA[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4233-4241.
- [84] Anquez F, Courtade E, Sivéry A, et al. A high-power tunable Raman fiber ring laser for the investigation of singlet oxygen production from direct laser excitation around 1270 nm[J]. Optics Express, 2010, 18(22): 22928-22936.
- [85] Wanner M, Avram M, Gagnon D, et al. Effects of non-invasive, 1210 nm laser exposure on adipose tissue: results of a human pilot study[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2009, 41(6): 401-407.
- [86] Aydin Y O, Fortin V, Vallée R, et al. Towards power scaling of 2.8 μm fiber lasers[J]. Optics Letters, 2018, 43(18): 4542-4545.
- [87] 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.
- [88] 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.
- [89] Zhu X S, Zong J, Miller A, et al. Single-frequency Ho³⁺-doped ZBLAN fiber laser at 1200 nm[J]. Optics Letters, 2012, 37(20): 4185-4187.
- [90] Geng J H, Wang Q, Luo T, et al. Single-frequency gain-switched Ho-doped fiber laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3795-3797.
- [91] Mollae M, Zhu X S, Zong J, et al. Single-frequency blue laser fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2018, 43(3): 423-426.
- [92] Li W S, Wu J J, Cai Z P, et al. Directly blue diode-pumped green self-Q-switched Ho³⁺-doped fluoride all-fiber laser at ~ 550 nm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(22): 5727-5732.